

Cartografia geofísica regional do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba

Regional geophysical mapping of the Mesozoic magmatism in the Parnaíba Basin

Leonardo Silva Ribeiro Mocitaiba¹, David Lopes de Castro¹, Diógenes Custódio de Oliveira²

¹Programa de Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Campus Universitário, s/n, Caixa Postal 1596, CEP 559078-970, Natal, RN, BR (leomocitaiba@hotmail.com; david@geologia.ufrn.br)

²PETROBRAS/E&P Unidade Operacional RNCE (dcoliveira@petrobras.com.br)

Recebido em 07 de julho de 2016; aceito em 30 de março de 2017

Resumo

Durante a desagregação mesozoica do megacontinente Pangea e abertura do Oceano Atlântico, rochas ígneas intrusivas e extrusivas acomodaram-se na Bacia do Parnaíba no Eojurássico e Eocretáceo, resultando nas sucessões ígneas Mosquito e Sardinha, respectivamente. O principal objetivo desta pesquisa é a cartografia geofísica regional desses corpos magmáticos com base em técnicas de realce de anomalias magnéticas e mapeamento semiautomático (SOM). Um vasto conjunto de dados magnéticos aerolevantados foi processado e interpretado com o objetivo de cartografar a distribuição da atividade ígnea na Bacia do Parnaíba. Os mapas geofísicos resultantes indicam que o magmatismo mosquito tem proeminente ocorrência nas bordas oeste e sul da bacia, enquanto que o magmatismo sardinha está concentrado nas porções centro-leste e nordeste. Dados de susceptibilidade magnética das rochas magmáticas permitiram individualizar os dois principais eventos magmáticos mesozoicos, constatando que a Formação Sardinha exhibe susceptibilidade magnética média aproximadamente duas vezes maior que a Formação Mosquito, revelando uma diferenciação composicional desses dois eventos magmáticos. Análise comparativa entre seções sísmicas, dados magnéticos e geológicos de superfície revela que a ocorrência das rochas magmáticas é muito mais extensa em subsuperfície e que soleiras e diques ocorrem principalmente intercalados entre as sequências tectono-sedimentares paleozoicas. As direções dos lineamentos magnéticos revelaram a possível ocorrência de feições riftes de direções ENE-WSW e NNE-SSW, associados à desagregação do Gondwana Oeste, e *trends* estruturais E-W e NE-SW, associados a zonas de cisalhamento brasileiras. Essa herança tectônica controlou parcialmente o alojamento do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba. Por fim, estruturas rifte sotopostas discordantemente sob as sequências sedimentares demonstram uma relação próxima com as direções magnéticas orientadas para ENE-WSW e NNE-SSW. Por outro lado, anisotropias profundas associadas ao Lineamento Transbrasiliano revelaram *trends* estruturais E-W e NE-SW, governando o padrão de alojamento do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba.

Palavras-chave: Magnetometria; Sísmica de Reflexão; Mapeamento Semiautomático; Susceptibilidade Magnética; Formações Mosquito e Sardinha; Bacia do Parnaíba.

Abstract

During the Mesozoic break-up of the Pangea megacontinent and opening of the Atlantic Ocean, intrusive and extrusive igneous rocks took place in the Parnaíba Basin in Early Jurassic and Early Cretaceous times, resulting in the Mosquito and Sardinha igneous successions, respectively. The main aim of this research is a regional geophysical mapping of these magmatic bodies based on techniques of magnetic anomaly enhancement and self-organizing maps (SOM). The final geophysical maps indicate that the Mosquito Magmatism has widespread distribution at the western and southern edges of the basin, whereas the Sardinha Magmatism is distributed at the center-eastern and northeastern portions. Magnetic susceptibility data measured in magmatic rocks outcrops allowed distinguishing the two main Mesozoic magmatic activities. The igneous successions associated with the Sardinha Formation displays averaged magnetic susceptibility about two times higher than the Mosquito Formation. This difference of physical property reveals a compositional differentiation of these two magmatic events. Comparative analysis between seismic sections, magnetic and surface geology data shows that the occurrence of magmatic rocks is much more extensive in the subsurface and the sills and dykes occur mainly intercalated in the Paleozoic tectonic-sedimentary sequences. Finally, the magnetic lineaments revealed: ENE-WSW and NNE-SSW oriented rifts, associated with the break-up of West Gondwana; and E-W and NE-SW structural trends associated with

Brasiliano shear zones. This tectonic heritage partially controlled the emplacement of the Mesozoic magmatism in the Parnaíba Basin. Finally rifts structures lying unconformably on Parnaíba sedimentary sequences point out to a close relationship with ENE-WSW and NNE-SSW oriented magnetic trends. On the other hand, deep anisotropies associated to the Transbrasiliano Lineament revealed E-W and NE-SW structural trends, governing the pattern of emplacement of Mesozoic magmatism in the Parnaíba Basin.

Keywords: Magnetics; Seismic Interpretation; Self-organizing Mapping; Magnetic Susceptibility; Mosquito and Sardinha Formations; Parnaíba Basin.

INTRODUÇÃO

A Bacia do Parnaíba é uma das vastas bacias paleozoicas da Plataforma Sul-Americana, que contém registros da sua evolução tectônica desde a formação do Gondwana Oeste, no final do Ciclo Brasileiro (670-540 Ma), até a separação continental entre América do Sul e África, no Cretáceo Inferior. Durante o Eojurássico até o Cretáceo Inferior, dois episódios de intensa atividade ígnea básica instalaram-se no interior e sobre os estratos sedimentares preexistentes (Cordani et al., 1984), formando principalmente corpos intrusivos (soleiras e diques), desde o Eojurássico até o Cretáceo Inferior (Cordani et al., 1984). Visto que tais registros magmáticos são importantes indicadores dos regimes tectônicos atuantes na formação de uma bacia sedimentar, o mapeamento desses corpos magmáticos fornece subsídios bastante consistentes para melhor caracterizar os esforços tectônicos associados à evolução geodinâmica de bacias sedimentares, em particular da Bacia do Parnaíba no contexto da formação do Atlântico Sul e Equatorial.

O sucesso da utilização de métodos magnéticos na caracterização dos registros magmáticos tem como premissa os marcantes contrastes de susceptibilidade magnética entre tais corpos e sua encaixante sedimentar. Tal fato possibilita um mapeamento rápido e preciso por meio das assinaturas magnéticas dos eventos ígneos, estando esses aflorantes ou não. Técnicas de filtragem espectral aplicadas aos dados geofísicos têm a propriedade de realçar ainda mais sua resposta geofísica, aumentando a resolução espacial do método investigativo. Não obstante as assinaturas magnéticas e gravimétricas dos corpos magmáticos da Bacia do Parnaíba estarem mascaradas por fontes geofísicas presentes no embasamento cristalino (De Castro et al., 2014), o uso da técnica de mapeamento semiautomático *self-organizing maps* (SOM) facilita o reconhecimento das diferentes contribuições de unidades geológicas/geofísicas ao campo geomagnético. Isso permite identificar detalhadamente as feições magmáticas de interesse da presente pesquisa. Medidas de susceptibilidade magnética subsidiaram a identificação dos padrões anômalos dos corpos magmáticos, bem como a caracterização magnética das rochas dos dois principais episódios magmáticos mesozoicos da Bacia do Parnaíba.

A integração de informações advindas da interpretação dos diversos mapas magnéticos, de seções sísmicas e dos

atributos incorporados pelo mapeamento semiautomático forneceu a distribuição superficial e em subsuperfície dos eventos magmáticos na bacia, bem como os principais lineamentos estruturais do substrato rochoso. Ademais, os mapas e as seções geofísicas revelaram importantes elementos da arquitetura interna da bacia, a saber: estruturas riftes eocambrianas, corpos magmáticos intrabaciais, relações espaciais entre os dois principais eventos magmáticos, bem como o papel das descontinuidades de idade brasileira herdadas do embasamento cristalino na evolução tectônica da bacia.

CONTEXTO GEOLÓGICO

Contexto tectônico da Bacia do Parnaíba

Localizada na parte nordeste da Plataforma Sul-Americana, a Bacia do Parnaíba possui uma área aproximada de 668.858 km² e espessura da seqüência tectono-sedimentar pouco maior que 3.500 m (Zembruski e Campos, 1988) e na ordem de 5.000 m na região do Lineamento Transbrasiliano (De Castro et al., 2016). A bacia se instalou como uma vasta sinéclise paleozoica após a consolidação termomecânica da Plataforma Sul-Americana que, por sua vez, se seguiu à orogênese Brasileira-Pan-africana (Klein et al., 2013). É circundada por diversas unidades cratônicas (Figura 1). Nas porções oeste e sudeste da bacia ocorrem os crátons Amazônico e o São Francisco, respectivamente, enquanto ao norte repousa sobre o Cráton São Luiz, cujo limite com a Faixa de Dobramento Gurupi tem sido definido com a Zona de cisalhamento Tentugal, que é também considerada uma zona de sutura entre esses dois terrenos de idades proterozoicas (Hasui et al., 1984; Abreu e Lesquer, 1985). Segundo Klein et al. (2005), a Zona de Cisalhamento Tentugal apresenta *trend* estrutural NW-SE. Já o setor oeste da bacia é bordejada pela Faixa de Dobramentos do Araguaia, enquanto o setor leste é limitado pela Província Borborema. Os principais elementos estruturais que compartimentam a Bacia do Parnaíba são a Estrutura de Xambioá, o Arqueamento do Alto Parnaíba (Coimbra, 1983; Castelo Branco e Coimbra, 1984), o Lineamento Transbrasiliano (Cordani et al., 1984) e o sistema de lineamentos orientados segundo a direção NW-SE (Zona de Cisalhamento Tentugal) (Figura 1). A Estrutura de Xambioá e o Arqueamento do Alto Parnaíba apresentam

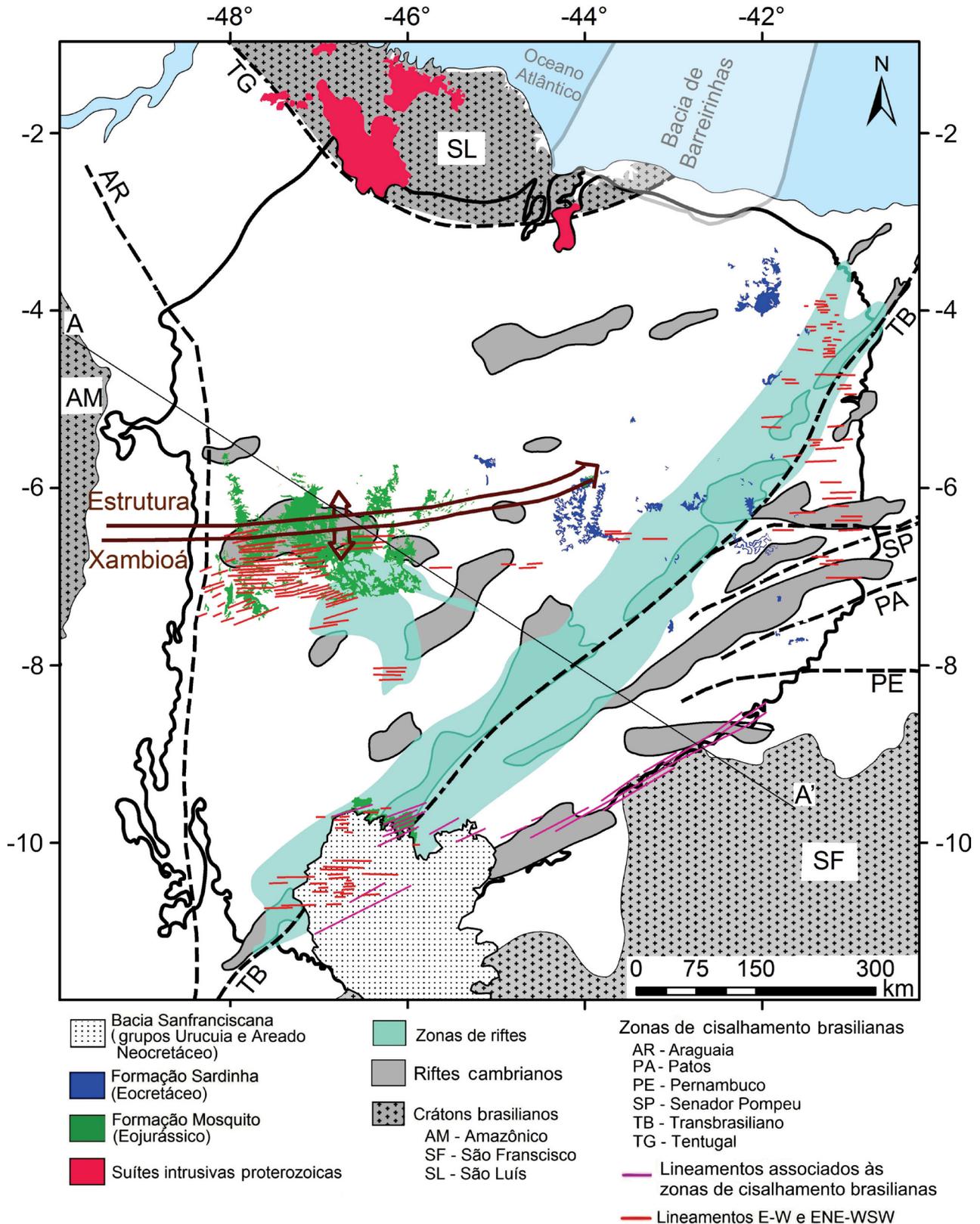


Figura 1. Esboço tectônico do arcabouço estrutural da Bacia do Parnaíba (adaptado de Cordani et al., 1984; De Castro et al., 2014; 2016; Chamani, 2015). A distribuição dos riftes cambrianos é baseada em Oliveira e Mohriak (2003) e De Castro et al. (2014), das Zonas de Riftes, em De Castro et al. (2016) e dos lineamentos, em Chamani (2015). O Perfil A-A' é apresentado na Figura 2.

orientação principal E-W e parecem ter continuidade nos lineamentos da Província Borborema.

Após o término da fase brasileira, as discontinuidades preexistentes (profundas zonas de cisalhamento e/ou limites entre blocos crustais) foram reativadas, sob a forma de falhas normais, permitindo a implantação de estruturas grabeniformes, que foram preenchidas por seqüências vulcano-sedimentares (Cunha, 1986; Oliveira e Mohriak, 2003). A partir da interpretação de mapas de anomalias magnéticas e gravimétricas e seções sísmicas, De Castro et al. (2016) identificaram dois sistemas de riftes, relacionados às fases iniciais de instalação da bacia. Um sistema rifte mais restrito à porção centro-oeste da bacia, com direção aproximada NW-SE, e um mais proeminente, distribuído pelas bordas sul e leste da bacia, orientado ao longo do Lineamento Transbrasiliano, cujo principal representante é o Graben de Jaibaras (Oliveira e Mohriak, 2003).

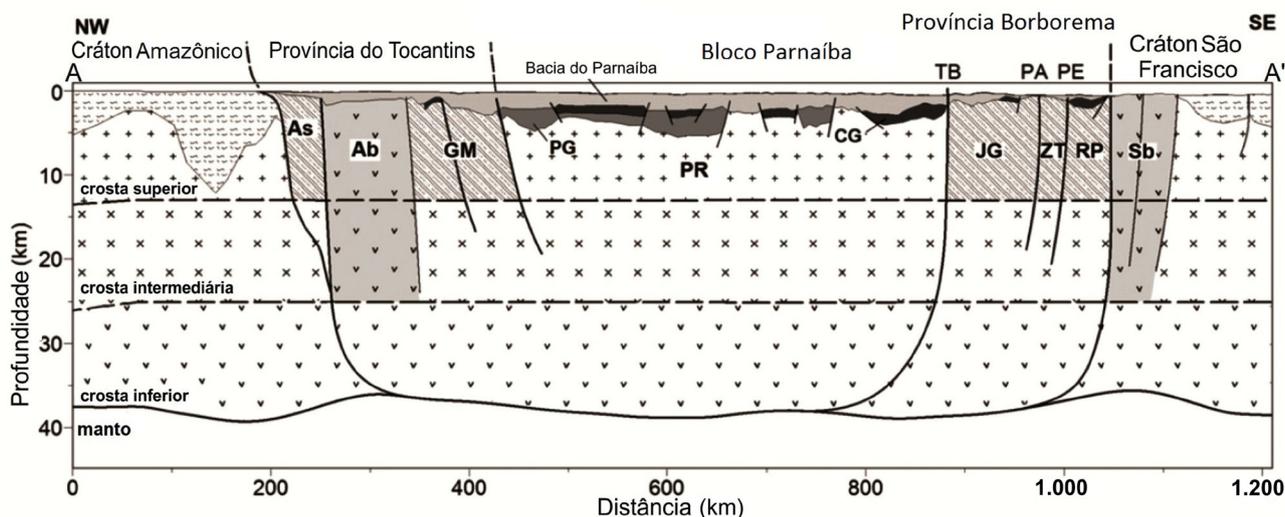
Diversas estruturas do embasamento condicionaram a origem e a evolução geológica da Bacia do Parnaíba, afetando seus limites, controlando depocentros e atividades tectônicas sinsedimentares (Chamani, 2015). Entre elas, merece destaque o Lineamento Transbrasiliano, que corta a Bacia do Parnaíba de NE para SW, e o Lineamento Araguaia, que baliza a borda oeste da bacia. O primeiro é uma discontinuidade em escala continental exposta entre o Cráton Amazônico e a porção leste da Plataforma Sul-Americana, que exerceu importante controle estrutural na origem e evolução inicial da bacia (Oliveira e Mohriak, 2003; Brito Neves e Fuck, 2014). Interpretações de dados geofísicos aéreos e de sensoriamento remoto mostram que o Lineamento Transbrasiliano apresenta direção preferencial

N30°E e é composto por um sistema de zonas de cisalhamento dúctil, formando conjuntos paralelos de falhas que atravessam a Bacia do Parnaíba longitudinalmente com direção NNE-SSW (Brito Neves e Fuck, 2014; De Castro et al., 2014). Já o Lineamento Araguaia é uma marcante feição geológica de direção N-S, que segue um conjunto de notáveis anomalias gravimétricas e aeromagnéticas, acompanhando a estruturação da Faixa Araguaia (Nunes, 1993; Brito Neves e Fuck, 2014; De Castro et al., 2014) (Figura 1). No modelo geológico obtido por meio de dados gravimétricos e magnéticos (Figura 2), nota-se a compartimentação do embasamento da bacia, dominada por porções crustais das províncias Tocantins (Faixa Araguaia e Arco Magmático de Goiás) e Borborema, grábens paleozoicos e zonas de cisalhamento brasileiras (Transbrasiliano, Patos e Pernambuco) (De Castro et al., 2014; Daly et al., 2014).

Contexto litoestratigráfico da Bacia do Parnaíba

O desenvolvimento tectono-estratigráfico da Bacia do Parnaíba está relacionado ao Estágio de Estabilização da Plataforma Sul-Americana (Almeida e Carneiro, 2004), quando se implantaram condições intraplaca de subsidência termo-isostática relativamente calmas e espacialmente amplas. Concomitantemente aos processos de subsidência, ocorreram soerguimento e arqueamento adjacentes, falhamentos intrabaciais e sedimentação ativa na extensa Sinéclise do Parnaíba. Esse estágio se estendeu do Siluriano ao Jurássico (Góes e Feijó, 1994).

A natureza do preenchimento da bacia é predominantemente siliciclástica, ocorrendo subordinadamente carbonatos



Domínios geológicos: As: Araguaia supracrustal; Ab: Embasamento Araguaia; GM: Arco Magmático de Goiás; PG: Grábens Paleozoicos; PR: Bloco Parnaíba; CG: Grábens Cambrianos; JG: Jaguaribe; ZT: Zona Transversal; RP: Riacho do Pontal; Sb: Borda sul. Zonas de cisalhamento: TB: Transbrasiliano; PA: Patos; PE: Pernambuco.

Figura 2. Modelo interpretativo com base em dados gravimétricos e magnéticos aéreos (adaptado de De Castro et al., 2014).

e anidrita, além de diabásio e basalto, representativos de eventos magmáticos do Eojurássico ao Eocretáceo (Góes, 1995; Vaz et al., 2007). A Bacia do Parnaíba compreende as superseqüências: Cambriana (Grupo Jaibaras); Siluriana-Eodevoniana (Grupo Serra Grande); Mesodevoniana-Eocarbonífera (Grupo Canindé); Neocarbonífera-Eotriássica (Grupo Balsas); e Jurássica-Cretácea. Na bacia também há depósitos do Terciário (Grupo Barreiras) e coberturas sedimentares do Neógeno-Holoceno, ocorrendo, sobretudo, na borda norte da bacia, enquanto que ao sul, ocorrem as seqüências sedimentares da Bacia Sanfranciscana (grupos Urucua e Areado), que recobrem a seção paleozoica da bacia (Tabela 1 e Figura 3).

Conforme Góes e Feijó (1994), o Grupo Serra Grande (formações Jaicós, Tianguá e Ipu) é formado por arenito e intercalações de siltito e folhelho de ambientes fluvial entrelaçado, marinho raso e glacial. O Grupo Canindé (formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti) compreende, de maneira geral, arenitos, folhelhos e siltitos. As Formações Piauí, Pedra-de-Fogo, Motuca e Sambaíba compõem o Grupo Balsas, caracterizado por arenito, siltito, folhelho, calcário, silxito e evaporito. As formações Pastos Bons e Corda são marcadas por uma deposição exclusivamente continental na bacia, creditada ao peso do pacote vulcânico resultante do magmatismo básico ocorrido durante o Eojurássico (Formação Mosquito). As formações Pastos Bons, Corda e Itapecuru são caracterizadas por arenitos, siltitos e folhelhos de ambiente fluvial e lacustre. O Grupo Barreiras representa uma seqüência sedimentar continental cenozoica composta por arenitos, conglomerados, intercalações de siltito e argilito (Tabela 1) (Silva et al., 2003).

Magmatismo Mesozoico

A intensa atividade ígnea em que foram palco as bacias do Parnaíba, Paraná, Amazonas e Solimões teve início com

os primeiros espasmos que culminaram com a abertura da Margem Equatorial durante a separação entre os continentes sul-americano e africano (Almeida, 1986; Thomaz Filho et al., 2008). Na Bacia do Parnaíba, acomodaram-se rochas ígneas intrusivas (diques e soleiras) e extrusivas, de composição básica, as quais, do ponto de vista estratigráfico, foram divididas em duas unidades: Formação Mosquito de idade Eojurássica e Formação Sardinha Eocretácea (Vaz et al., 2007).

Nesse mesmo contexto, os eventos precursores à desagregação do Gondwana Oeste propiciaram o abatimento da região central da bacia, com a formação de um sistema de riftes interiores, preenchidos pelos sedimentos das formações Pastos Bons e Corda, associados, do ponto de vista cronoestratigráfico, ao alojamento das rochas básicas das formações Mosquito e Sardinha. A implantação desses riftes ocorreu, principalmente, sobre área da Estrutura de Xambioá (Figura 1), que de alto interno passou a comportar-se como eixo deposicional dessa nova sedimentação (Góes, 1995), cujo afinamento crustal está relacionado a uma distensão NE-SW (Hasui et al., 1984; Costa et al., 1991), gerando grábens de direções ENE-WSW e NNE-SSW, que, por sua vez, permitiram o alojamento dos eventos ígneos mesozoicos em pauta. Em subsuperfície, os diques da Formação Sardinha e as soleiras da Formação Mosquito estão presentes em maior quantidade na Seqüência Mesodevoniana-Eocarbonífera, ocorrem também na Seqüência Siluriana e são muito raros na Seqüência Neocarbonífera-Eotriássica (Vaz et al., 2007).

Formação Mosquito

Trata-se do evento magmático de idade Eojurássica, associado ao tectonismo embrionário que culminou com a quebra da Margem Equatorial e a formação do Atlântico Central, estando inserido na mega-atividade magmática chamada Província

Tabela 1. Carta cronoestratigráfica simplificada da Bacia do Parnaíba, ilustrando as divisões das seqüências tectono-sedimentares (adaptado de De Castro et al., 2016).

Idade (Ma)	Período	Fase	Seqüência	Grupo	Formação	Litologia
94 - 200	Jurássico-Cretáceo	Sag/Rifte Sul-atlântico	V	-	Mosquito, Pastos Bons, Sardinha, Corda, Itapecuru	arenitos, pelitos, folhelhos e basaltos
223 - 310	Neocarbonífero-Eotriássica	Sag	IV	Balsas	Piauí, Pedra de Fogo, Motuca, Sambaíba	folhelhos, siltitos, calcários e arenitos
334 - 400	Mesodevoniana-Eocarbonífera	Sag	III	Canindé	Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá, Poti	siltitos, folhelhos e arenitos
400 - 443	Siluriana-Eodevoniana	Sag	II	Serra Grande	Jaicós, Tianguá, Ipu	arenitos fluviais e deltaicos e pelitos
500 - 527	Cambriana	Rifte	I	-	Jaibaras	conglomerados, arenitos, filitos e folhelhos

Embasamento Pré-cambriano

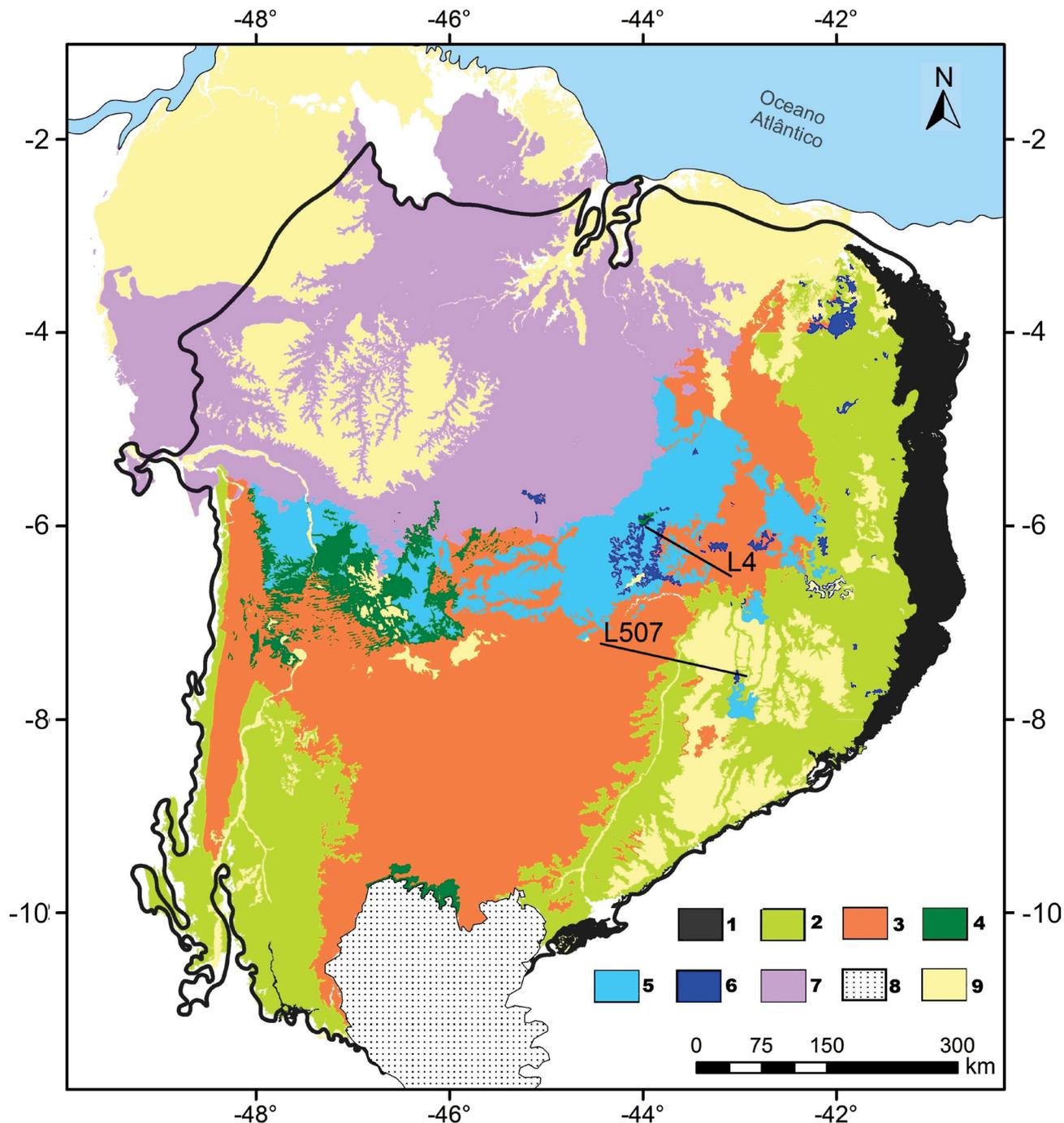


Figura 3. Mapa geológico da Bacia do Parnaíba, extraído do banco de dados Geobank da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM/Geobank, 2015). Unidades estratigráficas: (1) Siluriana-Eodevoniana (Grupo Serra Grande); (2) Mesodevoniana-Eocarbonífera (Grupo Canindé); (3) Neocarbonífero-Eotriássica (Grupo Balsas); (4) Formação Mosquito (Magmatismo Eojurássico); (5) Neojurássica; (6) Formação Sardinha (Magmatismo Eocretáceo); (7) Mesocretácea; (8) Bacia Sanfranciscana (grupos Uruçuia e Areado); (9) Coberturas sedimentares do Cenozoico ao recente. Linhas sísmicas: L4 (Figura 9) e L507 (Figura 10).

Magmática do Atlântico Central (CAMP) (Marzoli et al., 1999; Milani e Thomaz Filho, 2000; Merle et al., 2011). A CAMP é uma das maiores províncias magmáticas do planeta, estendendo-se por mais de 7.500 km nos continentes americano e africano. Os principais pulsos magmáticos ocorreram no limite do Triássico com o Jurássico (199-190 Ma). Na América do Sul, a CAMP atingiu regiões do extremo norte do Brasil (Cassiporé) e as bacias paleozoicas do Solimões, Amazonas e Parnaíba (Góes e Feijó, 1994). As rochas da Formação Mosquito ocorrem na porção oeste da Bacia do Parnaíba e consistem de basaltos toleíticos amigdaloidais, eventualmente intercalados a arenitos vermelhos com leitos de sílex (Góes e Feijó, 1994). Em geral, apresenta uma granulação fina e matriz composta por plagioclásio, clinopiroxênio e óxidos de Fe-Ti (magnetita e ilmenita) (Baksi e Archibald, 1997; Merle et al., 2011). Aloja-se estratigraficamente entre os arenitos da Formação Sambaíba do Grupo Balsas e Formação Pastos Bons, e sua ocorrência é mais frequente na porção centro-oeste da bacia (Figura 3), caracterizada por vastos derrames e extensas soleiras (Vaz et al., 2007), conformando o topo da maioria das mesas e chapadas residuais que caracterizam o relevo regional. Com efeito, possuem um papel fundamental na construção dessas feições geomorfológicas, ao se comportar como uma fina capa resistente aos processos erosivos, que atuam aceleradamente sobre os arenitos Sambaíba, imediatamente sotopostos (Bezerra, 1996; Chamani, 2015).

Formação Sardinha

As rochas da Formação Sardinha caracterizam-se por basaltos igualmente toleíticos amigdaloides de granulação fina a média e constituídos por augita, plagioclásio e óxidos de Fe-Ti (Vaz et al., 2007). São mapeadas na porção centro-leste da bacia, em uma ampla faixa de distribuição aproximada E-W que acompanha parcialmente o eixo NE-SW do Lineamento Transbrasileiro (Chamani, 2015) (Figura 1). O Magmatismo Sardinha aloja-se acima da Formação Pastos Bons e abaixo da Formação Itapecuru. Relações de campo permitem inferir essa unidade como longos diques e soleiras menores (Vaz et al., 2007). A atividade ígnea da Formação Sardinha está inserida tectonicamente no conjunto de eventos eocretácicos, onde se incluem os derrames continentais da Formação Serra Geral na Bacia do Paraná e o Enxame de Diques Rio Ceará-Mirim na Província Borborema, ambos ligados aos processos de quebra da litosfera que culminaram com a abertura do Atlântico Sul. Com idades de 129 a 124 Ma, os basaltos da Formação Sardinha são considerados correlatos com os eventos magmáticos da Província Magmática Paraná-Etendeka. Bellieni et al. (1992) observaram similaridades mineralógicas, geoquímicas e isotópicas entre as rochas intrusivas da Formação Sardinha, os derrames basálticos do norte da Bacia do Paraná e os diques

Rio Ceará-Mirim e estabeleceram correlações entre esses eventos e o magmatismo cretácico inferior na Fossa de Benue (oeste da África). Todos esses eventos precederam o rifteamento e a abertura dos domínios equatorial e central do Atlântico Sul.

MÉTODOS DE TRABALHO

Medidas de susceptibilidade magnética

A susceptibilidade magnética (K) é a propriedade física que permite às rochas se magnetizarem, processo chamado de indução magnética (Isles e Rankin, 2013; Telford et al., 1990). Cada rocha magnetiza-se de acordo com a sua susceptibilidade magnética, que depende, dentre outras variáveis, da quantidade e do modo de distribuição dos minerais magnéticos presentes. As rochas ígneas básicas são, em geral, mais magnéticas em razão de seu conteúdo relativamente alto de minerais magnéticos, como a magnetita. A proporção de magnetita em rochas ígneas tende a diminuir com o aumento da acidez, de modo que as rochas ígneas ácidas, embora variáveis em seu comportamento magnético, são geralmente menos magnéticas do que as básicas. As rochas metamórficas são também variáveis em seu caráter magnético. As rochas sedimentares tipicamente apresentam baixo magnetismo (Kearey et al., 2013).

Um susceptibilímetro portátil KT-10 v2 (*Terraplus Inc.*) foi utilizado nas medições em afloramento. Em cada ponto, as rochas ígneas foram quebradas com uma marreta até formar blocos de 6 a 12 cm de lado. Seis amostras, sem processo de intemperização visível, foram coletadas. As medidas da susceptibilidade magnética foram efetuadas em cada uma delas, encostando o sensor circular de 6,5 cm de diâmetro a uma superfície limpa e regular da amostra. Comumente, repetiram-se as medidas nas amostras para validação dos valores obtidos. Para as rochas sedimentares, em cada ponto foi medida a susceptibilidade magnética da rocha *in situ*. Ao todo foram adquiridos dados em 34 afloramentos espalhados pela região da Bacia do Parnaíba (Tabela 2).

Nas bordas oeste e sul da bacia, zona de ocorrência da Formação Mosquito, a susceptibilidade magnética foi obtida em 17 pontos. Desse total, em 10 pontos de medição as rochas investigadas foram descritas como diabásios de granulação fina a média, caracterizadas como diques ou, em sua maioria, derrames. Em outros pontos, foram medidas as propriedades magnéticas de arenitos termicamente modificados pelo processo de intrusão, alguns com concreções ferruginosas. O valor médio das susceptibilidades magnéticas das amostras da Formação Mosquito na borda oeste foi de $10,9 \times 10^{-3}$ SI (*International System of Units*) e, na borda sul, de 12×10^{-3} SI, enquanto o valor médio da suscetibilidade magnética dos arenitos foi de $0,5 \times 10^{-3}$ SI.

Tabela 2. Susceptibilidades magnéticas médias de amostras de rochas da Bacia do Parnaíba em 10^{-3} SI (*International System of Units*). As amostras de rochas foram quebradas para retirar crostas de alteração intempérica.

Longitude	Latitude	k _{am}	k _{af}	Litologia	Formação geológica
-41,5544	-7,0531	34,43	44,03	Soleira de diabásio de granulação média	Sardinha
-41,7945	-7,2465	30,15	41,30	Soleira de diabásio de granulação média	Sardinha
-41,8929	-7,7326	19,71	23,08	Soleira de diabásio de granulação fina	Sardinha
-41,8787	-7,6786	28,50	38,32	Soleira de diabásio	Sardinha
-41,8803	-7,6379	29,91	35,23	Derrame de diabásio	Sardinha
-44,2397	-6,5168	34,48	42,00	Soleira de diabásio de granulação média	Sardinha
-43,7116	-6,5041	25,96	28,30	Derrame de diabásio (rocha intemperizada)	Sardinha
-42,9655	-6,8063	28,46	28,36	Dique de diabásio de granulação média	Sardinha
-42,8422	-6,2483	39,61	45,06	Dique de diabásio de granulação média	Sardinha
-42,1717	-6,6349	7,16	6,79	Derrame de diabásio mais ácido	Sardinha
-42,1450	-6,2284	8,19	3,73	Dique de diabásio	Sardinha
-42,5914	-5,6656	27,33	28,60	Diabásio	Sardinha
-42,8422	-6,2483	39,61	45,06	Dique de diabásio de granulação média	Sardinha
-42,1717	-6,6349	7,16	6,79	Derrame de diabásio mais ácido	Sardinha
-42,1450	-6,2284	8,19	3,73	Dique de diabásio	Sardinha
-42,5914	-5,6656	27,33	28,60	Diabásio	Sardinha
-45,9541	-9,8873	17,90	/	Dique de diabásio de granulação fina	Mosquito (Borda Sul)
-46,6447	-9,6401	4,86	16,40	Diabásio alterado	Mosquito (Borda Sul)
-46,6447	-9,6401	13,31	/	Diabásio de granulação fina	Mosquito (Borda Sul)
-48,0338	-7,3554	28,95	21,00	Rocha plutônica máfica-ultramáfica	Mosquito (Borda Oeste)
-47,4422	-7,0413	3,48	4,83	Derrame de diabásio de granulação fina (mais ácido)	Mosquito (Borda Oeste)
-47,4244	-6,6354	1,25	9,85	Derrame de diabásio de granulação fina	Mosquito (Borda Oeste)
-47,3863	-6,3976	11,44	16,71	Diabásio alterado	Mosquito (Borda Oeste)
-47,2759	-6,2900	8,60	3,87	Derrame de diabásio	Mosquito (Borda Oeste)
-46,1558	-6,7150	8,75	8,49	Derrame de diabásio de granulação fina	Mosquito (Borda Oeste)
-46,1512	-6,7506	14,08	17,30	Derrame de diabásio	Mosquito (Borda Oeste)
-41,6216	-7,7215	/	0,10	Arenito metamorfisado e fraturado	Pimenteiras
-45,9156	-9,9007	/	0,01	Arenito silificado	Sambaíba
-45,9270	-9,8977	/	0,30	Arenito com concreções ferruginosas	Sambaíba
-46,9394	-10,1520	/	0,32	Arenito	Grupo Urucuia (Bacia Sanfranciscana)
-48,1540	-9,4745	/	0,77	Arenito metamorfisado	Pimenteiras
-48,1300	-9,4999	/	0,34	Arenito metamorfisado	Pimenteiras
-46,1411	-5,8238	/	2,19	Arenito metamorfisado	Grajaú
-46,1512	-6,5273	/	0,06	Arenito	Sambaíba

k_{am}: susceptibilidades magnéticas médias das amostras de rochas; k_{af}: susceptibilidades magnéticas médias das rochas aflorantes.

Na borda leste da bacia, a susceptibilidade magnética foi medida em 17 afloramentos da Formação Sardinha. As rochas ígneas analisadas foram descritas, geralmente, como soleiras de diabásio de granulação fina a média, no entanto, alguns afloramentos apresentaram características de dique ou derrame. A média dos valores de susceptibilidade magnética das amostras da Formação Sardinha na borda leste foi $25,28 \times 10^{-3}$ SI. Os diabásios da Formação Sardinha apresentam valores de susceptibilidade magnética duas vezes superiores àqueles da Formação Mosquito, sugerindo uma diferenciação dos parâmetros de magnetização desses dois eventos magmáticos.

Processamento dos dados aeromagnéticos

Os dados magnéticos aerolevantados na área de estudo fazem parte do Projeto Levantamentos Aerogeofísicos da Bacia do Parnaíba, cedidos pela Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP), e dos Projetos das Séries 1000, 3000 e 4000, cedidos pelo Serviço Geológico do Brasil/ Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Os parâmetros dos levantamentos aeromagnéticos constam na Tabela 3 e sua distribuição espacial, na Figura 4.

Os dados magnéticos foram previamente corrigidos da variação diurna do campo geomagnético, nivelados e micronivelados, além de removida a componente principal do campo (*International Geomagnetic Reference Field – IGRF*). Foi necessária, também, a aplicação extra dos filtros Cosseno Direcional e *Butterworth* para aqueles projetos que ainda apresentavam ruído direcional ao longo das linhas de voo. As informações magnéticas foram então interpoladas usando o método bidirecional, com uma célula da metade do espaçamento entre as linhas de voo, gerando malhas regulares do campo magnético anômalo (CMA) para cada projeto.

Para se obter o mapa magnético integrado de toda a região da Bacia do Parnaíba, foram aplicados filtros de continuação para cima ou para baixo nos dados de cada projeto para uma altura de voo de 500 m. Os dados aerogeofísicos continuados foram integrados por meio de uma rotina de sutura, que promove um nivelamento nos conjuntos de dados, eliminando os deslocamentos verticais nos valores das anomalias

magnéticas (Figura 5). Tais correções são distribuídas em função do comprimento de onda, o que resulta em um ajuste suave entre as diferentes bases de dados (Geosoft, 2010). Porém, o procedimento de continuação para cima promove atenuação no sinal geofísico, diminuindo a resolução do mesmo na detecção de fontes magnéticas rasas (ex. corpos tabulares ígneos). A continuação para baixo amplifica ruídos de alta frequência, podendo ser interpretados erroneamente como fontes magnéticas rasas. Sendo assim, optou-se por aplicar as técnicas de processamento e detecção de fontes em cada projeto individualmente, sem alterações causadas pelos filtros de continuação para cima e para baixo.

O fluxograma de processamento dos dados aeromagnéticos é descrito a seguir. A técnica *Matched Filter* foi aplicada para separar as anomalias relacionadas às fontes profundas, intermediárias e rasas do CMA. *Matched Filter* é uma técnica que visa localizar diferentes sinais provenientes de camadas equivalentes em diferentes profundidades a partir da análise de Fourier do espectro de potência dos dados do campo potencial (Phillips, 2001). Em outras palavras, é uma técnica automática que permite a separação de anomalias magnéticas com base nos seus diferentes comprimentos de onda. Assim, aplicando o *Matched Filter*, o CMA de cada projeto pode ser decomposto em três componentes: campo magnético profundo (CMP), campo magnético intermediário (CMI) e campo magnético raso (CMR) (Figura 5). O CMP corresponde ao campo magnético regional e está mais associado a estruturas magnéticas de longo comprimento de onda, localizadas em maiores profundidades, como feições geológicas do embasamento da bacia sedimentar. Já o CMI e CMR correspondem ao campo magnético residual e estão mais relacionados a estruturas magnéticas de intermediário a curto comprimento de onda e em profundidades mais rasas, como heterogeneidades em uma bacia sedimentar, por exemplo, uma suíte magmática intrusiva no pacote sedimentar de uma bacia. A propósito, na maioria dos mapas do CMR da Bacia do Parnaíba foi detectada a presença de ruídos de alta frequência e baixa amplitude, orientados na direção das linhas de voo. Ainda assim, o conteúdo do seu sinal magnético foi útil para auxiliar na cartografia magnética dos corpos magmáticos na bacia.

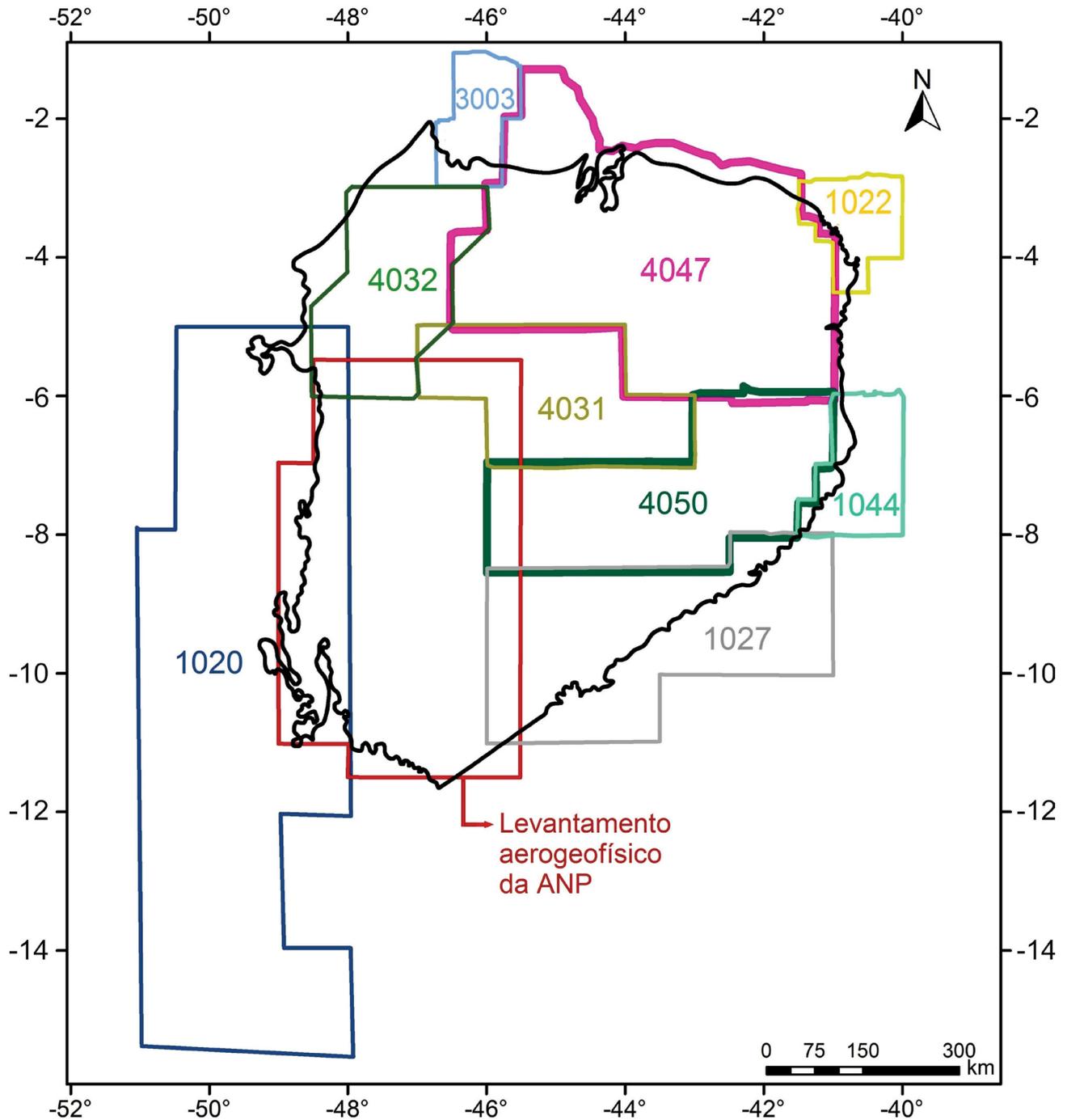
Tabela 3. Parâmetros dos levantamentos aerogeofísicos executados na Bacia do Parnaíba.

Empresa	ANP					CPRM				
Código	-	1020	1022	1027	1044	3003	4031	4032	4047	4050
Altura de voo (m)	100	150	150	150	150	150	300	700	500	800
Direção LV	N-S	N-S	N-S	N-S	N30°W	N-S	N-S	N45°E	N-S	N-S
Espaçamento LV (km)	0,5	2	1	2	1	4	2	2	3	3
Direção LC	E-W	E-W	E-W	E-W	N60°E	E-W	E-W	N45°W	E-W	E-W
Espaçamento LC (km)	4	14	20	20	20	27	8	12	18	18

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis; CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais; LV: linha de voo; LC: linha de controle.

Posteriormente, foram aplicados os filtros amplitude do sinal analítico (ASA) e derivada vertical (DZ) no CMI. O primeiro filtro produz um máximo sobre os contrastes magnéticos, sendo útil para localizar as bordas de corpos magnéticos e

centralizar as anomalias sobre suas fontes magnéticas (Kearey et al., 2013). O segundo foi usado para realçar o sinal das fontes magnéticas rasas, possibilitando demarcar a direção dos seus lineamentos magnéticos (Kearey et al., 2013).



ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis.

Figura 4. Mapa de localização dos levantamentos aerogeofísicos na Bacia do Parnaíba.

A técnica de mapeamento semiautomático, conhecida como *self-organizing maps* (SOM), foi então aplicada em cada projeto em separado para encontrar padrões anômalos e associações nos diferentes produtos do processamento

do sinal magnético. Esse método promove um mapeamento iterativo no espaço multidimensional das variáveis envolvidas, analisando as correlações não lineares entre elas em uma rede neural artificial (Carneiro et al.,

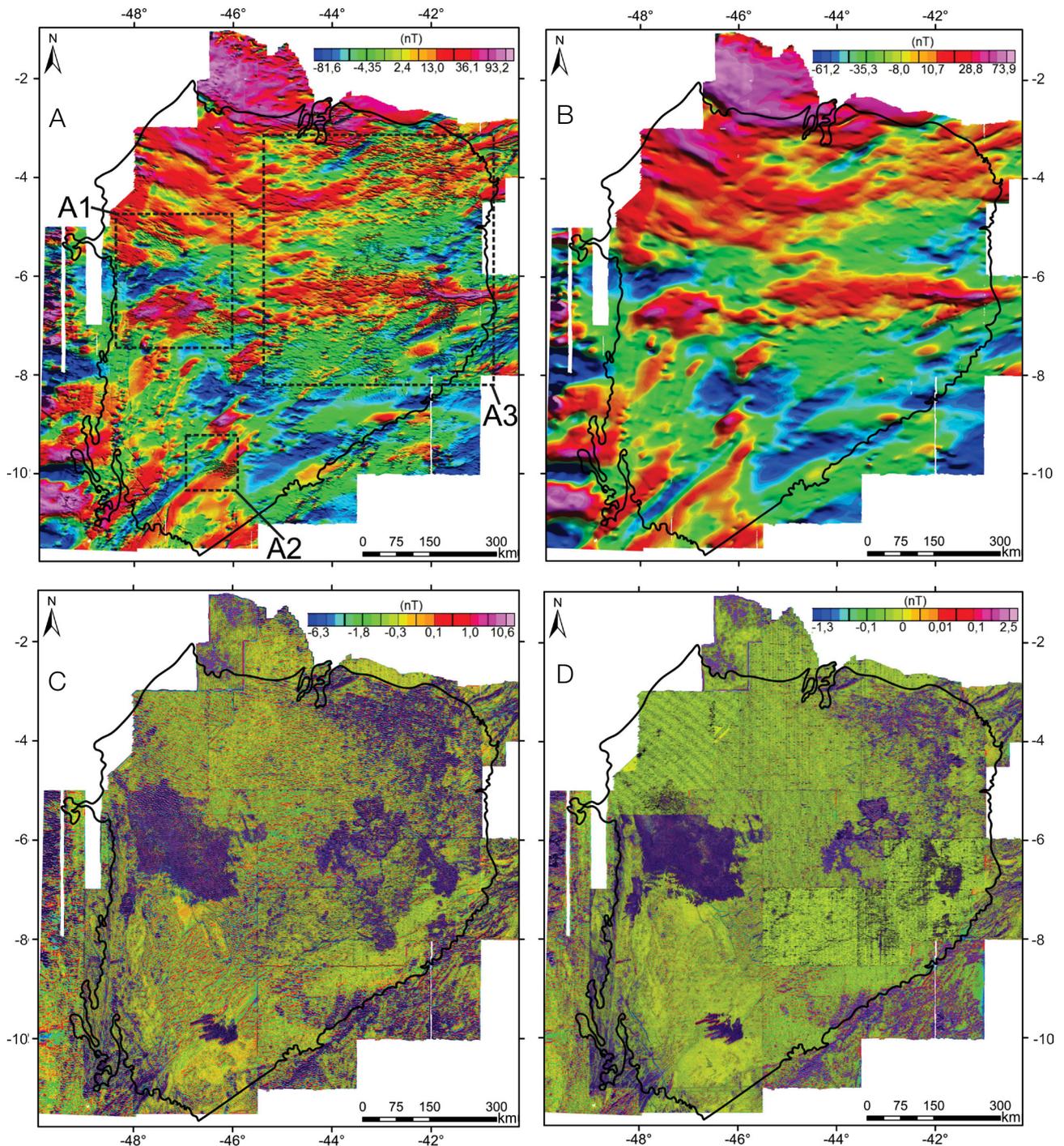


Figura 5. Mapa de anomalias magnéticas do campo magnético (A) total, (B) profundo, (C) intermediário e (D) e raso da Bacia do Parnaíba. Os quadrados destacam anomalias de alta amplitude e de curtos comprimentos de onda do campo magnético na borda oeste (A1 – Figura 6A), sul (A2 – Figura 6B), centro-leste e nordeste (A3 – Figura 6C) da bacia.

2012). Como resultado, a área de pesquisa é subdividida em grupos, ou *clusters*, que representam unidades geológicas/geofísicas distintas em função de suas assinaturas multivariadas do embasamento cristalino e da estruturação interna da bacia. Neste trabalho, as variáveis envolvidas foram: CMA, CMR, CMI, CMP e a amplitude do sinal analítico do CMR. Como resultado, o conjunto de mapas magnéticos foi separado em até 15 diferentes *clusters*, sendo que aqueles associados aos corpos magmáticos foram apresentados em mapa. A escolha desses *clusters* foi direcionada pelo padrão anômalo esperado para diques e soleiras de rochas magmáticas básicas em um contexto de bacia sedimentar, ou seja, altas amplitudes e curtos comprimentos de onda, bem como pela distribuição desses corpos nos mapas geológicos prévios. Uma possível contaminação das soluções do SOM pelo ruído de alta frequência ao longo das linhas de voo foi devidamente considerada na interpretação dos resultados finais.

ASSINATURA MAGNÉTICA DO MAGMATISMO MESOZOICO

Domínios e lineamentos magnéticos

A análise das assinaturas dos corpos magmáticos da Bacia do Parnaíba foi feita com base na interpretação qualitativa dos mapas geofísicos e na identificação de anomalias magnéticas via mapeamento semiautomático. Essas tarefas envolveram o reconhecimento e a delimitação de domínios e lineamentos magnéticos distintos nos mapas geofísicos, correlacionando-os com possíveis corpos geológicos causadores.

O CMA da Bacia do Parnaíba mostra um relevo magnético bastante acidentado com dipolos magnéticos assimétricos, com uma ampla diversidade de amplitudes e com comprimentos de onda por toda a bacia (Figuras 5A a 5D e 6). De maneira geral, as anomalias de mais curtos comprimentos de onda dão um aspecto mais rugoso ao relevo magnético e estão concentradas nas porções oeste, sul, centro-leste e nordeste

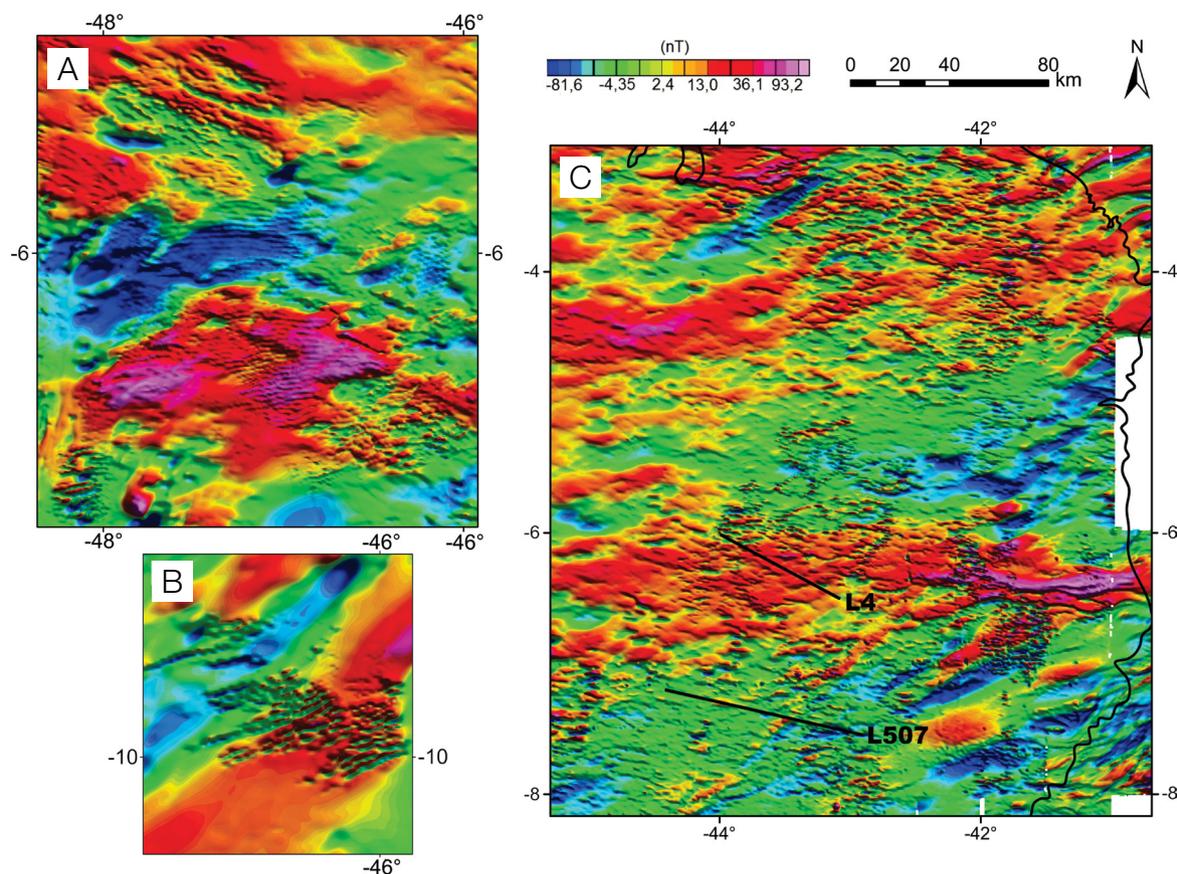


Figura 6. Mapa do campo magnético anômalo da Bacia do Parnaíba, destacando três áreas com anomalias de curto comprimento de onda e alta amplitude nas porções (A) oeste, (B) sul e (C) centro-leste e nordeste da bacia. Linhas sísmicas: L4 (Figura 9) e L507 (Figura 10).

da bacia (Figura 6). Além disso, é possível perceber a continuidade dessas anomalias e suas orientações nos diferentes levantamentos aeromagnéticos, possibilitando demarcar domínios magnéticos e traçar lineamentos de forma mais abrangente ao longo da Bacia do Parnaíba. As feições magnéticas de alta frequência ficam ainda mais evidentes nos mapas de ASA (Figura 7A) e da DZ (Figura 7B) do campo magnético intermediário, cujo ruído de alta frequência encontra-se bastante atenuado (Figura 5C). As amplitudes do sinal analítico realçam as anomalias magnéticas de curtos comprimentos de onda, caracterizadas por áreas com altas amplitudes do sinal analítico, as quais estão associadas essencialmente a fontes magnéticas mais rasas. No mapa da DZ, destacam-se regiões com anomalias magnéticas de alta frequência, e, além disso, permite melhor visualização dos lineamentos magnéticos.

Em função da distribuição espacial, amplitude e orientação do padrão magnético anômalo associado aos corpos magmáticos (Figuras 5 a 7), a Bacia do Parnaíba pode ser separada em cinco domínios magnéticos, a saber:

- O Domínio Magnético MqO, localizado na borda oeste da bacia, exibe extensões de 360 e 330 km nas direções N-S e E-W, respectivamente. Esse domínio apresenta uma anomalia magnética regional bipolar de longo comprimento de onda (~ 170 km) com um alto magnético ao sul e um baixo ao norte (Figura 5A). Essa ampla anomalia situa-se na região de maior ocorrência subaflorante da Formação Mosquito (Figura 3). Imerso nesse relevo magnético, ocorre uma série de anomalias magnéticas dipolares com

amplitude média de 60 nT e de curto comprimento de onda (~ 2,5 km), com formato alongado, gerando um aspecto rugoso no mapa CMA (Figura 6A). A partir da aplicação do *Matched Filter*, uma profundidade média de 600 m foi estimada para as fontes do sinal do CMI. No mapa da ASA, esse domínio exibe anomalias de altas amplitudes, com um valor médio de 25×10^{-2} nT/m (Figura 7A). No mapa da DZ, os lineamentos magnéticos desse domínio apresentam um aspecto encurvado com orientações preferenciais: ENE-WSW e E-W, na porção centro-oeste, NE-SW, no extremo leste (Figura 7B);

- O Domínio MqS está localizado na porção sul da bacia, restrito a uma área de 83 x 130 km, cujo eixo maior tem direção E-W. O CMA do Domínio MqS é composto por sequências de anomalias magnéticas alongadas na direção ENE-WSW, subparalelas e de curto comprimento de onda (~ 2,5 km), com amplitudes médias de 140 nT e altos valores da amplitude do sinal analítico (média de 35×10^{-2} nT/m) (Figura 6A). Com base no *Matched Filter*, estima-se uma profundidade média das fontes magnéticas do CMI em torno de 600 m. O domínio magnético parece sobrepor as anomalias magnéticas regionais de longo comprimento de onda (~ 70 km) e de direção NE-SW, associadas ao Lineamento Transbrasiliiano (Figuras 5A e 6B).
- O Domínio SdL ocupa uma vasta área de 600 por 300 km de extensão, englobando as porções NE e leste da bacia. Ao longo desse domínio estão presentes inúmeras anomalias magnéticas de curto comprimento de onda (média

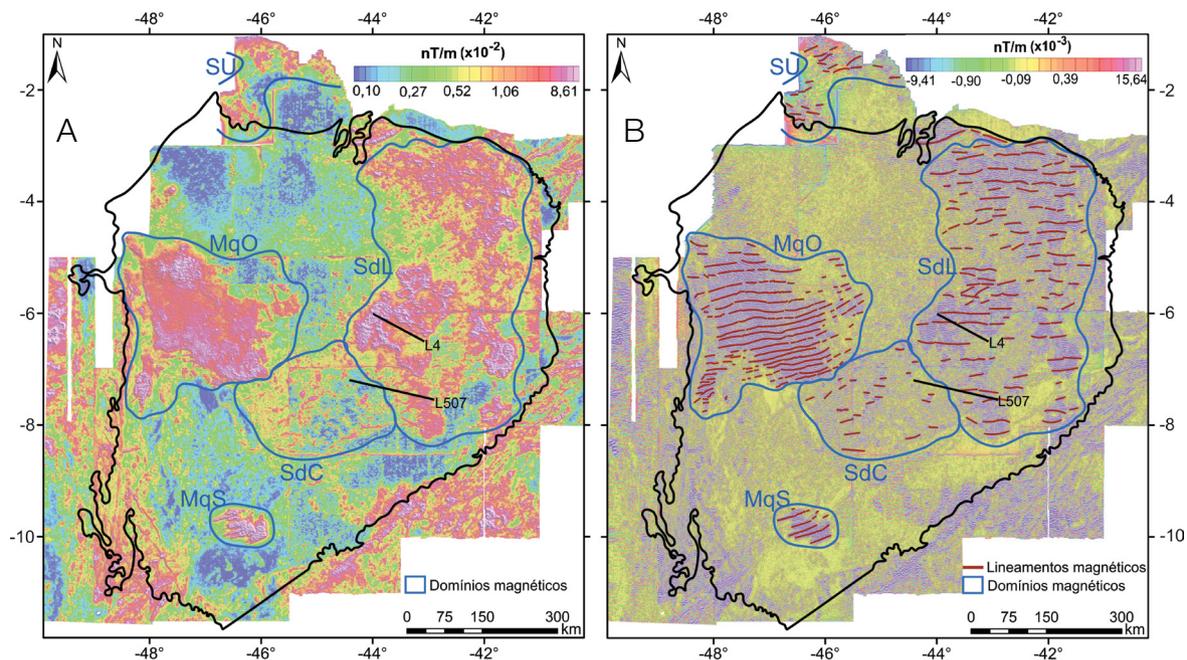


Figura 7. (A) Mapa da amplitude do sinal analítico do campo magnético intermediário da Bacia do Parnaíba. (B) Mapa da Derivada Vertical do campo magnético intermediário da Bacia do Parnaíba. Domínios magnéticos: MqO, MqS, SdL, SdC e SU. Linhas sísmicas: L4 (Figura 9) e L507 (Figura 10).

de 4,5 km), com dipolos magnéticos que exibem, em média, uma amplitude de 50 nT (Figura 6C). Esse caráter magnético anômalo fica mais evidente no mapa da ASA, onde essas anomalias magnéticas são destacadas e delimitadas pelos altos valores da amplitude do sinal analíticos (média de 20×10^{-2} nT/m) (Figura 7A). No mapa da DZ, nota-se que ao longo do Domínio SdL os lineamentos magnéticos exibem uma direção preferencial E-W (Figura 7B), com estimativa de profundidades médias das fontes do CMI em torno de 900 m;

- O Domínio Magnético SdC, localizado na porção central da bacia, apresenta anomalias magnéticas de comprimento de onda, variando de 8 a 15 km (Figura 6A e 6C). No mapa da ASA, SdC exibe anomalias mais isoladas, arredondadas e com amplitude média de 10×10^{-2} nT/m (Figura 7A). Já no mapa da DZ, os lineamentos magnéticos apresentam orientação preferencial E-W (Figura 7B). Ao longo desse domínio, também se observam lineamentos magnéticos de direção ENE-WSW;
- O Domínio Magnético SU está localizado no extremo norte da bacia. Devido à ausência de dados magnéticos em toda sua extensão, esse domínio não pode ser delimitado por completo. Nesse domínio, as anomalias magnéticas regionais exibem os maiores comprimentos de onda (~ 20 km), quando comparados com os domínios anteriores. De acordo com o *Matched Filter*, a profundidade média das fontes do CMI é de 1,2 km. O Domínio SU apresenta lineamentos magnéticos preferencialmente E-W na porção sul e NE-SW na porção norte (Figura 7B).

Mapeamento semiautomático

O resultado do mapeamento semiautomático das anomalias magnéticas da Bacia do Parnaíba, empregando a técnica SOM, é apresentado na Figura 8. Os grupos de soluções (*clusters*) foram obtidos de forma automática por meio de comparação geoestatística, em um espaço multidimensional de variáveis, bem como por meio dos padrões anômalos dos diferentes campos magnéticos obtidos pelo *Matched Filter* (CMA, CMR, CMI, CMP e ASA-CMI). A Figura 8 exibe uma excepcional correspondência entre a distribuição dos grupos de soluções com as áreas aflorantes das formações Mosquito e Sardinha. Nas regiões limítrofes da bacia, o mapeamento semiautomático também gera grupos de soluções para assinaturas magnéticas associadas a fontes geofísicas presentes no embasamento, principalmente onde o pacote sedimentar é pouco espesso ou ausente. Acompanhando a distribuição espacial dos *clusters* é possível mapear contatos, que podem ser litológicos, e assim propor limites laterais entre o pacote sedimentar da bacia (zonas onde há soluções esparsas) e os corpos magmáticos (zonas com nuvens de soluções do SOM).

De maneira geral, as soluções do SOM são concordantes com os domínios e lineamentos magnéticos, interpretados

manualmente. Porém, analisando a distribuição espacial dos *clusters*, notam-se zonas internas aos domínios magnéticos, onde não existem soluções. Tal fato não indica necessariamente ausência de fontes magnéticas, tampouco de estruturas geológicas com magnetismo menos intenso. Alguns parâmetros dos levantamentos aeromagnéticos, como espaçamento das linhas de voo, altura de voo, entre outros, são importantes para a precisão do método SOM em mapear as fontes magnéticas associadas às rochas magmáticas. Como corroborado nas soluções obtidas a partir os dados do Projeto da ANP de alta resolução, que são consideravelmente em maior número do que na região adjacente àquela levantada pelo Projeto 1027 da CPRM (Figuras 4 e 8).

Em toda a Bacia do Parnaíba, as soluções do SOM mais diretamente relacionadas às rochas magmáticas subaflorantes estão concentradas em cinco regiões nos quatro principais domínios magnéticos. Os domínios magnéticos MqO e MqS representam as áreas de maiores concentrações de soluções nas porções oeste e sul da bacia, respectivamente. Essas nuvens de soluções são coincidentes com os corpos magmáticos da Formação Mosquito que afloram nessas regiões (Figura 3). Os conjuntos de soluções com padrões mais dispersos e orientados para NE-SW ou N-S refletem a estruturação tectônica do embasamento pré-cambriano, controlada pelos lineamentos Transbrasiliano e Araguaia (Figuras 1 e 2). No Domínio SdL, os *clusters* ocorrem de forma mais dispersa em uma vasta área da bacia, estando mais concentrados nas porções norte, centro-oeste e centro-leste, formando faixas com poucas ou com nenhuma solução. Assim, embora o Domínio Magnético SdL, com base na ASA, indique amplas zonas magnéticas em subsuperfície nessa região, as nuvens de soluções do SOM sugerem que as fontes magnéticas nesse domínio se comportam de forma mais restrita. No Domínio SdC, as soluções do SOM também apresentam zonas isoladas de formato arredondado ou alinhadas de direção ENE-WSW. Essas parecem ter continuidade ao longo do Domínio SdL, que também apresenta soluções alinhadas de direção ENE-WSW na porção sul.

Dados sísmicos

Duas seções sísmicas 2D, cedidas pela ANP previamente processadas em tempo, revelam o comportamento dos corpos magmáticos em profundidade, além de permitirem correlações entre anomalias magnéticas e suas principais fontes causadoras no interior da bacia e em seu embasamento cristalino, identificação do empilhamento estratigráfico e da arquitetura interna da bacia. Por meio das informações litoestratigráficas de poços foi possível viabilizar o reconhecimento dos refletores associados ao topo e à base das unidades, bem como interpretar a posição na coluna estratigráfica dos corpos tabulares (ex. soleiras e diques). Detalhes sobre as correções entre dados de poços e seções sísmicas da Bacia do Parnaíba podem ser vistos em De Castro et al. (2016).

Um bom exemplo é a seção sísmica L4 (Figura 9), localizada na porção leste da bacia e inserida no Domínio Magnético SdL (Figuras 7 e 8), que exhibe três sequências tectono-sedimentares (II – Siluriana/Eodevoniana; III – Mesodevoniana/Eocabornífera, IV – Neocabornífera/

Eotriássica), evidenciando o estilo de deposição do tipo *sag* da bacia. Por toda a seção, observa-se a presença de diversas soleiras, sobretudo concentradas na parte centro-noroeste da seção sísmica e intrudidas nas sequências II (Grupo Serra Grande) e IV (Grupo Balsas). As anomalias magnéticas

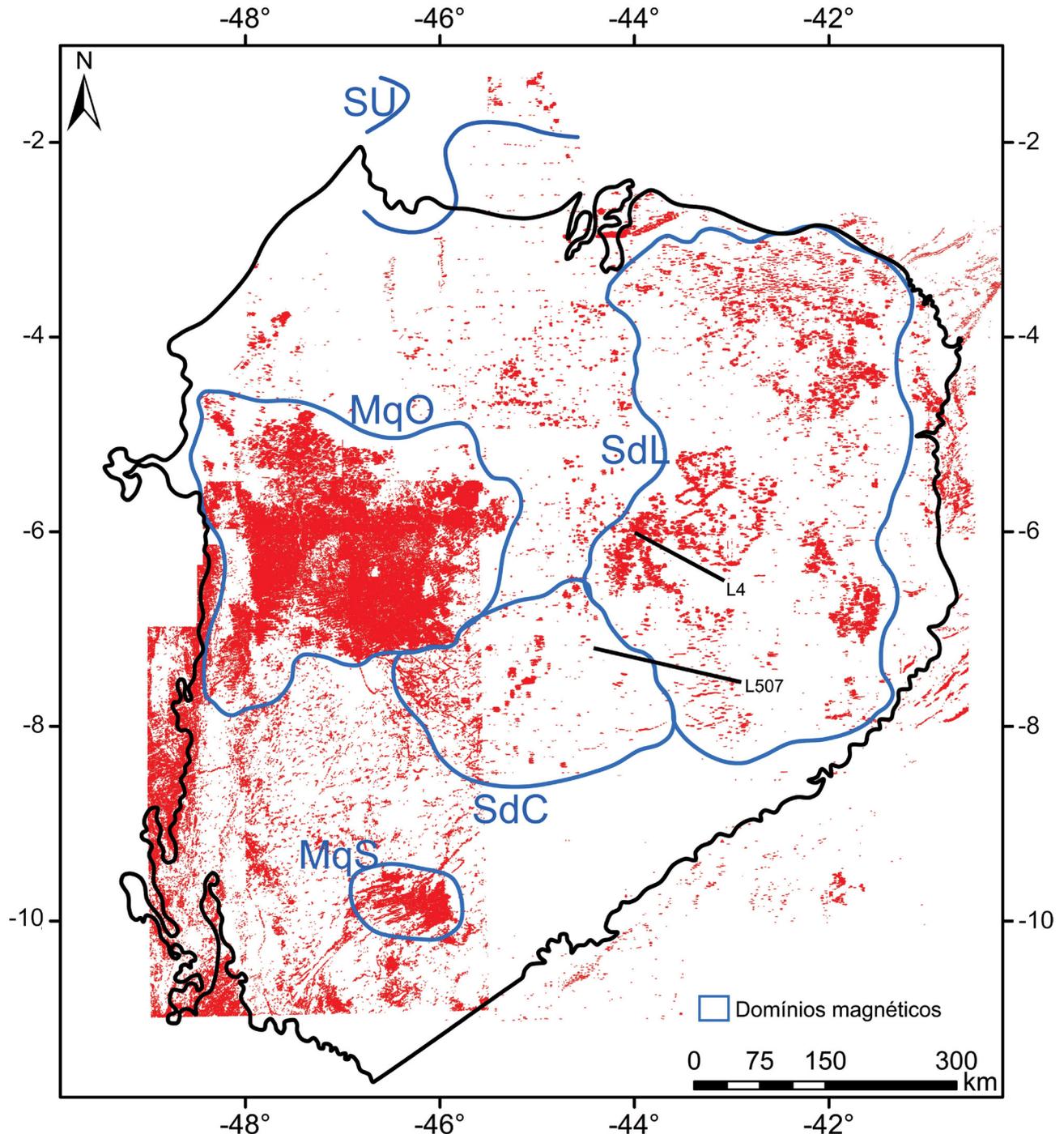


Figura 8. Soluções (*clusters*) do mapeamento semiautomático dos corpos magmáticos da Bacia do Parnaíba, com base nos dados magnéticos aerolevantados. Linhas sísmicas: L4 (Figura 9) e L507 (Figura 10).

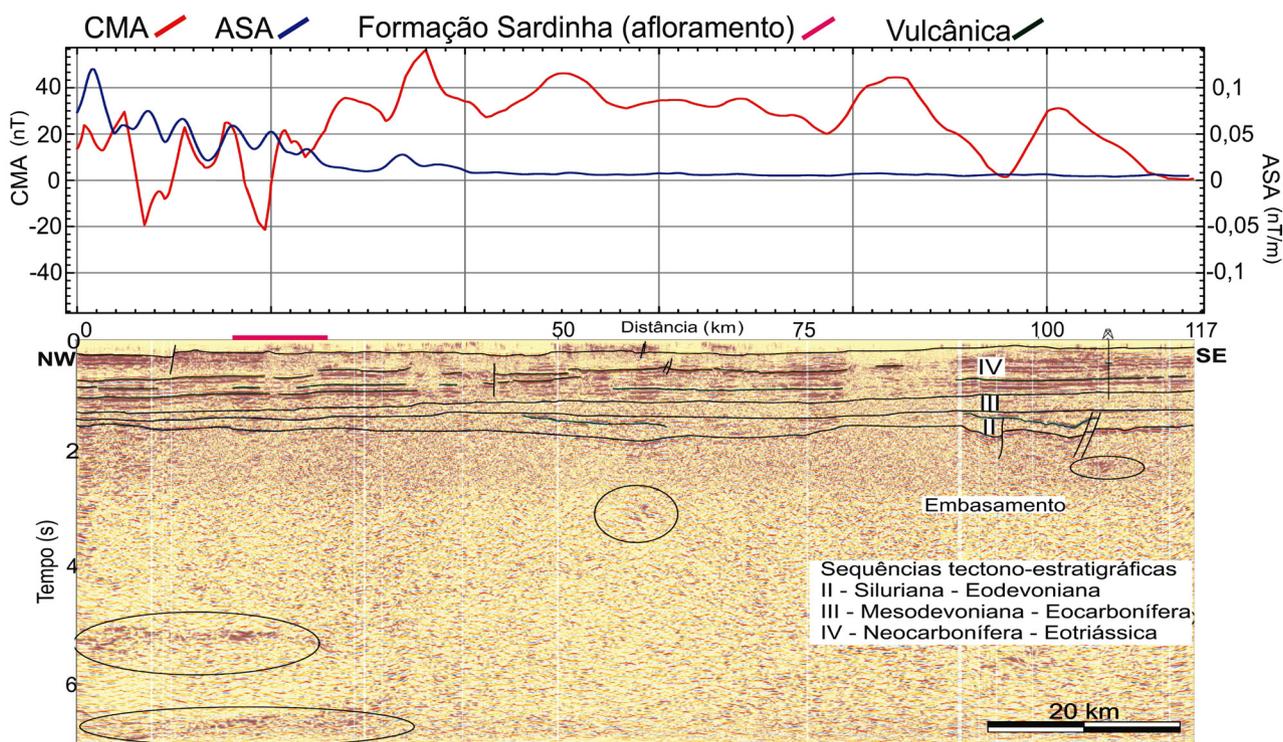
negativas (CMA) e as altas amplitudes de sinal analítico ocorrem no setor NW da seção sísmica L4 (Figura 9). Esse padrão magnético possivelmente é devido à presença de rochas magmáticas subaflorantes da Formação Sardinha, juntamente com as soleiras intrusivas no pacote sedimentar do Grupo Balsas entre profundidades de 500 e 1.500 m.

Desse modo, correlacionando com as anomalias de altas amplitudes do sinal analítico, espera-se que as rochas magmáticas da Formação Sardinha tenham uma área de ocorrência maior em profundidade do que a porção aflorante. Nessa região, seqüências de refletores de altas amplitudes ocorrem em torno de 5,2 a 6,8 s (~ 7,5 a 11 km) e, provavelmente, refletem expressões profundas do magmatismo mesozoico regional. A partir da distância de 27 km do início do perfil geofísico, as anomalias magnéticas são essencialmente positivas (até 50 nT), com maiores comprimentos de onda, e as amplitudes do sinal analítico tornam-se praticamente nulas. Interpreta-se que esse arranjo magnético pode ser produzido pela ausência de rochas magmáticas mais próximas à superfície, ou, em outras palavras, apenas a presença de soleiras em maiores profundidades poderia ser a causa desse padrão magnético. Adicionalmente, refletores de alta amplitude que ocorrem no embasamento (elipses pretas – Figura 9) parecem indicar manifestações profundas de corpos magmáticos

intrusivos, que possivelmente incrementam as anomalias magnéticas de longo comprimento de onda do CMA.

Na seção sísmica L507 (Figura 10), que passa por uma parte considerável do domínio Magnético SdL, De Castro et al. (2016) interpretaram cinco seqüências tectono-sedimentares, a saber: a seqüência I corresponde à fase rifte cambriana e preenche uma feição grabenforme de 120 km de extensão e 4,5 km de profundidade, cujo desdobramento espacial incorpora várias outras depressões secundárias, limitadas por falhas normais. A parte leste do graben representa reativações de zonas de cisalhamento do embasamento e coincide com o Lineamento Transbrasiliiano em superfície. As seqüências superiores (II, III e IV) foram depositadas entre o Siluriano e o Eotriássico e confirmam uma sedimentação em estilo *sag*. Extensas soleiras e diques intrudem as seqüências Siluriana-Eodevoniana (Grupo Serra Grande) e Mesodevoniana-Eocarbonífera (Grupo Canindé), que, por sua vez, apresentam-se afetadas por falhas normais e lísticas.

O CMA e a ASA apresentam oscilações de pequena amplitude na parte NW da seção sísmica L507 (Figura 10). Esse padrão magnético pode ser associado à existência de soleiras, cuja estimativa de profundidade encontra-se em cerca de 1,2 km. A partir da distância de 72 km do início do perfil geofísico, ocorre uma seqüência de anomalias



CMA: campo magnético anômalo; ASA: amplitude do sinal analítico.

Figura 9. Anomalias magnéticas do campo magnético anômalo e amplitude do sinal analítico ao longo da seção sísmica L4, destacando seqüências tectono-sedimentares e estruturas magmáticas da Bacia do Parnaíba. Os refletores de alta amplitude circundados parecem indicar manifestações profundas de corpos intrusivos.

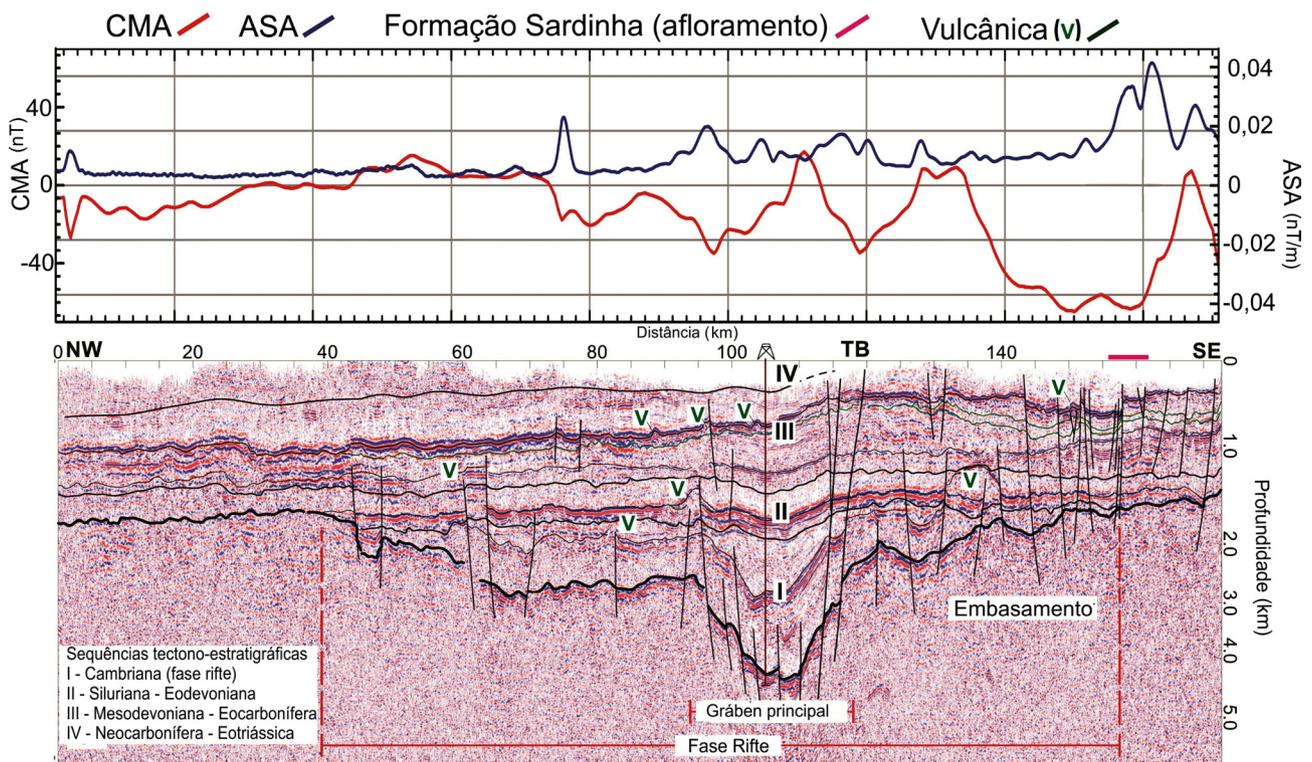
magnéticas negativas de até -47 nT. Concomitantemente, as amplitudes do sinal analítico aumentam para SE até alcançarem valores máximos no extremo SE da seção sísmica, onde afloram rochas magmáticas da Formação Sardinha. Nesse mesmo contexto, a justaposição lateral entre rochas sedimentares e ígneas, proporcionada por falhas normais, claramente gera anomalias magnéticas de alta amplitude.

DISCUSSÕES

A identificação dos domínios e lineamentos magnéticos, por meio dos dados aeromagnéticos e do mapeamento semiautomático, possibilitou identificar a distribuição espacial dos dois principais eventos magmáticos mesozoicos em pauta e analisar o controle estrutural exercido pelas estruturas pretéritas da Bacia do Parnaíba no seu alojamento subsuperficial. Ademais, os dados de susceptibilidade magnética permitiram constatar contrastes de susceptibilidade magnética entre os corpos ígneos e sua encaixante sedimentar, enquanto a integração do método potencial com as informações advindas da sísmica foi fundamental para estabelecer correlações entre as anomalias magnéticas e as estruturas magmáticas em subsuperfície.

Assinatura magnética do embasamento cristalino

Nas bordas da bacia, correlacionaram-se anomalias e lineamentos magnéticos, bem como os resultados obtidos na técnica SOM, com as feições litoestruturais do embasamento cristalino. O Domínio Magnético SU exibe anomalias magnéticas com os maiores comprimentos de onda (~ 20 km), quando comparado com os domínios anteriores. Isso sugere fontes magnéticas mais profundas, como as suítes intrusivas proterozoicas na região do Cráton São Luís (Figura 1). No nordeste da bacia, próximo ao Domínio SdL, *clusters* do SOM e anomalias de alta amplitude no mapa da ASA, com direção ENE-WSW (Figuras 7 e 8), podem ser correlacionados às estruturas da Zona de Cisalhamento Tentugal (Figura 1). Adicionalmente, observa-se que a Bacia de Barreirinhas é bem delineada por uma zona de baixa amplitude do sinal analítico. Na borda leste da bacia, as anomalias da ASA e diversas soluções do SOM são correlacionadas às zonas de cisalhamento brasileiras (Transbrasiliano, Senador Pompeu, Patos e Pernambuco) da Província Borborema. Na borda oeste, os adensamentos de soluções do SOM e os lineamentos magnéticos de direção N-S são associados à Faixa de Dobramentos Araguaia. Por fim,



CMA: campo magnético anômalo; ASA: amplitude do sinal analítico; TB: Lineamento Transbrasiliano.

Figura 10. Anomalias magnéticas campo magnético anômalo e amplitude do sinal analítico ao longo da seção sísmica L507, destacando sequências tectono-sedimentares e estruturas magmáticas na região de zona rifte cortada pelo Lineamento Tranbrasiliano (adaptado de De Castro et al., 2016).

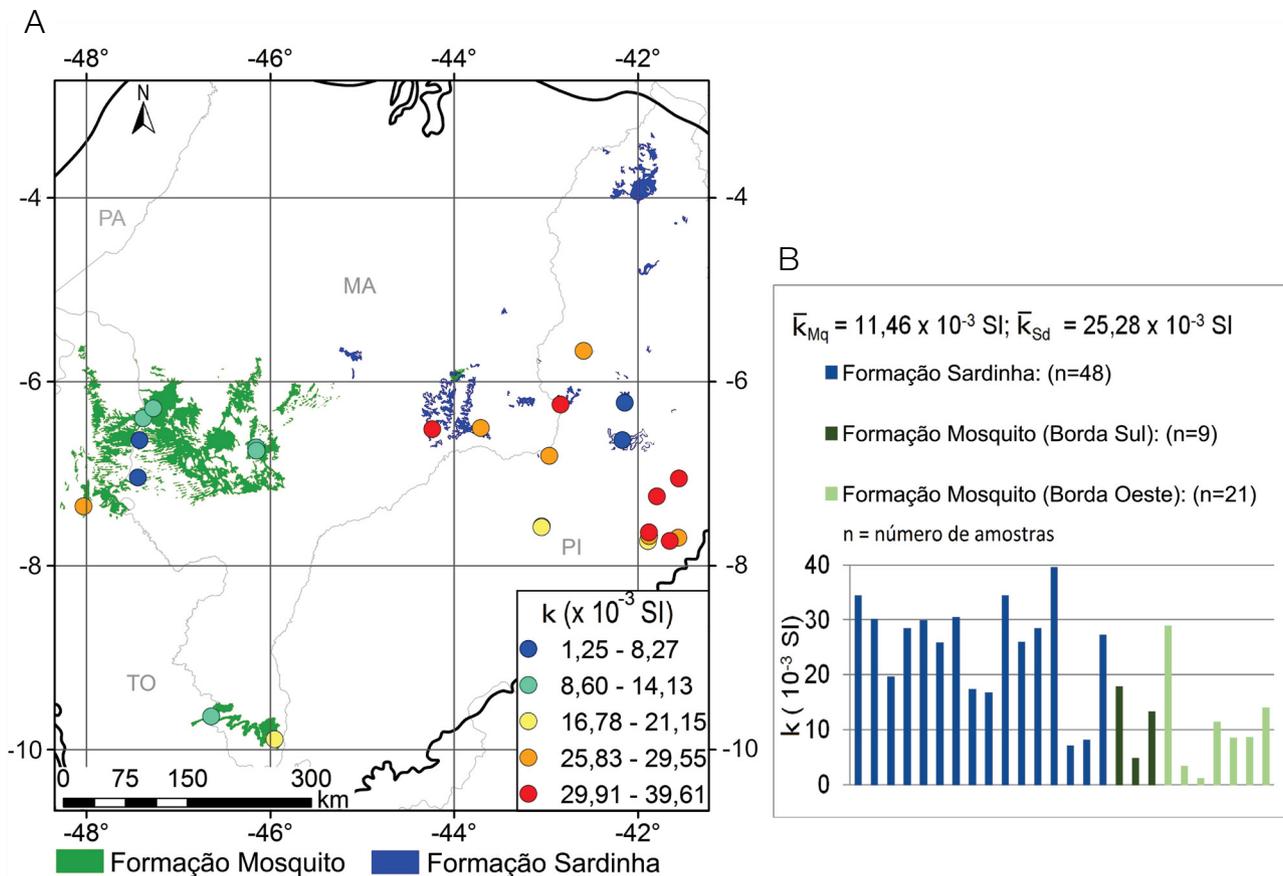
observa-se que no sul da bacia o conjunto de soluções do SOM alinhadas na direção NE que atravessam o Domínio MqS parecem estar associadas ao Lineamento Transbrasiliiano (Figura 1).

Distribuição do Magmatismo Mesozoico

Há extensos afloramentos da Formação Mosquito na região dos domínios magnéticos MqO e MqS (Figura 3). Essa unidade geológica é formada por rochas ígneas, como basaltos e diabásios (Figuras 11A e 12), que mineralogicamente apresentam elevado conteúdo de óxido Fe-Ti em sua composição e, conseguinte, exibe intensa resposta magnética. Os dados da susceptibilidade magnética, coletados em campo, mostram forte contraste de susceptibilidade magnética entre as rochas ígneas da Formação Mosquito, com valor médio de $11,46 \times 10^{-3}$ SI (Figura 11B), e sua encaixante sedimentar, arenitos da Formação Sambaíba com valores em torno de $0,6 \times 10^{-3}$ SI. Tal contraste de susceptibilidade magnética é suficientemente forte para gerar anomalias magnéticas, como as que ocorrem nos mapas de CMA e ASA ao longo

dos domínios MqO e MqS (Figuras 6 e 7), permitindo com isso a interpretação dos domínios magnéticos MqO e MqS como correlatos à Formação Mosquito. Com efeito, seguindo o padrão de altas amplitudes no mapa da ASA e as soluções do SOM, pode-se propor que o Magmatismo Mosquito possui uma área de ocorrência maior que a do mapeamento geológico de superfície, ao longo dos domínios MqO e MqS (Figura 3). Conseqüentemente, na borda oeste, a Formação Mosquito deve ter continuidade subaflorante na forma de vastos derrames e/ou soleiras, intercalados nos pacotes sedimentares do Grupo Balsas e na Sequência Jurássico-Cretácea, enquanto que, na borda sul, o alojamento se processa intrudindo as rochas sedimentares do Grupo Balsas e da Bacia Sanfranciscana (grupos Urucuia e Areado).

Em todo o Domínio Magnético SdL existem afloramentos da Formação Sardinha (Figura 13), cuja litologia encerra basaltos e diabásios de granulação fina a média (Figura 12), que, dentre outros minerais, possuem altos conteúdos de magnetita em sua composição (Fodor et al., 1990; Baksi e Archibald, 1997; Lima, 2014). As rochas sedimentares nesse domínio são, em geral, conglomerados, arenitos, siltitos e folhelhos,



k_{Mq} : Susceptibilidade média da Formação Mosquito; k_{Sd} : Susceptibilidade média da Formação Sardinha.

Figura 11. (A) Mapa de localização dos pontos de medição da susceptibilidade magnética de rochas ígneas das formações Mosquito e Sardinha. (B) histograma da susceptibilidade magnética média de rochas ígneas da Bacia do Parnaíba.

apresentando magnetização incipiente. Segundo os dados de campo, a susceptibilidade magnética média das rochas ígneas da Formação Sardinha é $25,28 \times 10^{-3}$ SI, e dos arenitos, $0,6 \times 10^{-3}$ SI (Figura 11B). Os contrastes de susceptibilidade magnética entre os corpos ígneos e suas encaixantes resultam em anomalias magnéticas de alta amplitude no CMA e no sinal analítico (Figuras 6 e 7), que podem ser interpretadas como o Domínio Magnético SdL ao Magmatismo Sardinha. As seções sísmicas indicam que quanto mais rasos e em maior quantidade são as soleiras e os diques, geralmente intrudidos nos grupos Balsas, Canindé e Serra Grande, maiores são as amplitudes das anomalias magnéticas (CMA e ASA) (Figuras 9 e 10). Com isso, embora os afloramentos da Formação Sardinha apresentem distribuição em áreas menores, espera-se uma extensão em subsuperfície maior na borda leste da bacia (Domínio SdL) (Figura 14).

Localizada na região central da bacia, a região do Domínio Magnético SdC é caracterizada pela exposição de rochas sedimentares carboníferas/triássicas do Grupo Balsas (arenitos e folhelhos em geral), que normalmente exibem anomalias magnéticas de baixa amplitude, onde os comprimentos de onda são mais longos do que as anomalias do Domínio SdL, chegando a 15 km. Tal configuração das anomalias permite inferir que as fontes magnéticas podem estar em profundidades consideráveis na bacia. Além disso, no Domínio SdC, os lineamentos magnéticos, tal como ocorre no SdL, exibem orientação preferencial E-W (Figura 7B), o que permite interpretar o Domínio Magnético SdC como ocorrências mais isoladas e profundas do que o Magmatismo Sardinha na porção mais central da Bacia do Parnaíba (Figura 14).

Sob uma abordagem comparativa entre as duas atividades ígneas, notam-se diferenças importantes nos resultados, a saber: com relação aos dados de campo, o Magmatismo Sardinha apresentou susceptibilidade magnética média de

$25,2 \times 10^{-3}$ SI, o que é aproximadamente duas vezes maior do que aquelas apresentadas pelo Magmatismo Mosquito ($\sim 11,46 \times 10^{-3}$ SI; Figura 11B). Tais resultados são consistentes com os resultados de Lima (2014), os quais mostraram que os toleitos da Formação Sardinha, com relação à Formação Mosquito, apresentam maior conteúdo modal de titano-magnetita, ilmenita, e olivina, minerais cujas susceptibilidades magnéticas são acentuadamente maiores. Por outro lado, quando confrontados os domínios magnéticos MqO e MqS com o SdL e SdC entre si, observa-se que as amplitudes das anomalias magnéticas e do sinal analítico exibem maiores valores para os domínios associados à Formação Mosquito, embora esse último apresente menor susceptibilidade magnética. Uma plausível explicação para isso seria considerar que o Magmatismo Mosquito tem uma ocorrência mais volumosa e em menores profundidades, algo sugerido pelas modelagens de profundidade obtidas a partir do atributo de *Matched Filter*, quais sejam, 600 m para Formação Mosquito e 900 m para a Formação Sardinha.

Controles tectônicos

O tectonismo causador da abertura do Atlântico Sul também foi responsável por forte deformação distensional na Bacia do Parnaíba, tendo como produtos falhas normais regionais, sobretudo na porção central. Concomitantemente, esse tectonismo foi capaz de gerar consideráveis volumes de magma básico continental, denotando dois picos distintos de atividade ígnea: as chamadas formações Mosquito e Sardinha, cada uma guardando sua própria evolução geodinâmica e, por conseguinte, assinaturas geofísicas próprias, conforme mencionado anteriormente. No centro da Bacia ocorrem áreas abatidas em subsuperfície, provavelmente associadas a um sistema de riftes de direções ENE-WSW e NNE-SSW,

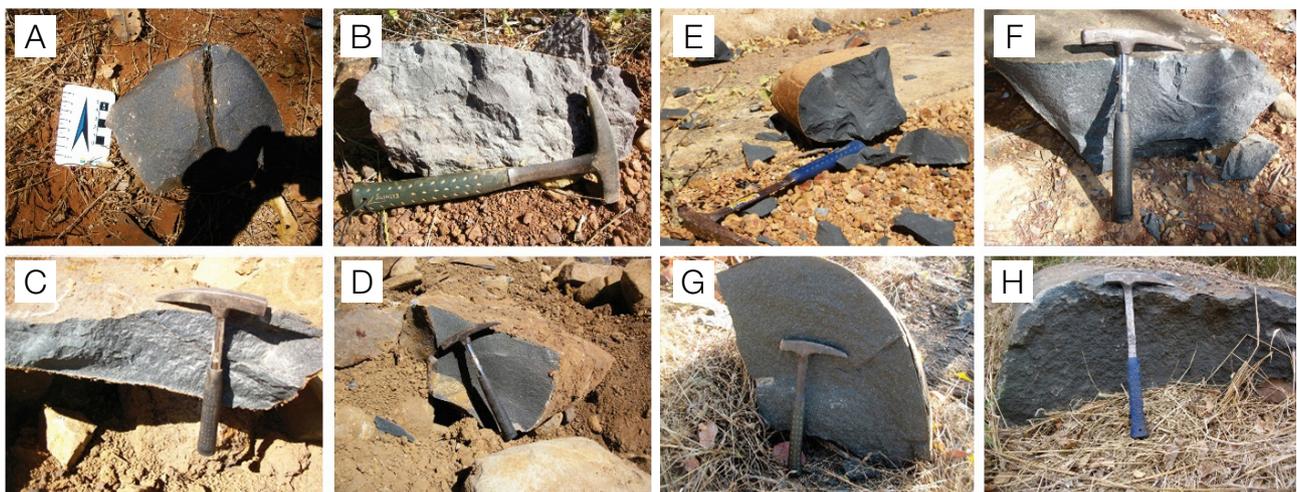
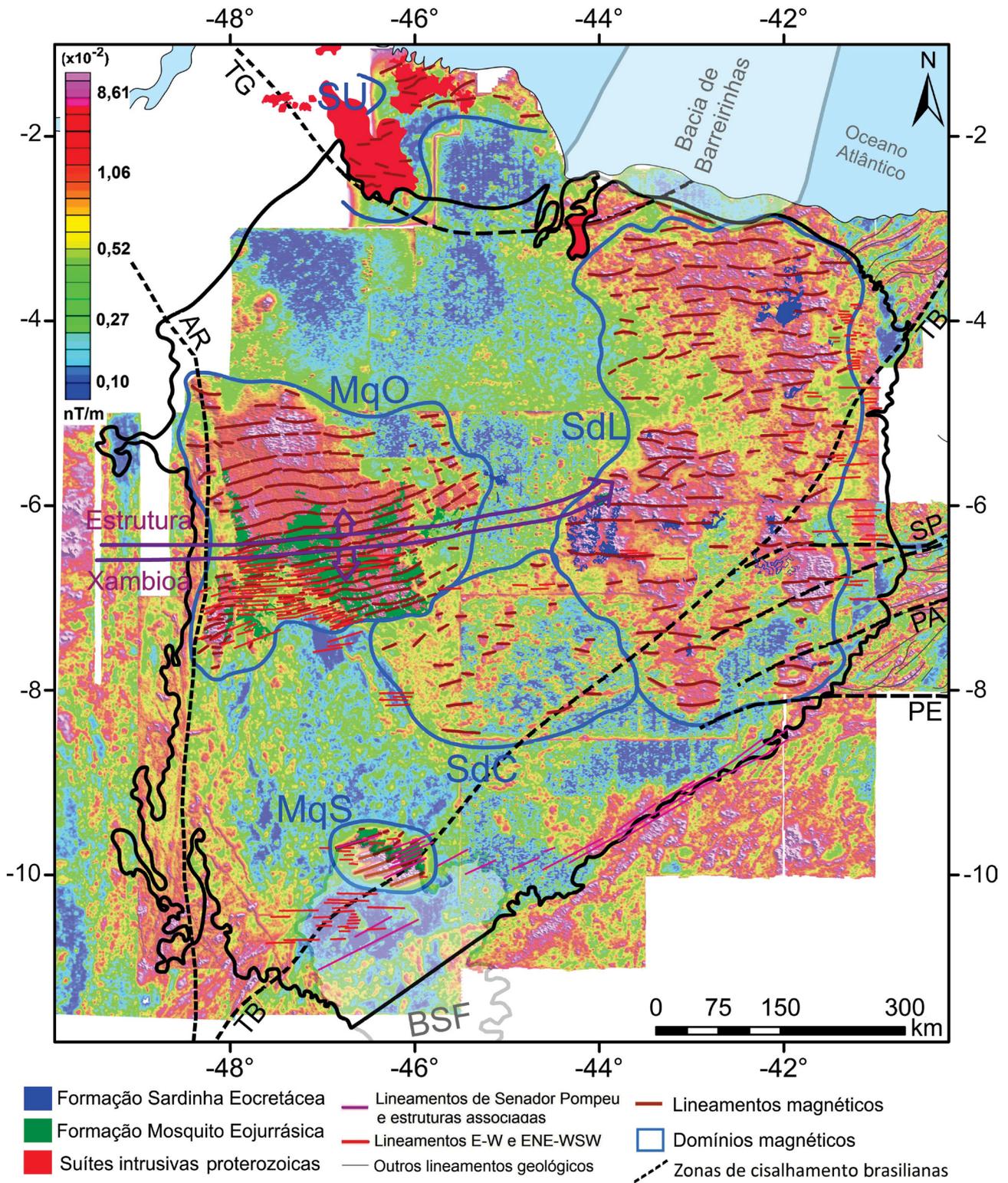


Figura 12. Afloramentos de diabásios da Formação Mosquito na (A) borda sul e (B, C e D) na borda oeste, e (E, F, G e H) da Formação Sardinha na borda leste da Bacia do Parnaíba.



Zonas de cisalhamento Brasileiras: Ar: Araguaia; PA: Patos; PE: Pernambuco; SP: Senador Pompeu; TB: Transbrasiliano; TG: Tentugal. Áreas com contorno azul são os domínios magnéticos (MqO, MqS, SdL, SdC e SU). BSF: Bacia Sanfranciscana.

Figura 13. Mapa da amplitude do sinal analítico com a localização das suítas intrusivas proterozoicas no Cráton São Luís e das formações Mosquito e Sardinha na Bacia do Parnaíba.

como consequência de eventos distensionais de direção NE-SW, que também foram responsáveis por capturar os centros alimentadores das atividades magmáticas.

No Domínio MqO, os lineamentos magnéticos exibem *trend* relativamente encurvado com direções que vão de ENE-WSW

e E-W, na porção centro-oeste, para NE-SW, na porção leste, similares aos eixos das direções das falhas normais, associados a estruturas grabeniformes (Figura 7B). As direções dos lineamentos magnéticos indicam que o sistema de falhas normais exerceu controle estrutural no Magmatismo Mosquito na borda oeste

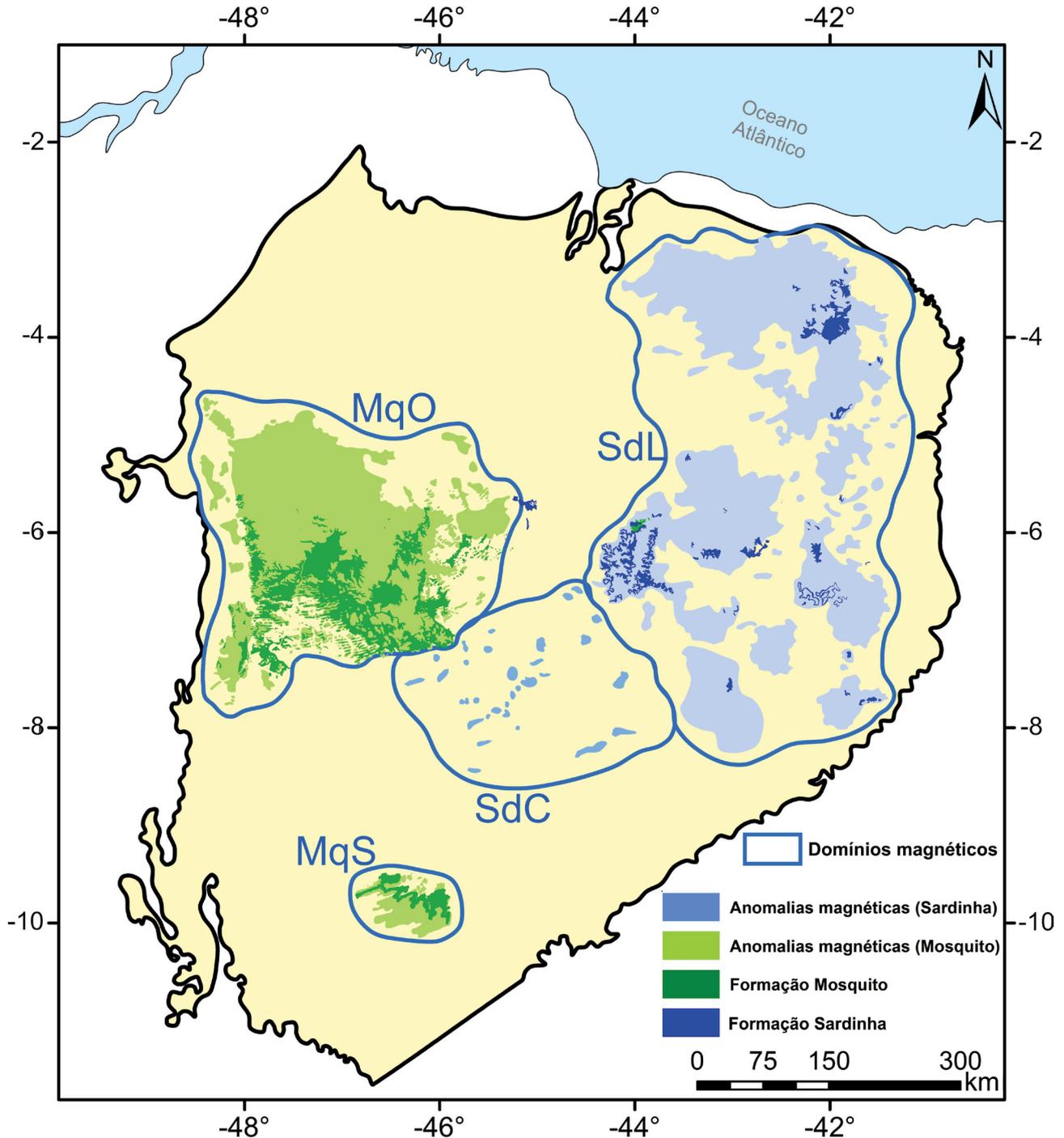


Figura 14. Mapa geofísico/geológico interpretativo, exibindo afloramentos das formações Mosquito e Sardinha e a distribuição espacial das anomalias magnéticas associadas ao magmatismo mesozoico da Bacia do Parnaíba.

da bacia, que, por sua vez, é alinhado por grábens que ocorrem sobre anisotropias do embasamento que ocorrem sobre o Arco de Xambioá, funcionando como eixo deposicional (Góes, 1995).

Relacionados ao Lineamento Transbrasiliano, observam-se *trends* secundários de direção ENE-WSW, especialmente aquele associado com a Zona de Cisalhamento de Senador Pompeu a nordeste da Bacia, enquanto *trends* E-W ocorrem na sua borda oeste. Essas direções estruturais são francamente correlacionáveis às assinaturas magnéticas do Domínio MqS, que é associado ao Magmatismo Mosquito na porção sul, e dos domínios SdC e SdL, atrelados ao Magmatismo Sardinha, que claramente guardam semelhança com as respectivas direções mencionadas anteriormente (Figura 7B). Embora o principal controle sobre o magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba seja campos de esforços distensivos NE-SW (Costa et al., 1991; Hasui e Haralyi, 1991), anisotropias estruturais de escala bacinal, associadas ao Lineamento Transbrasiliano, como os *trends* E-W e o Lineamento Senador Pompeu, parecem exercer controle estrutural fundamental na distribuição dos corpos ígneos da Formação Mosquito, na borda sul, e na Formação Sardinha, na porção leste da bacia.

Além disso, no período entre o fim da Colagem Brasileira Neoproterozoico-Eopaleozoica e o início da deposição *sag* no Siluriano, pelo menos dois sistemas de riftes compõem o arcabouço estrutural da Bacia do Parnaíba (De Castro et al., 2014; 2016). O sistema rifte mais expressivo no substrato da bacia é registrado por um conjunto de grábens Cambriano-Ordovicianos, que afloram parcialmente na borda da bacia e estendem-se sob a Bacia do Parnaíba, identificados em poços exploratórios e seções sísmicas (Brito Neves et al., 1984; Góes et al., 1990; Oliveira e Mohriak, 2003; De Castro et al., 2016) e por interpretações de dados gravimétricos terrestres e aeromagnéticos (Nunes, 1993). Amplos baixos magnéticos e pseudo-gravimétricos localizados nas regiões dos domínios MqO, MqS e SdL estão claramente associados a possíveis grábens de orientação E-W, sotopostos às sequências *sag* pertencentes à Bacia do Parnaíba, nas regiões do Domínio MqO, e NE-SW, na região dos domínios MqS e SdL (Figura 1). Essas estruturas grabeniformes foram resultantes da quebra continental durante a transição do Neoproterozoico para o Eofanerozoico, que separou Laurentia e Báltica do Gondwana Oeste (Oliveira e Mohriak, 2003; De Castro et al., 2014). Nesse contexto, tratam-se de profundas descontinuidades crustais que sitiaram tanto a subsidência mecânica quanto foram responsáveis por capturar, localizar e guiar as áreas com concentração de corpos ígneos.

CONCLUSÕES

A aplicação de técnicas de realce de anomalias magnéticas e de um método de SOM em dados magnéticos de diversos levantamentos aéreos executados na Bacia do Parnaíba possibilitou inferir a posição de rochas ígneas subaflorantes dos

dois principais eventos magmáticos mesozoicos (Mosquito e Sardinha). Os padrões magnéticos anômalos associados às rochas magmáticas nos mapas geofísicos são anomalias de alta amplitude e curto comprimento de onda. Com a utilização do método SOM foi possível aprimorar a delimitação das anomalias geofísicas presentes nos mapas magnéticos e propor um mapa interpretativo de mais alta resolução. Seguindo o padrão das anomalias magnéticas e o adensamento de soluções do SOM diretamente relacionadas aos corpos magmáticos aflorantes, foi possível estimar os contatos dessas rochas e de outros corpos recobertos pelo pacote sedimentar e, assim, reconhecer a extensão mais realística dos eventos magmáticos que afetaram a bacia.

Cinco domínios magnéticos foram definidos com base na assinatura magnética padrão das rochas magmáticas na bacia. Os domínios magnéticos MqO e MqS foram correlacionados à Formação Mosquito e ocupam vastas áreas nas porções oeste e sul da bacia. O Domínio MqO tem dimensões de 360 km de comprimento por 330 km de largura e o Domínio MqS, de 130 km de comprimento por 83 km de largura. Já os domínios magnéticos SdL e SdC foram correlacionados à Formação Sardinha e apresentam maior extensão areal, ocupando as porções centro-leste e nordeste da bacia. O Domínio SdL tem dimensão 600 km de comprimento por 300 km de largura. No caso particular da Formação Sardinha, a integração das interpretações dos dados sísmicos com os magnéticos sugere que as anomalias magnéticas (CMA e ASA) estão associadas às soleiras e aos diques intrusivos, alojados geralmente nos grupos Serra Grande, Canindé e Balsas, e são sensivelmente influenciados por rochas ígneas aflorantes ou subaflorantes.

O Magmatismo Sardinha apresentou susceptibilidade magnética média de $25,2 \times 10^{-3}$ SI, aproximadamente duas vezes superior aos valores medidos para as rochas do Magmatismo Mosquito, $11,46 \times 10^{-3}$ SI. De acordo com as profundidades médias estimadas das fontes causativas das anomalias magnéticas e as amplitudes anômalas do sinal analítico, observamos que possivelmente o Magmatismo Mosquito deve ter uma ocorrência mais volumosa e em menores profundidades do que o Magmatismo Sardinha.

Baseado na direção dos lineamentos magnéticos, sugere-se que feições estruturais pretéritas influenciaram a distribuição do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba. A localização da atividade ígnea encontra-se sobre zonas de descontinuidades herdadas do embasamento cristalino, incluindo as estruturas grabeniformes ligadas à fase rifte da Bacia. Com efeito, observa-se que riftes de direção ENE-WSW e NNE-SSW exerceram forte controle, sobretudo, no Magmatismo Mosquito, borda oeste da bacia. Adicionalmente, *trends* estruturais de direção W-E e do Lineamento de Senador Pompeu, ambos relacionados à Zona de Cisalhamento Transbrasiliano, foram mais efetivos na distribuição da atividade magmática intrínseca à Formação Mosquito, na borda Sul.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do Projeto nº 471064/2013-0, à Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pela cessão dos dados sísmicos e aeromagnéticos, ao Serviço Geológico do Brasil/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) pela cessão dos dados aeromagnéticos e à dGB pela licença educacional do OpendTect. Esta pesquisa contou com o apoio do Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia para Estudos Tectônicos (INCT-ET). Os autores também agradecem ao CNPq por suas bolsas de mestrado e produtividade, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- Abreu, F. A. M., Lesquer, A. (1985). Considerações sobre o pré-cambriano da região sul-sudoeste do Cráton São Luís. *II Simpósio de Geologia da Amazônia* (v. 2, 7-21). Belém.
- Almeida, F. M. A. (1986). Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós- paleozoico no Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(4), 325-349.
- Almeida, F. M. A., Carneiro, C. D. R. (2004). Inundações marinhas Fanerozoicas no Brasil e recursos minerais associados. In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C. D. R. Carneiro, B. B. Brito Neves (Eds.), *Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida* (43-48). São Paulo: Beca.
- Baksi, A. K., Archibald, D. A. (1997). Mesozoic igneous activity in the Maranhão province, northern Brazil: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for separate episodes of basaltic magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 151(3), 139-153.
- Bellieni, G., Macedo, M. H. F., Petrini, R., Piccirillo, E. M., Cavazzini, G., Comin-Chiaramonti, P., Ernesto, M., Macedo, J. W. P., Martins, G., Melfi, A. J., Pacca, I. G., De Min, A. (1992). Evidence of magmatic activity related to Middle Jurassic and Lower Cretaceous rifting from northeastern Brazil (Ceará-Mirim): K/Ar age, palaeomagnetism, petrology and Sr-Nd isotope characteristics. *Chemical Geology*, 97, 9-32.
- Bezerra, P. E. L. (1996). *Neotectônica e morfogênese da Região de Carolina (MA, TO), Bacia do Parnaíba*. Dissertação (Mestrado). Belém: UFPA. 235p.
- Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. (2014). The basement of the South American platform: Half Lau- rentian (N-NW) + half Gondwanan (E-SE) domains. *Precambrian Research*, 244, 75-86.
- Brito Neves, B. B., Fuck, R. A., Cordani, U. G. (1984). Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: a case of tectonic heritage. *Journal of Geodynamics*, 1(3-5), 495-510.
- Carneiro, C. D. C., Fraser, S. J., Crósta, A. P., Silva, A. M., Barros, C. E. D. M. (2012). Semiautomated geologic mapping using self-organizing maps and airborne geophysics in the Brazilian Amazon. *Geophysics*, 77(4), 17-24.
- Castelo Branco, R. M. G., Coimbra, A. M. (1984). Contribuição ao conhecimento tecto-magmático da borda sul da Bacia do Parnaíba. *XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia* (v. 2, 84). Rio de Janeiro: SBG.
- Chamani, M. A. C. (2015). *Tectônica sinsedimentar no Siluro-Devoniano da Bacia do Parnaíba, Brasil: o papel de grandes estruturas do embasamento na origem e evolução de bacias intracratônicas*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP.
- Coimbra, A. M. (1983). *Estudo sedimentológico e geoquímico do permo-triássico da Bacia do Maranhão*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP.
- Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais - CPRM/Geobank (2015). *Cartas Geológicas do Brasil ao Milionésimo*. Acesso em: 10 de novembro de 2015, <<http://geobank.cprm.gov.br>>.
- Cordani, U. G., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A., Porto, R., Thomaz Filho, A., Cunha, F. M. B. (1984). Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. *Ciência Técnica Petróleo*, Seção Exploração de Petróleo, 15, 70p.
- Costa, J. B. S., Borges, M. S., Igreja, H. L. S., Hasui, Y. (1991). Borda sul da Bacia do Parnaíba e sua relação com o arcabouço pré-cambriano. *III Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos* (93-95). São Paulo: SBG.
- Cunha, F. M. B. (1986). *Evolução Paleozoica da Bacia do Parnaíba e seu Arcabouço Tectônico*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: UFRJ.
- Daly, M. C., Andrade, V., Barousse, C. A., Costa, R., McDowell, K., Piggott, N., Poole, A. J. (2014). Brazilian crustal structure and the tectonic setting of the Parnaíba basin of NE Brazil: Results of a deep seismic reflection profile. *Tectonics*, 33, 2102-2120.
- De Castro, D. L., Bezerra, F. H., Fuck, R. A., Vidotti, R. M. (2016). Geophysical evidence of pre-sag rifting and post-rifting fault reactivation in the Parnaíba basin, Brazil. *Solid Earth*, 7(2), 529-548.

- De Castro, D. L., Fuck, R. A., Phillips, J. D., Vidotti, R. M., Bezerra, F. H., Dantas, E. L. (2014). Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics*, 614, 128-145.
- Fodor, R. V., Sial, A. N., Mukasa, S. B., McKee, E. H. (1990). Petrology, isotope characteristics, and K-Ar ages of the Maranhão, northern Brazil, Mesozoic basalt province. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104(5), 555-567.
- Geosoft. (2010). *Montaj GridKnit*. Grid stitching extension for Oasis Montaj V7.1. Tutorial and users guide. Toronto: Geosoft Incorporation. 28p.
- Góes, A. D. O., Feijó, F. J. (1994). Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8(1), 57-67.
- Góes, A. D. O., Souza, J. D., Teixeira, L. B. (1990). Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 4(1).
- Góes, A. M. (1995). *Formação Poti (Carbonífero inferior) da Bacia do Parnaíba*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP.
- Hasui, Y., Abreu, F. A. M., Villas, R. N. N. (1984). Província Parnaíba. In: F. F. M. Almeida e Y. Hasui (Coords.), *O Pré-Cambriano no Brasil* (36-45). São Paulo: Blücher.
- Hasui, Y., Haralyi, N. L. E. (1991). Aspectos lito-estruturais e geofísicos do soerguimento do Alto Paranaíba. *Geociências*, 10, 57-77.
- Isles, D. J., Rankin, L. R. (2013). *Geological Interpretation of Aeromagnetic Data*. Austrália: The Australian Society of Exploration Geophysicists. 657p.
- Kearey, P., Brooks, M., Hill, I. (2013). *An introduction to geophysical exploration*. Nova York: John Wiley & Sons. 272p.
- Klein, E. L., Angélica, R. S., Harris, C., Jourdan, F., Babinski, M. (2013). Mafic dykes intrusive into Pre-Cambrian rocks of the São Luís cratonic fragment and Gurupi Belt (Parnaíba Province), north-northeastern Brazil: Geochemistry, Sr-Nd-Pb-O isotopes, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology, and relationships to CAMP magmatism. *Lithos*, 172-173, 222-242.
- Klein, E. L., Moura, C. A., Krymsky, R. S., Griffin, W. L. (2005). The Gurupi belt, northern Brazil: lithostratigraphy, geochronology, and geodynamic evolution. *Precambrian Research*, 141(3), 83-105.
- Lima, N. M. (2014). *Caracterização petroquímica das rochas ígneas de um poço exploratório na Bacia do Parnaíba*. Dissertação (Mestrado). Rio de Janeiro: UFRJ.
- Marzoli, A., Renne, P. R., Piccirillo, E. M., Ernesto, M., Bellieni, G., De Min, A. (1999). Extensive 200-million-year-old continental flood basalts of the Central Atlantic Magmatic Province. *Science*, 284(5414), 616-618.
- Merle, R., Marzoli, A., Bertrand, H., Reisberg, L., Verati, C., Zimmermann, C., Chiaradia, M., Bellieni, G., Ernesto, M. (2011). $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and Sr-Nd-Pb-Os geochemistry of CAMP tholeiites from Western Maranhão basin (NE Brazil). *Lithos*, 122, 137-151.
- Milani, E. J., Thomaz Filho, A. (2000). Sedimentary basins of South America. In: Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. *Tectonic Evolution of South America*, 31th International Geological Congress. Rio de Janeiro, 389-452.
- Nunes, K. C. (1993). Interpretação integrada da Bacia do Parnaíba com ênfase nos dados aeromagnéticos. 3th International Congress of the Brazilian Geophysical Society (152-157). Rio de Janeiro: SBGF.
- Oliveira, D. C., Mohriak, W. U. (2003). Jaibaras through: an important element in the early tectonic evolution of the Parnaíba interior sag basin, Northern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 20(3), 351-383.
- Phillips, J. D. (2001). Designing matched band pass and azimuthal filters for the separation of potential-field anomalies by source region and source type. 15th Australian Society of Exploration Geophysicist (4). Austrália: Geophysical Conference and Exhibition.
- Silva, A. D., Lopes, R. D. C., Vasconcelos, A. M., Bahia, R. B. C. (2003). Bacias sedimentares paleozoicas e mesozóicas interiores. In: L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti, J. H. Gonçalves (Eds.), *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil* (55-85). Brasília: Serviço Geológico do Brasil/MME.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Thomaz Filho, A. T., Nizuzaki, A. M. P., Milani, E. J., Cesero, P. D. (2008). Rifting and magmatism associated with the South America and Africa break up. *Brazilian Journal of Geology*, 30(1), 17-19.
- Vaz, P. T., Rezende, N. G. A. M., Wanderley Filho, J. R., Travassos, W. A. S. (2007). Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 253-263.
- Zembruski, S. G., Campos, J. N. P. (1988). Comportamento geotérmico regional e provável movimentação de fluidos na Bacia do Parnaíba, Maranhão. *Boletim de Geociência da Petrobras*, 2(2/4), 133-145.