

A MORFOLOGIA SUPERFICIAL DA ESTRUTURA CIRCULAR DE SÃO MIGUEL DO TAPUIO (PIAUI-BR) E CASOS SIMILARES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO

Jackson Alves MARTINS¹; Neivaldo Araújo de CASTRO²; Raimundo Mariano Gomes CASTELO BRANCO¹

- (1) Laboratório de Geofísica, Departamento de Geologia, Centro de Ciências e Ciências Exatas, Universidade Federal do Ceará (UFC), Av. Humberto Monte, s/n, CEP 60455-790, Campus do Pici, Bloco 1011. Fortaleza, Ceará, Brasil. Endereços eletrônicos: jackson_geologia@yahoo.com.br; mariano@ufc.br.
- (2) Departamento de Geociências, Centro de Ciências Humanas e Filosofia, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitário, Trindade, CEP 88.010-970, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. Endereço eletrônico: neivaldoac@hotmail.com.

Introdução
Método de trabalho e materiais
Contexto geológico: trabalhos anteriores
Morfologia superficial da estrutura circular de São Miguel do Tapuio
Estruturas circulares e semicirculares de origens exógena e endógena
Estruturas Exógenas (ECSCOEX)
Estruturas Endógenas (ECSCOEN)
Discussão
Considerações finais
Agradecimentos
Referências

RESUMO - A estrutura circular de São Miguel do Tapuio (ECSMT) é uma feição geomorfológica marcante registrada nos arenitos mesopaleozoicos da Bacia do Parnaíba (Piauí-Brasil). Nesse trabalho a caracterização morfológica superficial da ECSMT foi feita principalmente utilizando dados topográficos SRTM. Tal caracterização propiciou delinear um diâmetro de 20 km e definir: seu padrão estrutural circular impresso no relevo, elevado grau de simetria, a presença de bordas e núcleo topograficamente soerguidos, correlacionar as características do relevo aos compartimentos deformacionais e de transformação térmica definidos pelos estudos de campo e petrográficos. As características das principais estruturas circulares e semicirculares de origem endógena (ECSCOEN) e exógena (ECSCOEX) presentes no território brasileiro permitem estabelecer: as ECSCOEN raramente possuem morfologia circular perfeita, possuem diâmetros entre 8 e 38 km, ocorrem direta ou indiretamente associadas à complexos ígneos mesozoico; as ECSCOEX apresentam morfologia circular perfeita, diâmetros entre 4,5 e 40 km e são estruturas de impacto complexas. As características morfológicas superficiais da ECSMT são compatíveis com as apresentadas pelas ECSCOEX. Apesar das feições texturais e estruturais presentes na ECSMT serem apenas sugestivas para classificá-la como do tipo ECSCOEX, a não identificação de rochas ígneas aflorantes e/ou subsuperficiais, não permitem, por outro lado, enquadrá-la na categoria ECSCOEN.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, topografia SRTM, estruturas circulares endógenas, astroblemas.

ABSTRACT - The circular structure of São Miguel do Tapuio (ECSMT) is a striking geomorphological feature noted in the Mesopaleozoic sandstones of Parnaíba basin (Piauí-BR). In this work the morphological characterization of ECSMT surface was mainly provided using SRTM topographic data. Such characterization allowed us to outline a 20 Km diameter and define the following: the circular structural pattern distinguished in its relief, the high symmetrical degree, the presence of borders and core topographically uplifted, as well as the correlation of relief features with deformed and thermal transformed compartments described according to field surveys and petrographic studies. The features of the main circular and semi-circular structures of endogenous source (ECSCOEN) and exogenous source (ECSCOEX) found in the Brazilian territory allow us to establish that the ECSCOEN with diameters from 8 to 38 Km barely have perfect circular morphology, they are associated directly or indirectly to Mesozoic igneous complex; the ECSCOEX presents perfect circular morphology with diameters from 4.5 to 40 Km and they are highly complex impact structures. The morphological characteristics of ECSMT surface are compatible with the ones shown by the ECSCOEX. Despite the structural and textural features found in the ECSMT may be only suggestive to classify them as an ECSCOEX type, in the other hand, the lack of identification of the outcropping and/or subsurface igneous rock does not allow us to classify it as an ECSCOEN type.

Keywords: Remote sensing, SRTM topographic, endogenous circular structures, astroblemes.

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, várias estruturas de aspecto circular e semicircular foram identificadas graças ao fato de apresentarem-se bem marcadas no relevo. Devido à escala quilométrica, em alguns casos a plena

identificação destas estruturas somente foi possível com o surgimento de produtos oriundos do sensoriamento remoto aéreo (imagens SLAR (*side-looking airborne radar*) do Projeto RADAMBRASIL, por exemplo) e orbital

(LANDSAT (*Land Remote Sensing Satellite*) e SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*)). Desde então, tais estruturas têm sido transformadas em objetos de pesquisas que visaram elucidar sua gênese e em alguns casos também devido ao potencial econômico associado. As pesquisas focadas na caracterização genética das estruturas em questão consideram duas categorias de processos: endógenos (responsáveis pela geração de altos estruturais, intrusões ígneas máficas ou alcalinas e estruturas dômicas) e exógeno (impacto de bólidos celestes).

No território brasileiro ocorrem vários exemplos de estruturas circulares e semicirculares (figura 1), que originaram-se tanto por processos endógenos como exógenos. Como exemplos da primeira categoria podem ser citados o Alto Estrutural de Quatiguá no Paraná (Rostirolla et al., 2000), e o Domo de Pitanga em São Paulo (Sousa, 2002; Siqueira, 2011), cuja gênese é atribuída a processos associados à reativação de estruturas presentes no embasamento de bacias sedimentares fanerozoicas. De origem endógena existem ainda as estruturas associadas a intrusões de magmas alcalinos, merecendo destaque as de idade mesozoica, tais como Poços de Caldas em Minas Gerais (Slavec et al., 2004; Ulbrich et al., 2005), Catalão (Brod, 1999; Ribeiro, 2008; Cordeiro, 2009) e Araxá (Brod, 1999) em Goiás

e Lages em Santa Catarina (Scheibe, 1986). Como exemplos devidamente estudados de estruturas com gênese atribuída a processos exógenos tem-se as estruturas de Araguainha na divisa entre Mato Grosso e Goiás (Crósta et al., 2010a e b; Crosta, 2012), Vargeão em Santa Catarina (Kazzuo-Vieria, 2009), Vista Alegre no Paraná (Crosta et al., 2009), Cerro do Jarau no Rio Grande do Sul (Philipp et al., 2010), Serra da Cangalha no Tocantins (Reimold et al., 2006), Santa Marta no Piauí (Uchôa et al., 2013) e Riachão no Maranhão (Maziviero, 2012). Crosta (2012) aponta ainda como possíveis astroblemas as estruturas de Colônia, Piratininga e Praia Grande no Estado de São Paulo, Tefé no Amazonas e São Miguel do Tapuio no Piauí.

No contexto acima exposto, o presente trabalho tem como foco inicial caracterizar a morfologia superficial da Estrutura Circular de São Miguel do Tapuio (ECSMT) considerando sua expressão morfológica no relevo. Em seguida serão apresentadas as principais características associadas a importantes estruturas circulares e semicirculares de origem endógena e exógena presentes no território brasileiro. Com a exposição de tais características e a subsequente comparação dessas com as apresentadas pela ECSMT pretende-se contribuir para a discussão existente em torno da gênese dessa última.

MÉTODO DE TRABALHO E MATERIAIS

Para atingir os objetivos propostos, o trabalho desenvolvido envolveu de forma sequencial as seguintes categorias de atividades, materiais e ferramentas:

i) levantamento, análise e síntese dos trabalhos anteriores considerando o conhecimento prévio sobre a Bacia do Parnaíba, ECSMT, estruturas circulares e semicirculares presentes no território brasileiro, características e processos endógenos e exógenos responsáveis pela formação de tais estruturas;

ii) levantamento e processamento dos produtos oriundos do sensoriamento remoto orbital: a) imagens LANDSAT-5/TM (órbita 218

e ponto 064, datada de novembro de 2004, adquirida em <http://www.dgi.inpe.br>); b) dados SRTM, em formato *raster* TIF 32 bits, adquirido em <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>). O processamento foi realizado utilizando conhecimentos teóricos principalmente encontrados nos trabalhos de Lillesand & Kiefer (1994) e Drury (2004). As imagens LANDSAT foram trabalhadas através da análise das diferentes bandas isoladamente, composições coloridas RGB, análise por principais componentes e fusões considerando composições coloridas RGB de quatro bandas em conjunto com a primeira principal componente extraída

das bandas 1 a 5 e 7. Os dados topográficos SRTM foram processados e analisados através de imagens em pseudocor sombreadas nos sentidos norte, noroeste, nordeste, leste, oeste e imagem de declividade do terreno. Os dados topográficos foram ainda utilizados para o traçado de lineamentos de relevo e na confecção dos perfis topográficos locados de modo a seccionar a ECSMT nas direções NE – SW, NW – SW e N – S;

iii) armazenamento, análise e integração dos diferentes produtos e geração de mapas temáticos;

iv) levantamento das principais características associadas a estruturas circulares e semicirculares presentes no território nacional e comparação de tais características com as apresentadas pela ECSMT.

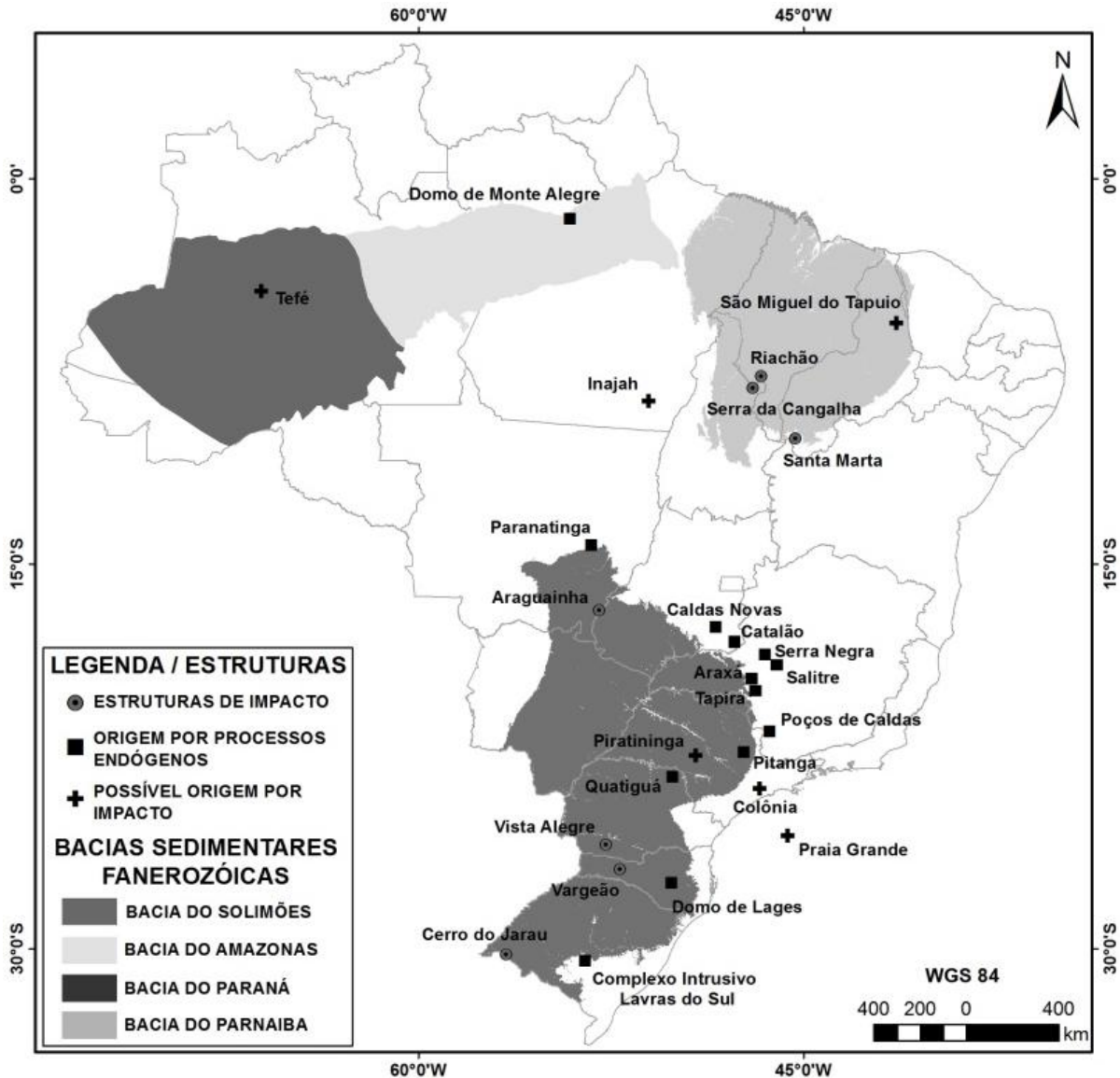


Figura 1. Principais estruturas circulares e semicirculares presentes no Brasil, comprovadamente geradas pelo impacto de meteoritos, possivelmente geradas por esse processo e de origem endógena.

CONTEXTO GEOLÓGICO: TRABALHOS ANTERIORES

A ECSMT encontra-se na borda leste da bacia sedimentar fanerozoica Parnaíba (BSFP), a qual é tida como do tipo intracratônica e possui uma área com aproximadamente 600.000 km². A BSFP é constituída por sequências sedimentares depositadas entre o Siluriano e Mesozóico, além de rochas vulcânicas mesozoicas (Santos & Carvalho, 2009). Sua coluna sedimentar apresenta uma espessura da ordem de 3.500 m e pode ser dividida em cinco sequências deposicionais, (Soares et al., 1978; Góes & Feijó, 1994), denominadas: i) siluro-ordoviciano: Grupo Serra Grande (Formações Ipu, Tianguá e Jaicós); ii) devoniano: Grupo Canindé (formações Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti); iii) carbonífero-triássico: Grupo Balsas (formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba); iv) jurássico: Grupo Mearim (formações Pastos Bons e Corda); e v) cretácico: Formações Grajaú, Codó e Itapecuru. Essas sequências são separadas por discordâncias regionais, correlacionáveis a eventos tectônicos de natureza global. Na BSFP, a ECSMT ocorre registrada em rochas pertencentes às sequências sedimentares siluro-ordoviciano (Grupo Serra Grande) e devoniano (Grupo Canindé), formações Pimenteiras e Cabeças (Correia Filho, 2006). O Grupo Serra Grande é uma unidade composta por arenitos com porções conglomeráticas que podem atingir 40 cm de espessura formados por seixos de quartzo de dimensões inferiores a 10 cm. A formação Pimenteiras ocorre na borda leste da ECSMT, é composta na sua porção inferior por sedimentos pelíticos (siltitos e folhelhos), e predominantemente por arenitos na porção superior. A formação Cabeças aflora da porção centro-leste até o limite oeste da ECSMT e é composta por arenitos, diamictitos e siltitos arenosos (Correia Filho, 2006).

Considerando as principais estruturas tectônicas regionais da região, a ECSMT encontra-se situada cerca de 60 km a leste do domínio onde tanto o embasamento como as rochas da BSFP encontram-se afetados pelo Lineamento Transbrasileiro (figura 2).

Assim como em boa parte do território brasileiro, a BSFP apresenta um amplo registro

do evento ígneo correlato à reativação da Plataforma Sulamericana durante o Mesozóico. Tal evento foi estudado por diversos autores (Amaral et al., 1966; Almeida et al., 1988; Mizusaki & Thomaz Filho, 2004), que destacam que o magmatismo é em sua maior parte de composição basáltica, e apesar de ocorrer em boa parte do território brasileiro está melhor representado nas regiões nordeste, sudeste e sul do Brasil. A presença desse magmatismo no nordeste oriental do Brasil encontra-se registrada através de diversos eventos intrusivos e efusivos que ocorrem concentrados nas bacias sedimentares Parnaíba, Potiguar, Lavras da Mangabeira e ainda na forma diques e *plugs* dispersos nas regiões onde afloram rochas pré-cambrianas. Na BSFP o registro ígneo em questão é representado pelas formações Mosquito e Sardinha (Aguiar, 1969). Ambas as formações são compostas preferencialmente pela associação basalto-diabásio. Pelas informações cartográficas disponíveis, as formações Mosquito e Sardinha ocorrem, respectivamente, a cerca de 150 km e 60 km a oeste da ECSMT.

A ECSMT vem sendo estudada desde a década de 1970, com as pesquisas pioneiras tendo sido realizadas por Siqueira Filho (1970), Nunes et al. (1973) e Lima (1978). Os resultados levantados nessa época levaram os autores a propor uma origem endógena para a ECSMT. Nos trabalhos realizados por Torquato (1981), Crosta (1982) e Castelo Branco (1994), já contemporâneos a publicações sobre estruturas de impacto em outras regiões do planeta, é aventada a possibilidade da ECSMT ter sido originada por impacto meteorítico (possível astrolema). Torquato (1981) apontou uma idade pré-abertura do Oceano Atlântico para a ECSMT, uma vez que concluiu que a estrutura encontra-se afetada por falhas desta idade. Segundo esse mesmo autor, os arenitos da formação Cabeças, regionalmente de cores claras e por vezes friáveis, apresentam-se no centro da estrutura profundamente modificados para um quartzito de cor avermelhada e de granulação muito fina. Observações efetuadas sobre fotografias aéreas e imagens de radar do programa RADAMBRASIL revelaram que a

ECSMT é uma feição geomorfológica proeminente, com relevos positivos e negativos alternados na forma de anéis concêntricos e

morfologia perfeitamente circular (Castelo Branco, 1994).

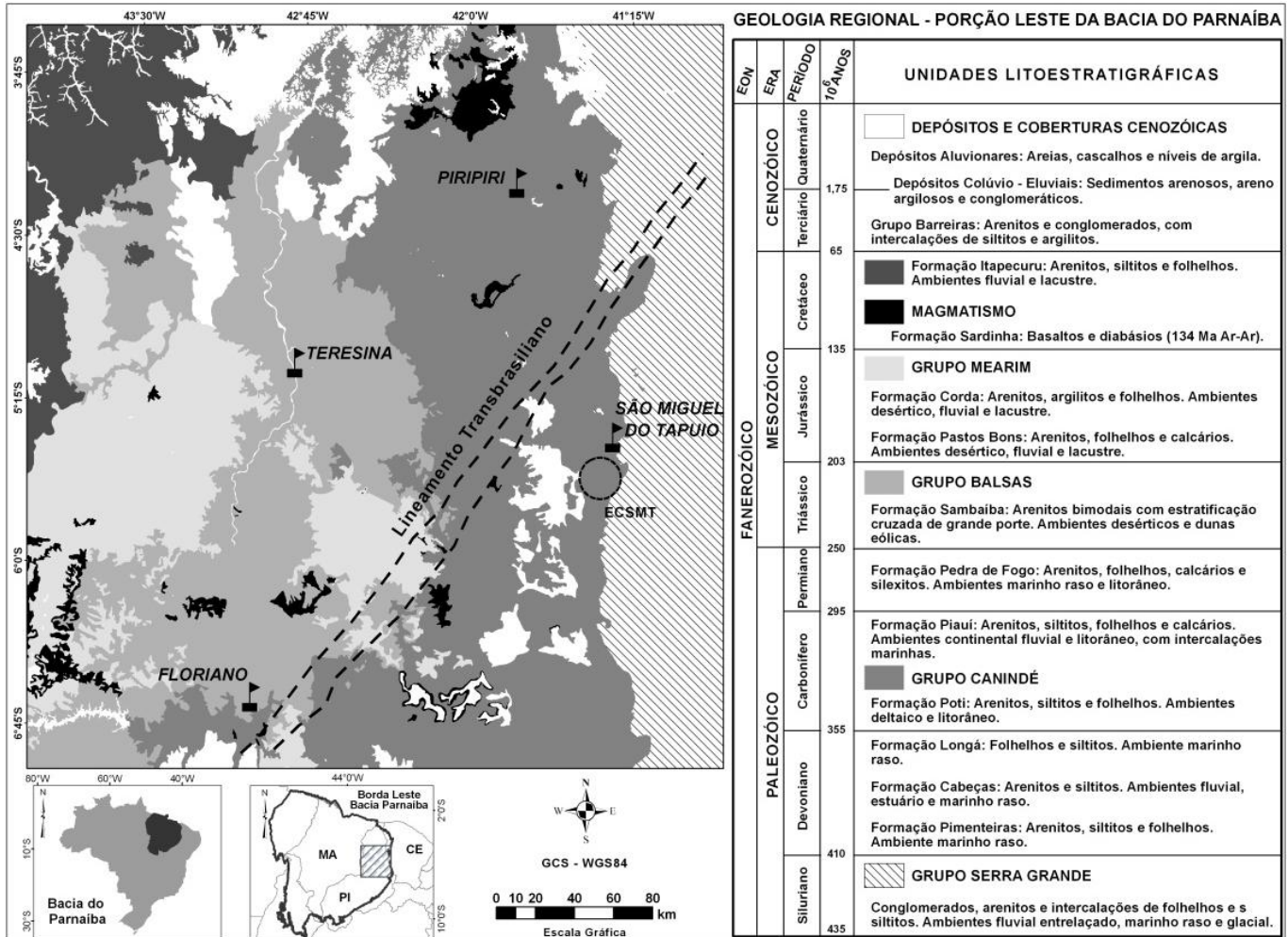


Figura 2. Mapa geológico regional de parte da borda leste da bacia do Parnaíba. A ECSMT encontra-se localizada à SW da localidade homônima. Fonte: modificado de Bizzi et al. (2003).

Os estudos posteriores reinstalaram o debate em torno da gênese da ECSMT. Castelo Branco et al. (2004) apontaram a existência de indicações de deformação de choque (feições planares), incluindo *shatter cones*. MacDonald et al. (2006) analisaram amostras de arenito conglomeráticos coletados no interior da estrutura e não encontraram nenhuma evidência conclusiva de deformação por choque, apenas algumas feições planares pouco desenvolvidas em grãos de quartzo. Vasconcelos et al. (2010), através de processamento de dados aerogeofísicos de baixa resolução (gravimetria e magnetometria), concluíram que as características geofísicas apresentadas pela

ECSMT são incompatíveis com as apresentadas por outras estruturas de impacto com dimensões semelhantes, o que junto com a aparente falta de evidências estruturais e de metamorfismo levou tais autores a afirmar que uma origem por impacto meteorítico não poderia ser sustentada.

Martins (2011), através de resultados oriundos de trabalhos de campo e laboratoriais (petrografia e processamento de dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto orbital), concluiu que a ECSMT deve ter se originado por impacto meteorítico e não por processos endógenos. A interpretação do autor baseou-se na assinatura morfológica superficial, na presença de estruturas deformacionais macro

e microscópicas (mesmo que não conclusivas) e na não identificação nos dados aerogeofísicos de

uma assinatura magnética compatível com uma intrusão ígnea não aflorante.

MORFOLOGIA SUPERFICIAL DA ESTRUTURA CIRCULAR DE SÃO MIGUEL DO TAPUIO

O relevo associado à ECSMT é marcadamente estruturado de forma circular, o que pode ser observado mesmo em produtos de sensoriamento remoto orbital onde o contraste

entre as altitudes mais e menos elevadas tende a ser reduzido (imagens LANDSAT por exemplo, figura 3).

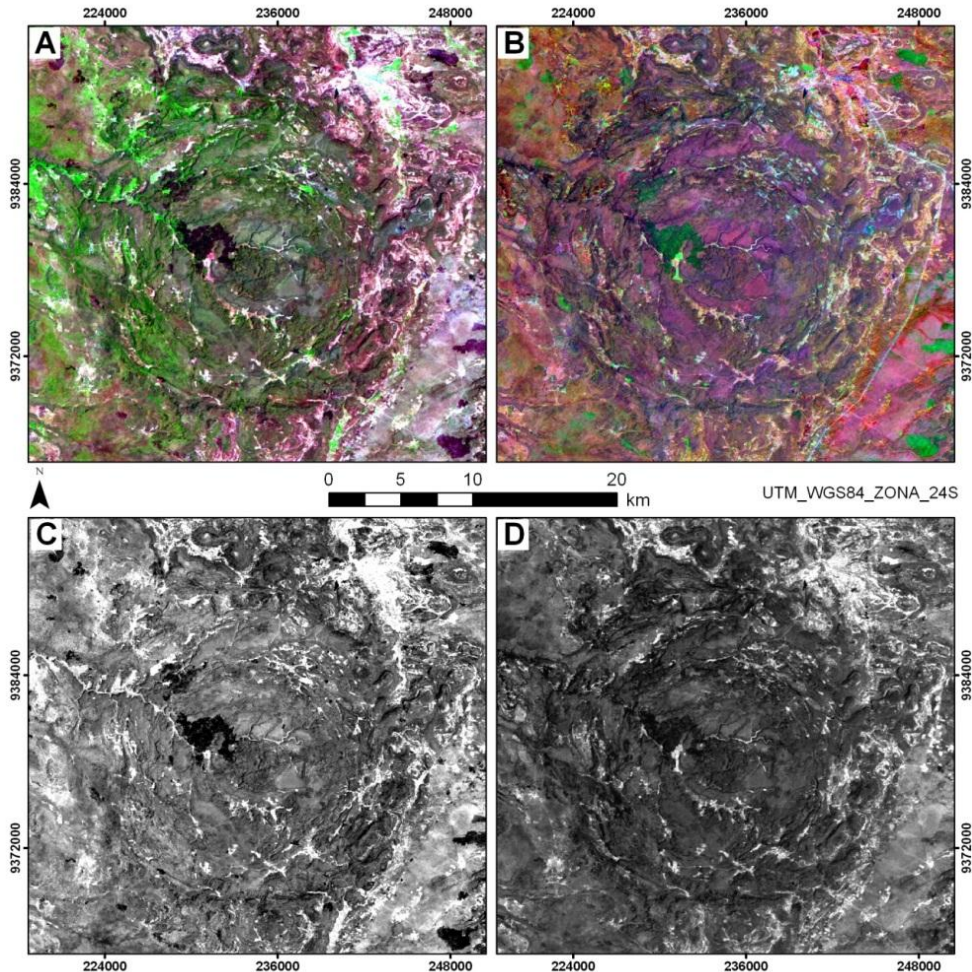


Figura 3. Imagens Landsat-5/TM mostrando a ECSMT. 3A - Composição colorida R(5), G(4), B(3); 3B - Composição colorida da subtração de bandas: R(5-7), G(5-1), B(3-1); 3C - Banda 4 em tons de cinza; e 3D - Primeira Componente Principal considerando as bandas TM1 a TM5 e TM7. Todas as imagens com aumento de contraste linear.

De modo geral, o relevo da borda leste da BSFP na região de São Miguel do Tapuío (PI) é caracterizado como apresentando largos e extensos compartimentos geomorfológicos alongados aproximadamente na direção N – S. Esses compartimentos são decorrentes do comportamento espacial dos estratos maiores da

porção estratigráfica inferior da BSFP, os quais apresentam, de um modo geral, mergulho suave ($< 10^\circ$) para oeste. A ECSMT situa-se a oeste das grandes *cuestas* regionais que ocorrem dispostas segundo a direção geral N-S e com altitudes máximas em torno de 700 m (Serra da Ibiapaba). Estas *cuestas* formam a borda oriental

da Bacia do Parnaíba ao longo do limite entre os Estados do Piauí e Ceará.

Nesse contexto, a ECSMT destaca-se proeminentemente na paisagem através de sua forma circular típica e um relevo cujas maiores altitudes situam-se em quase toda sua borda e porção central (figura 4). Em sua porção noroeste as altitudes elevadas são interrompidas pela

drenagem mais proeminente presente no domínio da ECSMT (Rio São Miguel e afluentes), a qual apresenta seus elementos com fluxo geral para oeste e parcialmente encaixados na estruturação circular do relevo. Aos grandes vales presentes nessa situação associam-se as mais baixas altitudes associadas à ECSMT.

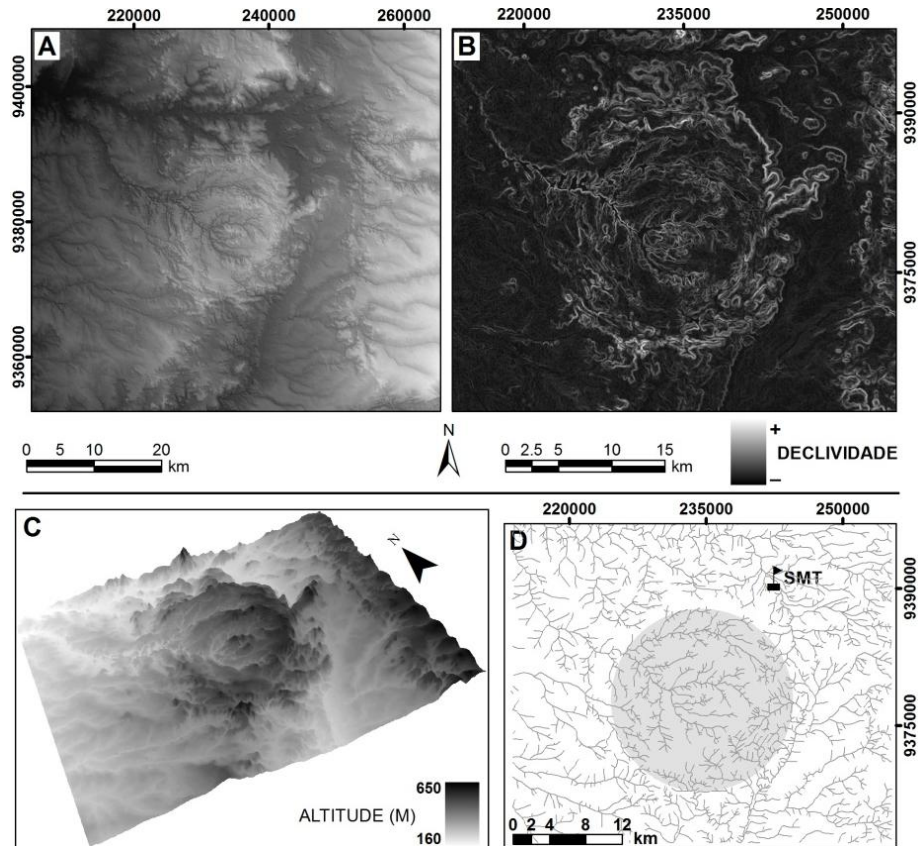


Figura 4. Relevo (SRTM) e drenagem associados à ECSMT. 4A - modelo digital de terreno sombreado; 4B - declividade (tons claros para declividade elevada, > 15 graus); 4C - relevo em perspectiva tridimensional; 4D - rede de drenagem com o limite externo da ECSMT.

Internamente à ECSMT, o caráter circular da estrutura é bem definido pela presença de escarpas íngremes (figura 4B) e depressões concêntricas. Na porção leste da estrutura, associadas às escarpas íngremes ocorrem elevações que ultrapassam os 500 m de altitude. Na porção central da estrutura a rede de drenagem é concêntrica, ocorrendo sob a forma de anéis incompletos definidos por drenagens com fluxo geral para oeste. A alternância de regiões portadoras de altitudes mais elevadas e regiões mais arrasadas onde ocorrem os maiores vales dentro da ECSMT, caracteriza uma

estruturação concêntrica aberta para noroeste devida à erosão acentuada causada pelo o Rio São Miguel e afluentes (figuras 3 e 4). Tal configuração, ao ser vista sob ângulo apropriado e em perspectiva tridimensional, mostra que a ECSMT como um todo caracteriza uma espécie de anfiteatro com abertura para noroeste (figura 4C).

Fora do domínio da ECSMT, o relevo assume sua forma regional típica, onde localmente as formas tabulares indicam a presença de estratos sub-horizontalizados com baixo mergulho para oeste. Tal feição pode ser bem observada na

região situada logo a nordeste da ECSMT (figura 4A). A leste da ECSMT observam-se claramente duas faixas com direção geral norte-sul, sendo uma mais a leste com altitudes elevadas (> 600 m) e outra mais a oeste com altitudes mais baixas. A transição entre essas duas faixas marca aproximadamente o limite oeste da Serra da Ibiapaba.

Ao redor da ECSMT, a rede de drenagem é caracterizada de um modo geral por um padrão dendrítico, observando-se ainda que em alguns locais o padrão pode ser classificado como treliça (figura 4D). Internamente à estrutura, um

padrão com uma tendência anelar incipiente é devido à presença de vales levemente sinuosos, boa parte controlados pelas escarpas subverticais dispostas em um padrão semicircular.

A estruturação da ECSMT impressa no relevo pode ser nitidamente observada através dos lineamentos de relevo negativos que foram observados e extraídos das imagens SRTM sombreadas. No mapa apresentado (figura 5), a densidade e disposição concêntrica de lineamentos no domínio da ECSMT são claras, bem como a ausência de tal padrão fora da estrutura.

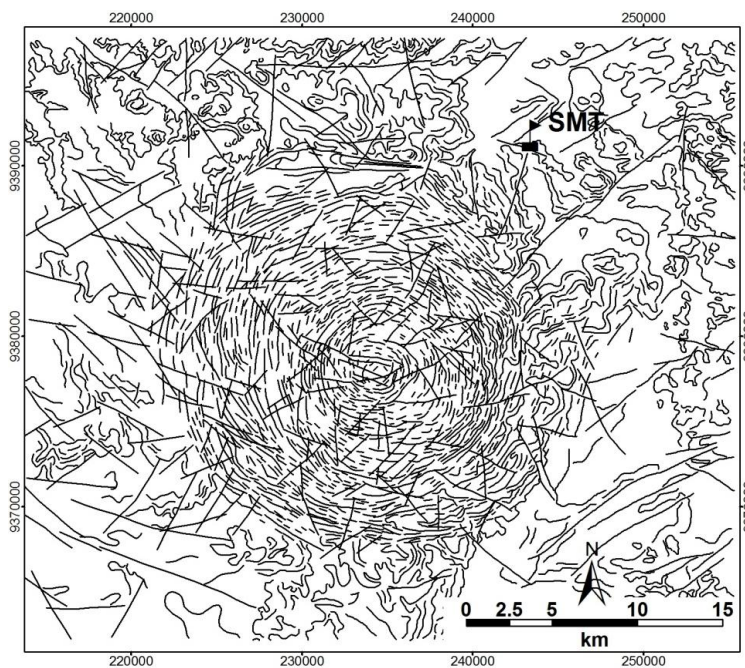


Figura 5. Lineamentos de relevo negativo extraídos das imagens SRTM sombreadas na região e adjacências da ECSMT.

Com base nos resultados oriundos dos estudos geológicos de campo e laboratoriais realizados por Martins (2011) e colaboradores, a ECSMT

foi dividida em quatro anéis concêntricos, denominados externo, intermediário, interno e central com núcleo soerguido (figura 6).

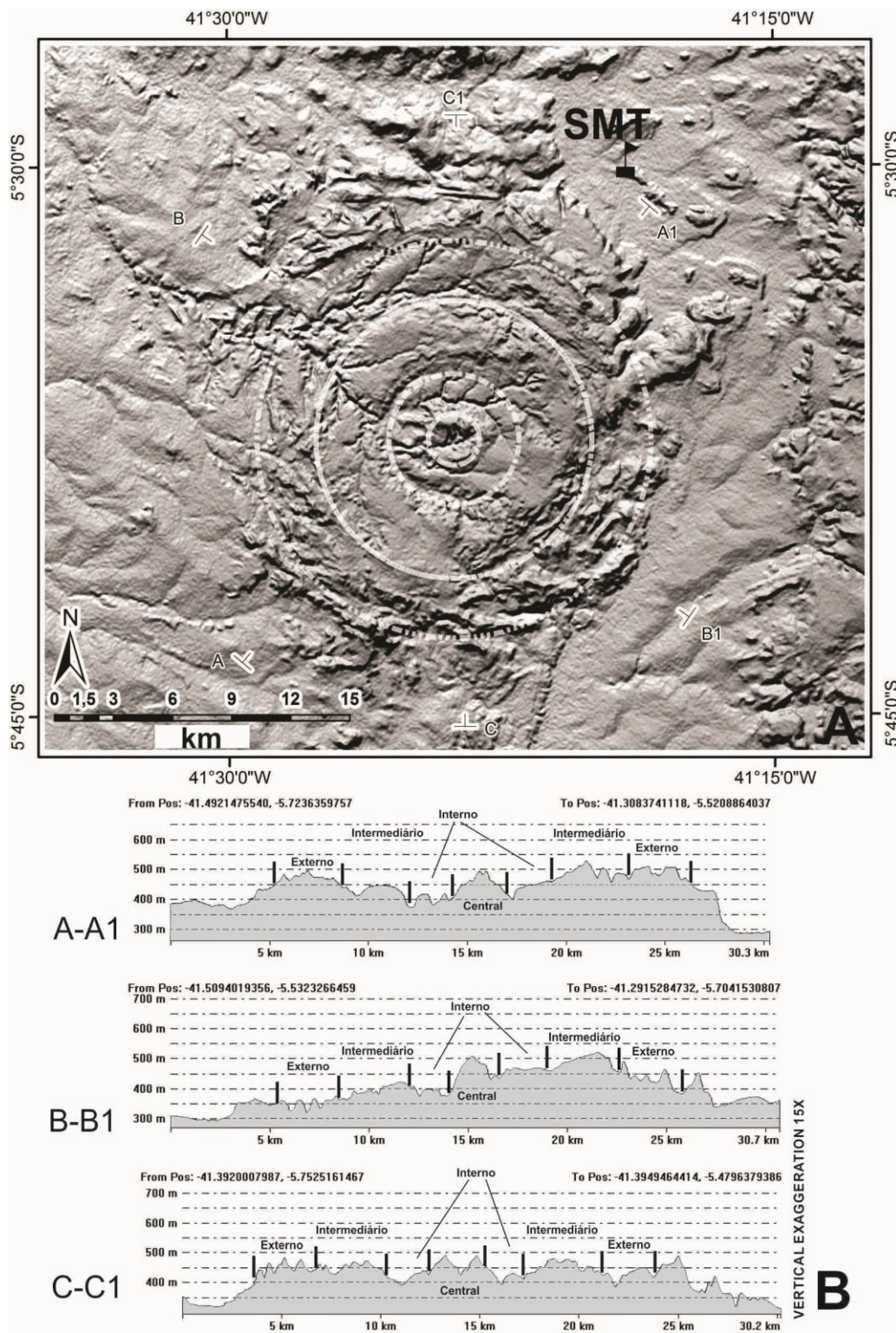


Figura 6. 6A - ECSMT, modelo digital de terreno sombreado (elevação 50 graus, azimute 180 graus) dos dados SRTM, compartimentação deformacional e térmica, marcação dos perfis topográficos. 6B - perfis topográficos com exaigero vertical de 15X, compartimentação deformacional e térmica.

Associado a tais anéis ocorre um zoneamento deformacional e de transformação térmica nos arenitos, crescente da borda para o centro da

estrutura. A compartimentação proposta está de acordo com a presença de quartzitos e porções brechadas que ocorrem restritas ao centro da

estrutura (Torquato, 1981). Considerando a relação entre as feições de relevo observadas (figuras 4, 6A e 6B), e a compartimentação em anéis concêntricos supracitada, os seguintes pontos relevantes podem ser ressaltados: **i)** a borda (anel externo) e o núcleo ocorrem levemente soerguidos em relação às porções intermediária e externa à estrutura, exceto na porção oeste-noroeste onde a borda apresenta-se arrasada pela erosão causada pelo Rio São Miguel e seus afluentes; **ii)** no anel intermediário, juntamente com porções do anel

externo, ocorrem as maiores altitudes registradas na estrutura, as quais estão próximas e em alguns casos ultrapassam os 500 m; **iii)** o desnível topográfico entre as maiores altitudes presentes no anel externo e as presentes nas regiões adjacentes à ECSMT é da ordem de 300 m (figura 6); **iv)** no anel intermediário estão presentes as maiores altitudes registradas no domínio da ECSMT, as quais estão em torno de 555 m; **v)** de modo geral, o limite entre anéis situam-se em depressões no relevo, em pequenos vales, bem ou pouco encaixados.

ESTRUTURAS CIRCULARES E SEMICIRCULARES DE ORIGENS EXÓGENA E ENDÓGENA

O presente capítulo apresenta uma breve síntese sobre as características morfológicas superficiais e diagnósticas de estruturas circulares e semicirculares geradas pela ação de processos geológicos exógenos (ECSCOEX) e endógenos (ECSCOEN). Por se tratar de uma breve síntese, o interesse maior dessa é expor e comparar características geomorfológicas de relevo considerando somente estruturas presentes no território nacional. Em um trabalho futuro pretende-se estender tal análise às estruturas com morfologia semelhante presentes em outras regiões do planeta.

Estruturas Exógenas (ECSCOEX)

Um astroblema representa o registro ("cicatriz") do impacto de bólidos celestes que ocorreram na superfície terrestre. A comprovação de um astroblema é feita através da identificação de determinadas características morfológicas, mineralógicas, litoestruturais e texturais geradas durante o impacto de um meteorito na superfície terrestre e subsequente passagem das ondas de choque pelas rochas impactadas (French, 1998; Koeberl, 2002). Dessas características, a literatura ressalta que somente a presença dos PDFs (*plannar*

deformation features) e cones de deformação (*shatter cones*) permitem caracterizar efetivamente a presença de um astroblema (Stöffler & Langenhorst, 1994; Grieve et al., 1996; French, 1998; McCall, 2009; French & Koeberl, 2010). Quanto à morfologia, dois tipos principais de estrutura de impacto são reconhecidos: simples e complexa. O segundo tipo caracteriza-se por apresentar as bordas soerguidas e principalmente também o núcleo soerguido.

Atualmente são reconhecidos na superfície terrestre aproximadamente 183 astroblemas (*Earth Impact Database*, 2011). Sete deles estão localizadas no Brasil (ver figura 1): Araguinha, Vargeão, Vista Alegre, Cerro do Jarau, Serra da Cangalha, Riachão e Santa Marta. Desses, Araguinha é o mais importante em termos dimensionais e foi a primeira estrutura da categoria identificada no território nacional.

As principais características destas estruturas, tais como localização, morfologia e feições de impacto observadas, encontram-se na tabela 1. As figuras 7 e 8 (A-F) apresentam o Modelo Digital de Elevação construído a partir dos dados SRTM para essas estruturas.

Tabela 1. Estruturas de impacto (ECSCOEX) do tipo complexa localizadas no território brasileiro e suas principais características.

Estrutura	Referência	Local	Litologias Impactadas	Diâmetro	Feições Características de Impacto Meteorítico
-----------	------------	-------	-----------------------	----------	--

Araguainha	<i>i, ii, iv, v, ix</i>	MT/ GO	Arenitos da Formação Furnas (Devoniano) e granitoides neoproterozoicos	~ 40 km	<i>Shatter cones</i> e feições planares de deformação (PDFs) em quartzo e feldspato. <i>Kink bands</i> em rochas pelíticas e micas, brechas de impacto. Morfologia superficial: circular com núcleo soerguido (embasamento exposto).
Cerro do Jarau	<i>viii, xi</i>	RS	Basaltos e arenitos mesozoicos da Bacia do Paraná.	~ 14 km	Brechas de impacto, brechas de injeção em arenitos e basaltos, PDFs em quartzo, feldspatos e piroxênios. Morfologia superficial circular e com núcleo soerguido.
Vargeão	<i>v, ix</i>	SC	Basaltos e arenitos mesozoicos da Bacia do Paraná	~ 12 km	Brechas de impacto, fusão parcial, <i>shatter cones</i> em arenitos e basaltos, PDFs. Morfologia superficial circular com núcleo soerguido.
Serra da Cangalha	<i>iii, ix</i>	TO	Rochas sedimentares psamíticas e pelíticas paleozoicas da Formação Poti (Bacia do Parnaíba)	~ 12 km	<i>Shatter cones</i> e brechas de impacto em metarenitos. PDFs e micro-fraturas em grãos de quartzo e outras feições planares de deformação (PFs, <i>feather features</i>). Morfologia superficial: circular com núcleo soerguido.
Vista Alegre	<i>iv, vii, ix</i>	PR	Basaltos e arenitos mesozoicos da Bacia do Paraná	~ 9,5 km	PDFs em quartzo, <i>shatter cones</i> , brechas de impacto em basaltos e metarenitos. Morfologia superficial: circular com núcleo soerguido.
Santa Marta	<i>xiv</i>	PI	Rochas sedimentares psamíticas e pelíticas paleozoicas da Bacia do Parnaíba	~ 9 km	PDFs em quartzo, PFs e <i>feather features</i> , <i>shatter cones</i> e brechas de impacto. Morfologia superficial: circular com núcleo soerguido.
Riachão	<i>ix, xii, xiii</i>	MA	Rochas sedimentares psamíticas e pelíticas paleozoicas da Bacia do Parnaíba	~ 4,5 km	Poucas feições de impacto. Presença de PDFs, lamelas de <i>Böhm</i> , <i>healed fractures</i> , <i>feather features</i> , fraturas planares (PF) e grãos extremamente fraturados. Morfologia superficial: circular com núcleo soerguido.

Fontes: (i) Crósta (1987), (ii) Crosta (2002), (iii) Reimold et al. (2006), (iv) Crósta et al. (2009), (v) Kazzuo-Vieira (2009), (vi) Crosta et al. (2010a), (vii) Crosta et al. (2010b), (viii) Phillip et al. (2010), (ix) *Earth Impact Database* (2011), (x) Kenkmann et al. (2011), (xi) Crosta (2012), (xii) Maziviero (2012), (xiii) Maziviero et al. (2012) e (xiv) Uchôa et al. (2013).

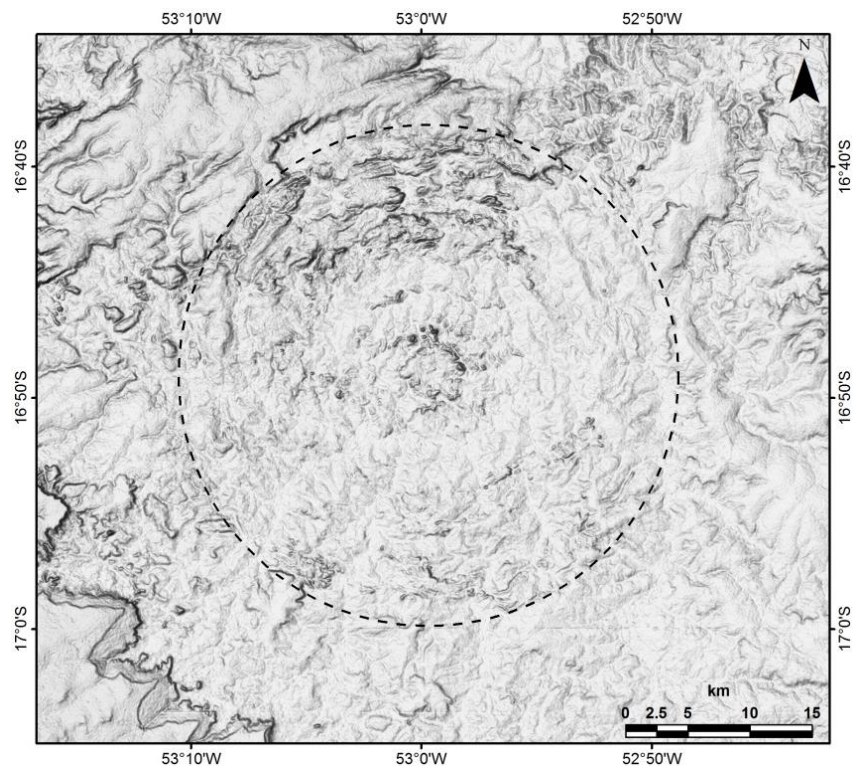


Figura 7. Modelo digital de terreno da estrutura de impacto de Araguinha (ECSCOEX), com cerca de 40 km de diâmetro e situada na divisa entre os Estados de Mato Grosso e Goiás. Topografia SRTM, sombreamento de 80° de inclinação para nordeste. As altitudes variam entre 370 e 900 m.

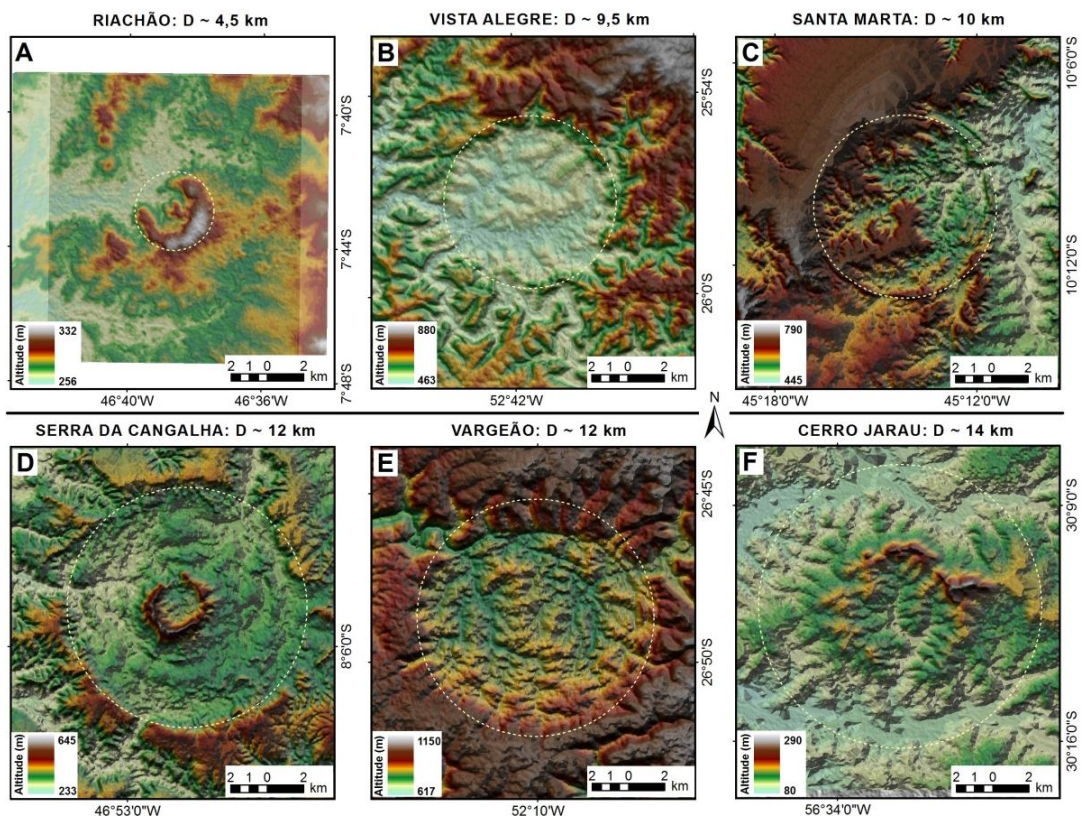


Figura 8. Modelo digital de terreno dos dados SRTM para as principais estruturas de impacto (ECSCOEX) brasileiras.

As estruturas de impacto comprovadas e melhor estudadas situam-se em bacias sedimentares fanerozoicas (figura 1). Três situam-se na Bacia do Parnaíba (Riachão, Serra da Cangalha e Santa Marta) e quatro situam-se na Bacia do Paraná (Vargeão, Vista Alegre, Araguainha e Cerro do Jarau). Para as estruturas mencionadas, as principais características podem ser destacadas: i) encontram-se em bacias sedimentares fanerozoicas, preferencialmente registradas em rochas areníticas e basálticas; ii) o diâmetro médio situa-se em torno de 10 km, entretanto fogem a tal regra as estruturas de Araguainha (ca. 40 km) e Riachão (ca. 4,5 km); iii) as estruturas são do tipo complexo, apresentando núcleo soerguido. No caso de Araguainha o soerguimento expressivo da porção central possibilitou a exposição das rochas do embasamento; iv) a gênese exógena das estruturas foi devidamente comprovada através da identificação das feições diagnósticas de impacto, tais como *shatter cones*, PDFs, brechas de impacto e presença de morfologia circular do tipo complexo; v) em todos os casos o caráter circular da estrutura é bem marcado no relevo, notadamente bem definido nos casos de Vargeão, Serra da Cangalha e Araguainha (figuras 7 e 8); Em todos os casos, tal caráter pode ser observado pela alternância irregular a regular de cristas e vales presentes no domínio espacial de cada estrutura; vi) o padrão de drenagem apresenta-se na maioria dos casos próximo de anelar, característica essa que ocorre mais claramente no caso das estruturas de Vargeão e Serra da Cangalha.

Estruturas Endógenas (ECSCOEN)

Estruturas circulares e semicirculares de origem endógena são conhecidas tanto em bacias sedimentares fanerozoicas como no domínio do embasamento cristalino mais antigo. Nessas situações, tais estruturas ocorrem impressas no relevo com diferentes intensidades. A tabela 2 traz uma síntese das principais características das estruturas de origem endógena presente no território brasileiro, representadas pelas estruturas de Poços de Caldas, Catalão, Tapira, Caldas Novas, Monte Alegre, Lages, Pitanga,

Quatiguá, Serra Negra e Araxá. Três categorias principais de estruturas podem ser identificadas: i) presentes no embasamento pré-ordoviciano, com ou sem magmatismo máfico e/ou alcalino associado; ii) estruturas presentes em bacias fanerozoicas e associadas a magmatismo máfico e/ou alcalino; iii) presentes em bacias fanerozoicas sem magmatismo associado.

As estruturas circulares e semicirculares registradas nas rochas do embasamento podem ser decorrentes de processos geológicos endógenos fanerozoicos ou mais antigos. Entretanto, são as estruturas de idade fanerozoica que geralmente encontram-se melhor registradas no relevo, tal como observado no relevo associado às estruturas de Poços de Caldas, Serra Negra, Tapira e Catalão (figura 9). Nessas três estruturas, o relevo pode ser descrito em termos das seguintes situações:

a) relevo acidentado, com a estrutura sendo nitidamente marcada por um conjunto de cristas e vales regionais situados na borda da estrutura (Poços de Caldas); b) presença de vales e cristas em um padrão concêntrico envolvendo uma porção central com relevo plano associado a coberturas lateríticas (Serra Negra); c) relevo plano (platô) envolto por uma estreita faixa de relevo acidentado (Caldas Novas). A forma das estruturas é semicircular a elipsoidal, com a estrutura de Caldas Novas apresentando forma elipsoidal marcante (figura 9B).

O comprimento do eixo maior das estruturas encontra-se entre 8 e 16 km, exceto para a estrutura de Poços de Caldas, a qual apresenta quase 40 km no seu eixo maior. Com exceção da estrutura de Caldas Novas, todas as demais apresentam ocorrências de rochas ígneas máficas e/ou alcalinas geradas e intrudidas durante o evento tectonotermal mesozoico que reativou a Plataforma Sul-Americana para a instalação do Oceano Atlântico Sul. Na estrutura de Caldas Novas não são conhecidas rochas ígneas em superfície, mas esta encontra-se associada a importante fluxo de águas geotermiais. A estrutura de Caldas Novas situa-se a cerca de uma centena de quilômetros a noroeste da estrutura de Catalão, no mesmo *trend* estrutural NW-SE que também contem as estruturas de

Tapira, Serra Negra e Salitre, caracterizando assim a Província Ígnea do Alto Paranaíba, uma vasta região que no Cretáceo foi intensamente

afetada pelos estágios tardios do evento tectonotermal responsável pela abertura do Oceano Atlântico Sul.

Tabela 2. Características de algumas das principais estruturas circulares e semicirculares de origem endógena (ECSCOEN) presentes no território brasileiro.

Estrutura	Tipo	Referência	Local	Registro	Diâmetro	Características e gênese
Monte Alegre	Alto Estrutural	<i>i, x, xv</i>	PA	Rochas devonianas da Bacia do Amazonas	~ 30 km	Forma elíptica, estrutura dômica. Hipóteses genéticas: i) braquianticlinal resultante da manifestação ígnea mesozoica máfica de um possível lacólito não aflorante; ii) braquianticlinal resultante de um padrão de interferência regional.
Lages	Alto Estrutural	<i>ii, viii, ix</i>	SC	Rochas paleozoicas da Bacia do Paraná	~ 23 km	Estrutura dômica semicircular associada a intrusões alcalinas na Bacia do Paraná durante o Cretáceo Superior.
Quatiguá	Alto Estrutural	<i>iv</i>	PR	Rochas paleozoicas da Bacia do Amazonas	~ 8 km	Forma concêntrica incipiente, com gênese provável atribuída ao efeito cumulativo de eventos tectônicos que afetaram as unidades carboníferas e permianas da bacia do Paraná durante o Mesozoico, possivelmente através da reativação de paleolineamentos presentes no embasamento da bacia.
Pitanga	Alto Estrutural	<i>xiii, xiv</i>	SP	Rochas paleozoicas (BP)	~ 25 km	Forma irregular ("elipsoidal"), com eixo maior alongado na direção NNE-SSW, provavelmente decorrente de tectônica transcorrente cenozoica.
Tapira	Complexo Alcalino	<i>xii, xvii</i>	MG	Rochas metassedimentares meso a neoproterozoicas	~ 11 km	Forma circular, associada a intrusão de complexo magmático ultramáfico-alcalino do Cretáceo Superior em rochas metassedimentares proterozoicas.
Catalão	Complexo Alcalino	<i>xi, xvi, xviii</i>	GO	Rochas metassedimentares meso a neoproterozoicas	~ 8 km	Forma aproximadamente circular, associada à intrusão de complexo magmático ultramáfico-alcalino do Cretáceo Superior em rochas metassedimentares proterozoicas.
Araxá	Complexo Alcalino	<i>xvii</i>	MG	Rochas metassedimentares meso a neoproterozoicas	~ 10 km	Forma circular, associada à intrusão de complexo magmático ultramáfico-alcalino do Cretáceo Superior em rochas metassedimentares proterozoicas.
Caldas Novas	Complexo Alcalino não aflorante (?)	<i>vii</i>	GO	Rochas metassedimentares meso a neoproterozoicas	~ 13 km	Forma elíptica, com provável origem associada a dois eventos tectônicos: i) tectônica formadora - Ciclo Brasiliano; ii) tectônica modificadora - reativação da Plataforma Sul-Americana no Mesozoico. Presença de águas termais anômalas e sem manifestação de magmatismo

						associado na superfície.
Domo de Serra Negra	Complexo Alcalino	<i>iii</i>	MG	Rochas metassedimentares meso a neoproterozoicas	~ 16 km	Forma aproximadamente circular, associada à intrusão de complexo magmático ultramáfico-alcalino do Cretáceo Superior em rochas metassedimentares proterozoicas.
Maciço Alcalino de Poços de Caldas	Complexo Alcalino	<i>v, vi, viii</i>	MG/SP	Rochas metamórficas gnáissicas neoproterozoicas	~ 38 km	Estrutura semicircular a levemente elipsoide que ocupa uma área com cerca de 800 km ² . Gênese associada ao desenvolvimento de uma gigantesca caldeira vulcânica no Cretáceo Superior. Magmatismo alcalino e fontes termais anômalas associados.

Fontes: (i) Montalvão & Oliveira (1975), (ii) Scheibe (1986); (iii) Mariano et al. (1991); (iv) Rostirolla et al. (2000); (v) Slavec et al. (2004); (vi) Ulbrich et al. (2005), (vii) Campos et al. (2005); (viii) Riccomini et al. (2005); (ix) Roldan et al. (2010); (x) Figueira (2011); (xi) Ribeiro (2008); (xii) Melo (1997); (xiii) Sousa (2002); (xiv) Siqueira (2011); (xv) Almeida & Pinheiro (2007); (xvi) Cordeiro (2009); (xvii) Brod et al. (inédito); (xviii) Brod et al. (2005). Diâmetros assinalados em função do eixo maior das estruturas.

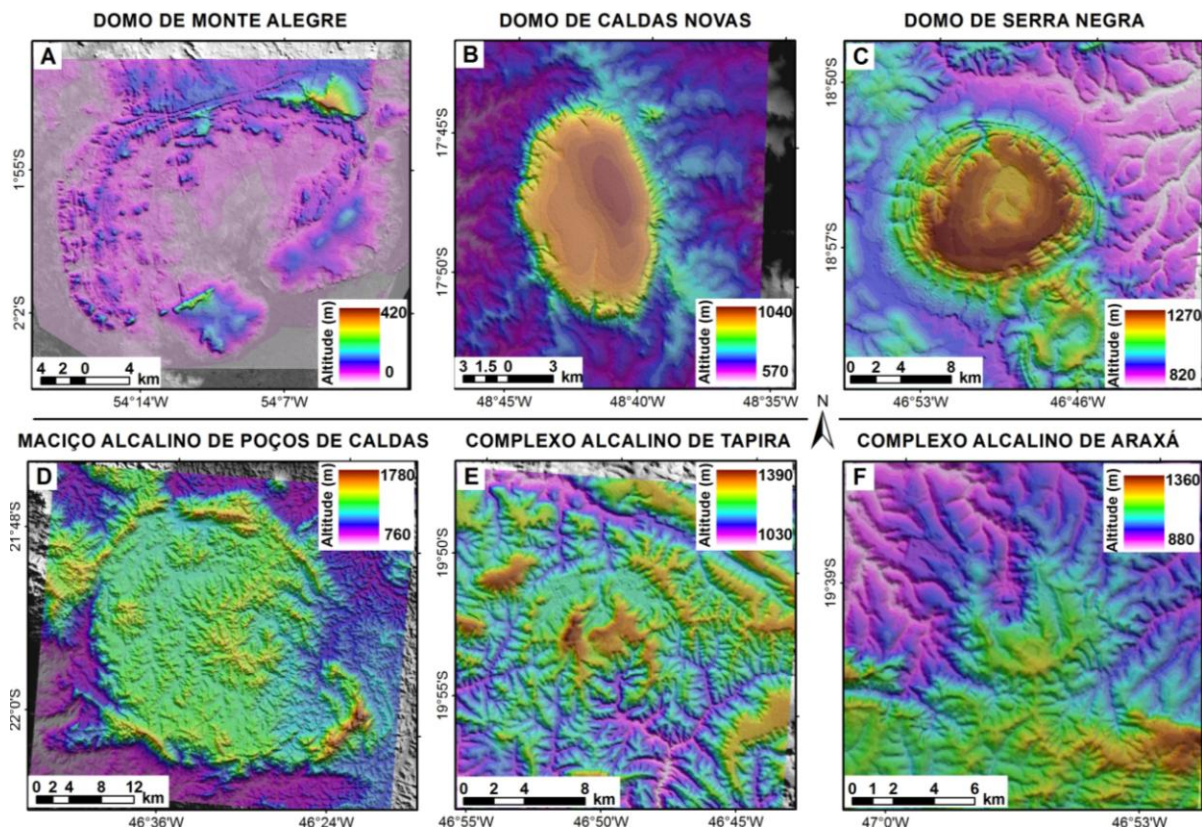


Figura 9. Modelo digital de terreno dos dados SRTM para algumas estruturas circulares de origem endógena (ECSCOEN) abordadas nesse trabalho.

Estruturas circulares a semicirculares com magmatismo associado e presentes nas bacias fanerozoicas brasileiras são raras, sendo o Alto Estrutural de Lages no Estado de Santa Catarina o único caso conhecido com magmatismo alcalino associado. O Domo de Lages apresenta

caráter semicircular a levemente elipsoidal, apresenta cerca de 38 km em seu eixo maior NW-SE e encontra-se bem marcada na cartografia geológica através da disposição concêntrica irregular das unidades estratigráficas permianas e mesozoicas que ocorrem na região.

Esse padrão estrutural é fracamente observado no relevo, limitando-se à orientação incipiente de algumas cristas e vales maiores situados nas porções norte e noroeste da estrutura. Ao contrário do Alto Estrutural de Lages, o Alto Estrutural de Monte Alegre ocorre nitidamente impresso no relevo aparecendo como uma estrutura com formato elipsoidal com cerca de aproximadamente 30 km em seu eixo maior orientado na direção NE-SW (figura 9A). A estrutura é marcada por um relevo acidentado na proximidade das bordas e plano arrasado na sua porção central. O limite SE da estrutura é marcado por um importante lineamento de relevo negativo que ocorre associado a uma falha subvertical de direção geral N60E. Como o Domo de Lages, o Alto Estrutural de Monte Alegre é um exemplo clássico de janela estratigráfica, uma vez que expõe em seu interior um conjunto de rochas devonianas quase concentricamente circundadas por rochas carboníferas. A estrutura é de caráter endógeno e na literatura sua gênese tem sido discutida em

termos de duas possibilidades: a) tectônica com magmatismo associado no Mesozoico durante a abertura do Oceano Atlântico Equatorial; e b) formação de braquianticlinal resultante de um padrão de interferência regional de esforços.

As estruturas semicirculares decorrentes da reativação de antigas estruturas do embasamento sem magmatismo associado são as que menos apresentam expressão no relevo e via de regra são identificadas quase que exclusivamente através da presença de janelas estratigráficas em bacias sedimentares. Os altos estruturais de Quatiguá (PR) e Pitanga (SP) representam exemplos clássicos de estruturas pertencentes à categoria em questão. Essas duas estruturas endógenas são interpretadas como resultantes da reativação, sob regimes transpressivo e transtrativo, de paleolineamentos regionais presentes no embasamento da Bacia do Paraná. Em ambos os casos o interior das janelas estratigráficas é caracterizado pela presença de rochas de idade permiana inferior no centro da estrutura.

DISCUSSÃO

A expressão morfológica superficial no relevo tem sido bastante importante na definição morfológica, dimensional e mesmo genética das estruturas circulares e semicirculares. Via de regra, tal expressão quase sempre representa o primeiro elemento identificável que denuncia a presença de uma estrutura. Nesse contexto, a forma, com um certo grau de incerteza, pode ser usada como critério distintivo na caracterização das ECSCOEX e ECSCOEN. A dimensão das estruturas (diâmetro) de ambas as categorias não pode ser utilizada diretamente na categorização, uma vez que ambas as categorias comportam estruturas com diâmetros parecidos. Entretanto, algumas diferenças marcantes merecem ser ressaltadas: i) nas ECSCOEX foi encontrado o menor diâmetro, da ordem de 4,5 km associado à estrutura de Riachão no Maranhão; ii) os diâmetros encontrados podem ser agrupados em três grupos distintos em cada categoria, sendo esses: 8 a 16 km, 23 a 25 km e 30 a 38 km

(ECSCOEN) e ~ 4,5 km, 9 a 14 km e ~ 40 km (ECSCOEX).

Em termos morfológicos as ECSCOEX tendem a apresentar forma circular claramente desenvolvida, a qual ocorre impressa no relevo e rede de drenagem. O relevo, além de ocorrer com formato circular bem definido, apresenta altitudes mais elevadas na borda e porção central das estruturas, com tal feição sendo usada para caracterizar as ECSCOEX do tipo complexa, portadoras de borda e núcleo soerguidos. Nas ECSCOEX a rede de drenagem geralmente exhibe formato anelar, o qual pode ser observado nos elementos de drenagem maiores presentes no domínio das estruturas. As características morfológicas de relevo descritas foram observadas no relevo associado à ECSMT, o que permite, se forem consideradas apenas as características em questão, caracterizar a ECSMT como do tipo ECSCOEX.

A morfologia superficial do relevo associado às ECSCOEN varia entre elipsoidal a

semicircular. Considerando esses dois casos, a forma elipsoidal é claramente observada na estrutura de Caldas Novas e a forma semicircular na estrutura associada ao Complexo Alcalino Serra Negra. O relevo associado às ECSCOEN é de dois tipos principais: i) acidentado e sem forma clara definida na porção interna, orientado e definindo o padrão semicircular em todo ou em parte do contorno da estrutura (casos dos complexos alcalinos de Poços de Caldas e Lages); ii) intensamente plano na porção interna (associado à superfícies lateríticas bem desenvolvidas) e acidentado definindo muito bem o contorno e a forma circular ou ovalada da estrutura, (Domo de Monte Alegre, Complexo Alcalino de Serra Negra e estrutura de Caldas Novas). No caso das ECSCOEN com expressão semicircular ou circular mais marcante, a rede de drenagem define duas situações distintas: i) alta densidade e sem orientação específica na parte interior, mas bem orientada e marcando muito bem a periferia e o limite externo da estrutura (Poços de Caldas e Lages); ii) baixa densidade e sem orientação específica na porção interna, mas com densidade elevada e marcando muito bem a periferia e limites externos da estrutura (Monte Alegre, Caldas Novas e Serra Negra).

A morfologia superficial constitui uma característica importante das estruturas circulares e semicirculares estudadas, mas sozinha não consegue enquadrar geneticamente uma dada estrutura nas categorias ECSCOEN e ECSCOEX. Tal enquadramento somente é possível quando feições diagnósticas de ambas as categorias são identificadas. No caso das ECSCOEN, a presença de rochas ígneas associadas, aflorantes e/ou em subsuperfície no domínio da estrutura constitui a feição diagnóstica mais marcante dessa categoria. Poços de Caldas, Lages, Tapira, Catalão, Araxá e Serra Negra representam situações onde as rochas ígneas associadas à gênese da estrutura afloram, tornando a caracterização genética relativamente

simples. Em casos mais complexos as rochas ígneas associadas à gênese da estrutura não afloram, mas ocorrem próximas e/ou podem ser detectadas através de dados geofísicos potenciais. Esse é o caso das estruturas de Monte Alegre e Caldas Novas. Essa última situa-se no *trend* regional N40-50W no qual ocorrem uma série de complexos alcalinos de idade Mesozoica, característica que possibilita enquadrá-la na categoria ECSCOEN. É importante ressaltar que, com exceção das estruturas associadas à reativação de antigas estruturas do embasamento das bacias paleozoicas (Quatiguá e Pitanga), as demais estruturas do tipo ECSCOEN estudadas tem sua gênese ligada à reativação da Plataforma Sul-Americana no Mesozoico durante a abertura do Oceano Atlântico.

No caso das ECSCOEX, a literatura aponta que somente determinadas feições estruturais (*shatter cones*) e texturais (principalmente PDFs - *planar deformational features*), geradas unicamente por um choque meteorítico com a superfície terrestre, podem ser efetivamente utilizadas na caracterização destas estruturas. Tais feições diagnósticas foram seguramente identificadas em todas as estruturas tratadas nesse estudo, exceto para a ECSMT. Entretanto, segundo Martins (2011) e Castro et al. (*no prelo*), as seguintes características permitem enquadrar a ECSMT na categoria ECSCOEX: i) o padrão deformacional e metamórfico crescente em direção ao centro da estrutura, característica anteriormente observada por Torquato (1981); ii) presença na região central da estrutura de meta-arenitos brechados e soldados, padrão de fraturamento dos arenitos com forma cônica incipiente (*pseudo shatter-cones* ?) e microfraturas em grãos de quartzo (PFs); iii) relevo indicativo de bordas e núcleo soerguidos; iv) ausência de anomalias geofísicas potenciais (magnetometria e gravimetria) indicativas da presença de rochas ígneas não aflorantes associadas à estrutura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização da morfologia superficial da estrutura com base principalmente em dados

topográficos SRTM propiciou: i) delinear um diâmetro com cerca de 20 km e a presença de um

padrão estrutural circular marcante; ii) a estrutura é praticamente simétrica; iii) as bordas e a porção central (núcleo) são soerguidos topograficamente em relação à porção intermediária; iv) no domínio da estrutura a estruturação deformacional circular encontra-se impressa no relevo de forma marcante; v) as características do relevo podem, com algum grau de compatibilidade, serem correlacionadas com os compartimentos deformacionais e de transformação térmica definidos pelos estudos de campo e petrográficos realizados por Martins (2011).

O levantamento e comparação das características morfológicas e geológicas associadas às estruturas circulares e semicirculares de origem endógena (ECSCOEN) e exógena (ECSCOEX) presentes no território brasileiro permitiram estabelecer: i) ECSCOEN: raramente possuem morfologia superficial circular perfeita. Os diâmetros estão entre 8 e 38 km (média de ~ 18 km). Invariavelmente ocorrem direta ou indiretamente associadas à

complexos ígneos gerados e alojados durante o evento tectono-termal mesozoico responsável pela abertura do Oceano Atlântico Sul; ii) ECSCOEX (astroblemas): apresentam morfologia superficial circular perfeita, diâmetros entre 4,5 e 40 km (média de 10 km sem considerar a estrutura de Araguinha com 40 km de diâmetro) e são do tipo complexa (núcleo e bordas soerguidas).

As características morfológicas superficiais apresentadas pela ECSMT são mais compatíveis com as apresentadas pelas estruturas pertencentes à categoria ECSCOEX. Apesar das feições texturais, estruturais e de transformação térmica presentes na ECSMT serem apenas sugestivas para classificá-la como dessa categoria, a morfologia superficial e a não identificação de rochas ígneas associadas aflorantes e/ou em subsuperfície (tal como mostrado pela análise de dados geofísicos potenciais), não permitem, por outro lado, enquadrá-la na categoria ECSCOEN.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do Laboratório de Geofísica de Prospecção e Sensoriamento Remoto (LGPSR), da Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC), do Programa de Pós-graduação do Departamento de Geologia (DEGEO) e da Prefeitura Municipal de São Miguel do Tapuio – Piauí.

REFERÊNCIAS

1. AGUIAR, G.A. Bacia do Maranhão: Geologia e possibilidades de petróleo. Belém, Petrobrás. Relatório interno. 1969.
2. ALMEIDA, F.F.M.; CARNEIRO, C.D.R.; MACHADO JR., D.L.; DEHIRA, L.K. Magmatismo pós-paleozoico do Nordeste Oriental do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, 18(4):451-462. 1988.
3. ALMEIDA, C. & PINHEIRO, R.V.L. O Papel das Falhas na História Tectônica do Domo de Monte Alegre, Bacia do Médio Amazonas, PA. In: PDPETRO, 4, **Anais**. Campinas, SP, pg. 01 a 08. 2007.
4. AMARAL, G.; CORDANI, U.G.; KAWASHITI, K.; REYNOLDS, J.H. Potassium-argon dates of basaltic rocks from southern Brazil. **Geochina Cosmochim Acta** 30:159-189. 1966.
5. BIZZI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG. CPRM, Brasília, 641 p. 2003.
6. BROD, J.A. *et al.* (inédito) Excursão 1. Geologia e mineralizações dos Complexos Alcalino-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba. Descrições e roteiro de excursão, 29 p.
7. BROD, J.A. Petrologia e geoquímica do complexo de Tapira, estado de Minas Gerais. 1999. 486 f. **Dissertação (Doutorado em Geologia)** – University of Durham, United Kingdom, 1999.
8. BROD, J.A.; BARBOSA, E.S.R.; JUNUQIRA-BROD, T.C.; GASPARG, J.C.; DINIZ-PINTO, H.S.; SGARBI, P.B.A.; PETRINOVIC, I.A. The Late-Cretaceous Goiás Alkaline Province (GAP), Central Brazil. In: Comin-Chiaramonti, P. & Barros Gomes, C. Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Plateform. **EDUSP**, p.261-316. 2005.
9. CAMPOS, J.E.G.; TROGER, U.; HAESBAERT, F.F. Águas Quentes de Caldas Novas, GO - Notável ocorrência de águas termais sem associação com magmatismo. In: Winge, M.; Schobbenhaus, C.; Berbert-Born, M.; Queiroz, E.T.; Campos, D.A.; Souza, C.R.G. ; Fernandes, A.C.S. **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Publicado 20/6/2005 <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio113/pdf>. 2005.
10. CASTELO BRANCO, R.M.G. **Étude géologique et géophysique de quelques structures circulaires (Kimberlites, astroblèmes) du Nord et du Nord-Est du Brésil**. Thèse de Doctorat. Université de Nantes-france. 388 p. 1994.

11. CASTELO BRANCO, R.M.G.; DE CASTRO, D.L.; CUNHA, L.S. Geological, geophysical, and imaging data of São Miguel do Tapuio (SMT) astrobleme, Brazil: **Meteoritics & Planetary Science**, v. 39, supplement, p. A61. 2004.
12. CASTRO, N.A.; MARTINS, J.A.; DIAS, A.N.C.; TELLO, C.A.; GANADE de ARAUJO, C.E.; CASTELO BRANCO, R.M.G. (no prelo) São Miguel do Tapuio Circular Structure, Piauí-BR: morphology, geology, fission track ages and probable genesis.
13. CORDEIRO, P.F.O. **Petrologia e metalogenia do depósito primário de nióbio do Complexo Carbonatítico-foscorítico de Catalão - GO**. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 140 p. 2009.
14. CORREIA FILHO, F.L. Mapa geológico do Estado do Piauí / Escala original do mapa 1:1.000.000 - 2º versão, Coordenação de Geologia - Francisco L. Correia Filho, CPRM Teresina – Piauí. 2006.
15. CRÓSTA, A.P. Estruturas de impacto no Brasil: uma síntese do conhecimento atual. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 32, Salvador, 4, Anais, pp. 1372-1377. 1982.
16. CRÓSTA, A.P. Impact structures in Brazil. In: J. Pohl (ed.) **Research in Terrestrial Impact Structures**. Wiesbaden, Vieweg & Sohn, 30-38. 1987.
17. CRÓSTA, A.P. 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**. Vol. 1. Brasília, DNPM/CPRM/SIGEP. p. 531-540. 2002.
18. CRÓSTA, A.P.; KOEBERL, C.; JALUFKA, D. Shatter cones confirm the Vista Alegre meteorite impact structure in the Paraná flood basalt province, southern Brazil (abstract). **Geological Society of America Abstracts with Programs** 41:532. 2009.
19. CRÓSTA, A.P.; LOURENÇO, F.S.; PRIEBE, G.H. Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul: A possible new impact structure in southern Brazil. In: Gibson, R.L.; e Reimold, W.U. (Eds.). **Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV: Geological Society of America**, Special Paper, 465:173-190. 2010a.
20. CRÓSTA A.P., KOEBERL, C., FURUIE, R.A., KAZZUO-VIEIRA, C. Vista Alegre, southern Brazil: a new impact structure in the Paraná flood basalts. **Meteoritics, Planetary Science**, 45:181-194. 2010b.
21. CRÓSTA, A.P. Estruturas de impacto e astroblemas brasileiros. In: Hasuy, I. et al. **Geologia do Brasil**, BECA Ed., p. 673-709. 2012.
22. DRURY, S.A. Image interpretation in geology. Blackwell, 2004.
23. EARTH IMPACT DATABASE. The crater inventory. planetary and space science centre - University of New Brunswick. Disponível em: <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/essay.html>. 2011. Acesso em: janeiro de 2014.
24. FIGUEIRA, I.F.R. **Tectônica deformadora do domo de Monte Alegre – Pará**. Tese de Doutorado – UFPR, Curitiba, 150 f – 2011.
25. FRENCH, B.M. & KOEBERL, C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. **Earth-Science Reviews** 98. 123–170p. 2010.
26. FRENCH, B.M. Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock- metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution No. 954, **Lunar and Planetary Institute**, Houston. 120 pp. 1998.
27. GÓES, A.M. & FEIJÓ, F.J. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v.8,p.57-67.1994.
28. GRIEVE, R.A.F.; LANGENHORST, F.; STOFFLER, D. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: II. Significance in geoscience. **Meteoritics & Planetary Science** 31, 6–35. 1996.
29. KAZZUO-VIEIRA, C. **Caracterização geológica e geofísica da estrutura de impacto Domo de Vargeão, SC**. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 142 p. + anexos. 2009.
30. KENKMANN, T.; VASCONCELOS, M.A.R.; CRÓSTA, A.P.; & REIMOLD, W.U. The complex impact structure Serra da Cangalha, Tocantins State, Brazil. **Meteoritics & Planetary Science** 46:875–889. 2011.
31. KOEBERL, C. Mineralogical and geochemical aspects of impact craters. **Mineralogical Magazine**, 66:745-768. 2002.
32. LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, New York, 750p. 1994.
33. LIMA, M.I.C. Potencialidades das imagens de Radar em mapeamentos geológicos. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30. Recife. **Anais**, Vol. 1, pp. 164-178. 1978.
34. MACDONALD, W.; CRÓSTA, A.P.; FRANÇOLIN, J. Structural dome at São Miguel do Tapuio, Piauí, Brazil: **Meteoritics & Planetary Science**, v. 41, supplement, p. A-110. 2006.
35. MARIANO, A.N. & MARCHETO, M. Serra Negra and Salitre carbonatite alkaline igneous complex. In: Leonardos, O.H.; Meyer, H.O.A.; Gaspar, J.C. (eds.) 5th Intern. Kimb. Conf. (Field Guide Book). Araxá, CPRM, Sp. Publ. 3/91, p. 75-79. 1991.
36. MARTINS, J.A. **Geologia da estrutura circular de São Miguel do Tapuio – Piauí**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE. 122 p. 2011.
37. MAZIVIERO, M.V. **Caracterização geológica da estrutura de impacto de Riachão, MA**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas. São Paulo, SP. 136 p. 2012.
38. MAZIVIERO, M.V., VASCONCELOS, M.A.R., GÓES, A.M., CRÓSTA, A.P., REIMOLD, U.W. The Riachão Ring Impact Structure, Northeastern Brazil: Re-Evaluation of its Stratigraphy and Evidence for Impact. 43rd **Lunar and Planetary Science Conference** 2012. Mar. 18-23, 2012.
39. McCALL, G.J. Half a century of progress in research on terrestrial impact structures: A review. **Earth Science Reviews**, 92:99-116. 2009.
40. MELO, M.T.V. Depósito de fosfato, titânio e nióbio de Tapira, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C; Queiroz, E. T; Coelho, C. E. S. Principais depósitos minerais do Brasil, vol. IV(C). Brasília: DNPM/CPRM, p. 41-55. 1997.
41. MIZUSAKI, A.M.P. & THOMAZ FILHO, A. O Magmatismo Pós-Paleozóico no Brasil. In: Mantesso-Neto, V. et al. (ed.) **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, cap. XVII, São Paulo, Beca, 647p. 2004.
42. MONTALVÃO, R.M.G. & OLIVEIRA, A.S. Geologia Branquianticlinal de Monte Alegre e da Rodovia Monte Alegre – Prainha. Belém, **Projeto RADAMBRASIL**, Folha SA.21, DNPM, 409p. 1975.
43. NUNES, A.B.; LIMA, R.F.F.; FILHO, C.N.B. Geologia da folha SB-23 (Teresina) e parte da folha SB-24 (Jaguaribe). **Projeto RADAM – Levantamento de recursos naturais**, Vol. 2. 1973.

44. PHILIPP, R.P.; ROLIM, S.B.A.; SOMMER, C.A.; SOUSA FILHO, C.R.; LISBOA, N.A. A estrutura de impacto do Cerro do Jarau, Quaraí, RS - **Revista Brasileira de Geociências**, 40(4): 468-483. 2010.
45. REIMOLD, W.U.; COOPER, G.R.J.; ROMANO, R.; COWAN, D.R.; KOEBERL, C. Investigation of Shuttle Radar Topography Mission data of the possible impact structure at Serra da Cangalha, Brazil. **Meteoritics & Planetary Science** 41, Nr 2, 237-246. 2006.
46. RIBEIRO, C.C. **Geologia, geometalurgia, controles e gênese dos depósitos de enxofre, terras raras e titânio do Complexo Carbonatítico Catalão I, GO**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 450 p. 2008.
47. RICCOMINI, C.; VELÁZQUEZ, V.F.; GOMES, C.B. Tectonic controls of the Mesozoic and Cenozoic alkaline magmatism in central-southeastern Brazilian Platform. In: Gomes, C.B.; Comin-Chiaromonte, P. Mesozoic to Cenozoic alkaline magmatism in the Brazilian Platform. São Paulo: EDUSP-FAPESP, p. 31-55. 2005.
48. ROLDAN, L.F.; MACHADO, R.; STEINER, S.S.; WARREN, L.V. Análise de Lineamentos Estruturais no Domo de Lages (SC) com Uso de Imagens de Satélite e Mapas de Relevô Sombreado. **Revista do Instituto de Geociências – USP, Série Cient.**, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 57-72. 2010.
49. ROSTIROLLA, S.P.; ASSINE, M.L.; FERNANDES, L.A.; ARTUR, P.C. Reativação de paleolinhamentos durante a evolução da bacia do Paraná - o exemplo do alto estrutural de Quatiguá. **Revista Brasileira de Geociências**, 30(4):639-648. 2000.
50. SANTOS, M.E. de C.M. & CARVALHO, M.S.S. de. Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís. Rio de Janeiro: CPRM– DGM/DIPALE, 215 p. 2009.
51. SCHEIBE, L.F. **Geologia e Petrologia do Distrito Alcalino de Lages – SC**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 253p. 1986.
52. SIQUEIRA, L.F.S. **Tectônica deformadora em sinéclises intracratônicas: a origem do Alto Estrutural de Pitanga, Bacia do Paraná, SP**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, 62 p. 2011.
53. SIQUEIRA FILHO, N.C. Geologia da folha Castelo do Piauí. SUDENE, Recife. Série Geologia Regional nº 15,64 pp. 1970.
54. SLAVEC, G.B.; MANTOVANI, M.S.M.; SHUKOWSKY, W. Estudo Gravimétrico do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. **Revista Brasileira de Geociências**, 34(2):275-280. 2004.
55. SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J. Tectonic cycles and sedimentary sequences in the Brazilian intracratonic basins. *Geol. Soc. Am. Bull.* 89:181-191. 1978.
56. SOUSA, M.O.L. **Evolução tectônica dos Altos Estruturais de Pitanga, Artemis, Pau D'Alho e Jibóia - Centro do Estado de São Paulo**. Tese de Doutorado, UNESP, 206 p. 2002.
57. STOFFLER, D. & LANGENHORST, F. Shock metamorphism of quartz in nature and experiment: I. Basic observation and theory. **Meteoritics**, 29, 155-181. 1994.
58. TORQUATO, J.R.F. O astroblema de São Miguel do Tapuio (PI). **Ciências da Terra**, 1(1) 37. 1981.
59. UCHÔA, E.B.; VASCONCELLOS, M.A.; CRÓSTA, A.P. Santa Marta Crater: macroscopic and petrographic evidences of a new confirmed impact structure in northeastern Brazil. **Lunar and Planetary Science Conference** 44th. 2013.
60. ULBRICH, H.H.G.J.; VLACH, S.R.F.; DEMAIFFE, D.; ULBRICH, M.N.C. Structure and origin of the Poços de Caldas alkaline massif, SE Brazil. In: Comin-Chiaromonte, P. & Barros Gomes, C. (eds.) Mesozoic to Cenozoic Alkaline Magmatism in the Brazilian Platform. EDUSP / FAPESP, p. 367 - 418. 2005.
61. VASCONCELLOS, M.A.; CRÓSTA, A.P.; MOLINA, E.C. Geophysical characteristics of four possible impact structures in the Parnaíba Basin, Brazil: Comparison and implications. *The Geological Society of America, Special Paper* 465, 201-217. 2010.

*Manuscrito recebido em: 24 de Agosto de 2015
Revisado e Aceito em: 12 de Novembro de 2015*