

RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO APLICADO AOS SEDIMENTOS CENOZOICOS NA ILHA DO MARANHÃO, NORDESTE DO BRASIL

*GROUND PENETRATING RADAR APPLIED ON CENOZOIC SEDIMENTS IN THE MARANHÃO
ISLAND, NORTHEAST BRAZIL*

**Cláudio José da Silva de SOUSA¹, Welitom Rodrigues BORGES², Marcio Maciel
CAVALCANTI², Karina Suzana Feitosa PINHEIRO¹**

¹Universidade Estadual do Maranhão. Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de Engenharia Civil. Cidade Universitária. Rua Paulo VI, s/n. São Cristóvão. São Luis – MA. E-mail: claudiojose@professor.uema.br; karinapinho@professor.uema.br

²Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Campus Universitário Darcy Ribeiro ICC – Ala Central. Brasília – DF. E-mail: welitom@unb.br; marciomacielcavalcante@gmail.com

Introdução
Contexto geológico regional da área de estudo
Materiais e métodos
Resultados e discussão
Padrões de reflexão nas seções de radar
Contextualização dos padrões de reflexão da geologia local
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - Esse trabalho investiga os sedimentos cenozoicos na Ilha do Maranhão, nordeste do Brasil, a partir de radar de penetração no solo, antena blindada de 200 MHz e unidade de controle SIR3000. Perfis de reflexão obtidos entre a planície litorânea e os tabuleiros costeiros foram processados no módulo 2D data analysis do Reflex-Win. As seções GPR destacam reflexões de alta amplitude, contínuas a moderadamente contínuas, a aproximadamente 4 m de profundidade, separando duas regiões: uma rasa, de baixas amplitudes, com reflexões hiperbólicas a caóticas; e outra profunda, com amplitudes moderadamente altas, descontínuas, sinuosas, entremeadas por feições hiperbólicas a caóticas e por zonas de atenuação. Informações geológicas e de levantamentos regionais fundamentaram a correlação dos sinais de alta amplitude à superfície de descontinuidade sobreposta ao Grupo Barreiras. Ela é marcada por paleossolo laterítico, concreções ferruginosas, relevo erosional e sotoposta aos Sedimentos Pós-Barreiras. Hidrogeologicamente, essa discordância pode se constituir em uma superfície de retenção hídrica, favorável à formação de aquíferos suspensos, bem como de surgências ao longo das falésias costeiras. Feições indicativas de dobras, falhas e fraturas em profundidade, com continuidade nos depósitos rasos, sugerem a ação da tectônica neogênica resultante da reativação de falhas transcorrentes ao longo da margem passiva equatorial brasileira.

Palavras-chave: Radar de penetração no solo. Sedimentos cenozoicos. Ilha do Maranhão.

ABSTRACT - This work investigates the Cenozoic sediments in Maranhão Island, northeastern Brazil, from ground penetrating radar surveys, using a 200 MHz shielded antenna coupled to a SIR3000 control unit. Reflection profiles obtained between the plain and coastal hills were processed in Reflex-Win using the 2D data analysis module. Radargrams highlight continuous, moderately continuous reflections at approximately 4 m depth, separating two regions: one shallow, low amplitude, with hyperbolic to chaotic reflections; and another deep, with moderately high, discontinuous, winding amplitudes, interspersed with hyperbolic to chaotic features and attenuation zones. Geological information and regional surveys supported the correlation of high amplitude signals to the surface of discontinuity at the top of the Barreiras Group. It is under the Post Barreiras Sediments and is marked by lateritic palaeosol, ferruginous concretions and erosional relief. Hydrogeologically, this unconformity may constitute a water retention surface, favorable for lateral runoff, the formation of suspended aquifers, as well as emergence along the coastal cliffs. Features indicative of folds, faults and deep fractures, with continuity in shallow deposits, suggest the action of neogenic tectonics resulting from the reactivation of current faults along the Brazilian equatorial passive margin.

Keywords: Ground penetrating radar. Cenozoic sediments. Maranhão Island.

INTRODUÇÃO

O mapeamento geológico de áreas neógenas e quaternárias é dificultado pelo escasso número de afloramentos rochosos. Um método auxiliar na determinação da profundidade de sedimentos e rochas, bem como de suas estruturas internas, é o *Ground Penetrating Radar* – GPR (Bristow & Jol, 2003; Baker & Jol, 2007; Jol, 2008).

A utilização do GPR é um método geofísico de superfície, não destrutivo e não invasivo, que faz uso de fontes artificiais responsáveis pela emissão

de ondas eletromagnéticas em alta frequência para a obtenção de imagens de alta resolução do subsolo através equipamentos apropriados (Annan, 2001). Além da fonte, a qualidade da imagem produzida depende das características físicas do meio, das condições de levantamento, da habilidade na aquisição das medidas e das técnicas de processamento aplicadas aos dados coletados.

O GPR é usado em várias áreas do conhecimento, tais como: geologia, hidrogeologia, geo-

física aplicada, caracterização de solos, mapeamento de pluma de contaminação, análise de pavimentos e de estruturas de construção civil, mapeamento de alvos urbanos (tubulações, galerias etc.), arqueologia, ciência forense, dentre outras (Beres Jr. & Haeins, 1991; Vereecken et al., 2006; Sunjay, 2009).

Quanto à geologia, o GPR é empregado em sedimentologia, na interpretação de unidades estratigráficas, delimitadas por superfícies de descontinuidade, reconhecidas nas seções por reflexões de elevada amplitude; na associação de padrões de reflexão a estruturas sedimentares, auxiliando na caracterização de ambientes deposicionais (Smith & Jol, 1995; Rossetti & Góes, 2001; Neal, 2004; Robinson et al., 2013; Souza et al., 2014; Tamura et al., 2016); na investigação de feições

geológicas estruturais em subsuperfície e suas correlações com os eventos tectônicos neogênicos e quaternários (Souza, 2010); e na análise sedimentar de transição entre fases transgressiva/regressiva em bacias costeiras (Lima, 2012).

No presente trabalho, os registros de GPR foram usados na investigação dos Sedimentos Cenozoicos da Ilha do Maranhão, mais precisamente nos depósitos quaternários, representados pelos Sedimentos Pós-Barreiras, no contato entre os Tabuleiros Costeiros Litorâneos e o Litoral de Mangues e Rias. Essa região é marcada pela presença de vegetação de influência fluviomarinha (manguezal), vegetação secundária no domínio da Floresta Ombrófila Aberta com palmeiras; e quanto aos solos, de predominância de Gleissolos, Latossolos e Argissolos.

CONTEXTO GEOLÓGICO-REGIONAL DA ÁREA DE ESTUDO

A Ilha do Maranhão está localizada na porção leste da Bacia Intracratônica de São Luís (Figura 1) que juntamente com as bacias de Bragança-Viseu e de Ilha Nova integra o Sistema de Grábens do Gurupi (Azevedo, 1991). Sua origem remonta ao final do Aptiano e início do Albiano, no Cretáceo Superior, durante o rifteamento do Megacontinente Gondwana (Hasui, 2012) e a Abertura do Oceano Atlântico Equatorial. A unidade geotectônica aludida é limitada: a norte, pela Plataforma da Ilha de Santana, separando-a das bacias marítimas do Pará-Maranhão e Barreirinhas (porção submersa); a sul, pelo Arco Ferrer-Rosário-Bacaba, que a divide da Bacia de Grajaú; a leste, pelo Horst de Rosário, separando-a da porção emersa da Bacia de Barreirinhas; a oeste, pelo Arco do Gurupi, que confronta a Bacia de Bragança-Viseu; e a nordeste, pelo Alto de Curupu, limitando-a com a Bacia de Ilha Nova (Rezende & Pamplona, 1970; Rezende & Araújo, 1970; Gorini, 1981; Aranha et al., 1988).

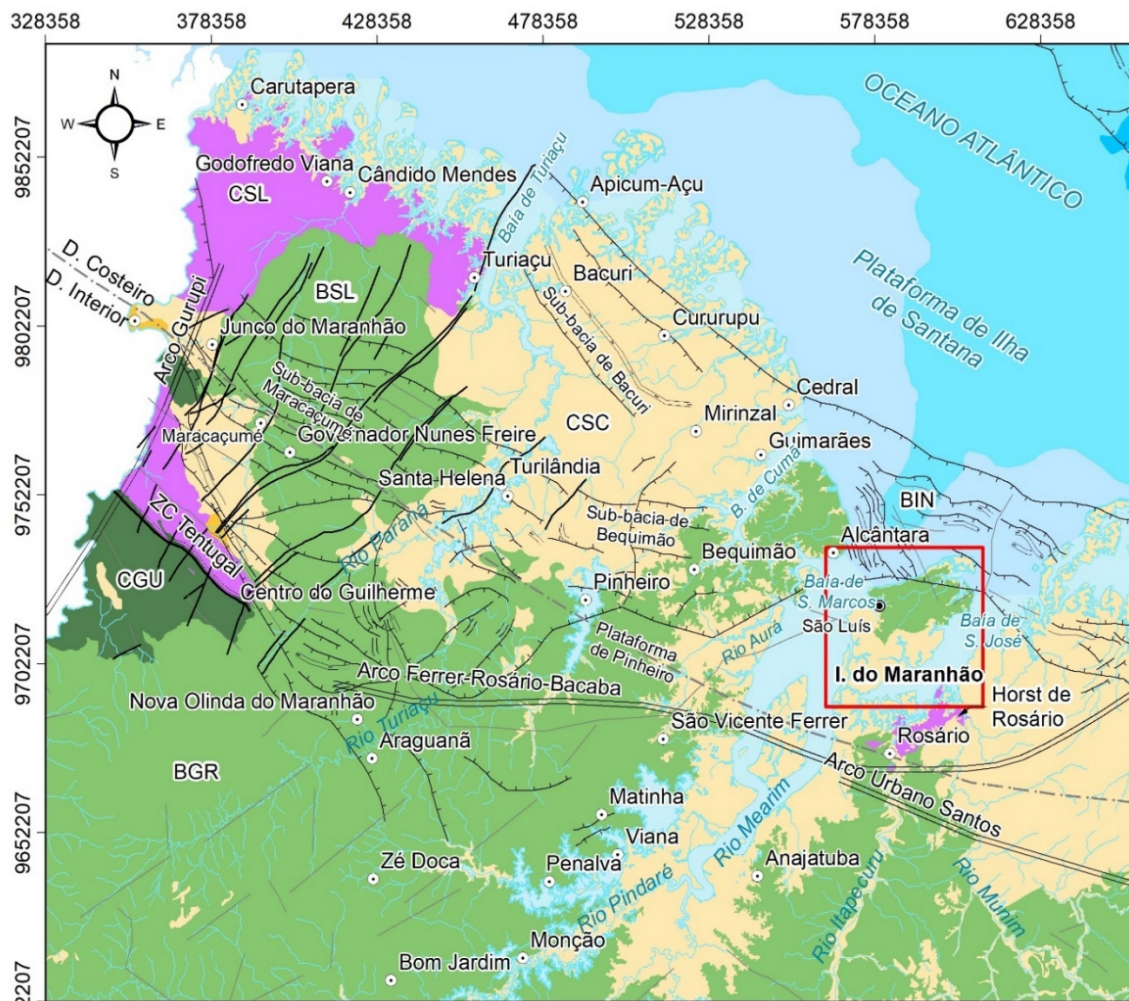
O embasamento da bacia é constituído por rochas pré-silurianas do Cráton de São Luís e do Cinturão Orogênico do Gurupi (Gorayeb et al., 1999; Klein & Moura, 2003); por rochas sedimentares cambro-ordovicianas da Formação Bequimão, constituída predominantemente de metapelitos cinza escuros a avermelhados, intercalados com arenitos, conglomerados e diamictitos - porção basal (Aranha et al., 1988); por rochas devonianas da Formação Pimenteiras, representada por arenitos e folhelhos e, subordinadamente, basaltos e diamictitos (Zalan, 2007).

A base dos depósitos cretáceos na Bacia de

São Luís é constituída pelo Sistema Codó/Grajaú (Lima et al., 1994), do Neoaptiano, composto por arenitos médios da Formação Grajaú, concordantes com folhelhos escuros, localmente betuminosos, intercalados com lentes de calcário e gipsita/anidrita, e arenitos finos esbranquiçados da Formação Codó (Batista, 1992; Pedrão, 1995).

Os depósitos do Grupo Itapecuru estão sobrepostos concordantemente ao Sistema Codó/Grajaú. Eles são formados pela Unidade Indiferenciada, do Albiano; pela Formação Alcântara, do Cenomaniano, constituída por arenitos, pelitos e, subordinadamente, calcários e conglomerados; e pela Formação Cujupe, do Turoniano ao Paleoceno (Santos & Carvalho, 2009), composta por arenitos caulínicos, intercalados a argilitos e, subordinadamente, conglomerados (Rossetti & Truckenbrodt, 1997; Rossetti, 2001).

Os depósitos do Oligo-Mioceno e Mioceno na Bacia de São Luís estão relacionados à Sucessão Pirabas/Barreiras, sobreposta discordantemente aos depósitos cretáceos, e constituída por arenitos, argilitos e, em menor proporção, conglomerados e calcários (Rossetti, 2000, 2006; Rossetti et al., 2013a). Essa unidade litoestratigráfica encontra-se sotoposta discordantemente aos depósitos arenosos finos a médios, maciços, denominados Sedimentos Pós-Barreiras. No litoral maranhense, entre cidades de Alcântara e Guimarães, eles foram datados entre o Neopleistoceno e o Neoholoceno (Rossetti et al., 2013b), idade semelhante àquela encontrada no Nordeste do Pará (Tatumi et al., 2008) e na Bacia do Paraíba (Rossetti et al., 2011a, b, 2012a).



Domínios Tectônicos

- Cenozóico
- CSC Coberturas Superficiais
- Fanerozóico
- BBR Bacia de Barreirinhas
- BSL Bacia de São Luís
- BIN Bacia de Ilha Nova
- BGR Bacia de Grajaú
- Neoproterozóico
- CGU Cinturão Gurupi
- Paleoproterozóico
- CSL Cráton São Luís
- Batimetria (m)**
- 0-25
- 25-50
- 50-75

Convenções cartográficas

- Cidades
- Capital estadual
- Curso d'água
- Corpos d'água
- Retângulo envolvente à Ilha do Maranhão
- Retângulo envolvente à Bacia de São Luís

Estruturas

- Alto estrutural
- Calha da bacia
- - Domínios
- Falha transcorrente
- Falha indiscriminada
- Falha normal
- Zona de falha



Fonte: Pastana (2001), Vasconcelos et al. (2004), Sousa et al. (2012).

Figura 1 - Localização da Ilha do Maranhão na Bacia Intracratônica de São Luís.

MATERIAIS E MÉTODO

Os fundamentos do radar de penetração no solo são baseados em Porsani (1999), Annan (2001), Borges (2007), Daniels et al. (2008). Trata-se de um método geofísico não invasivo, de alta frequência (normalmente entre 10 e 1.000 MHz),

em que ondas de rádio são irradiadas em subsuperfície através de uma antena transmissora e a parcela refletida é capturada por uma antena receptora.

A intensidade do sinal refletido é função das

propriedades condutivas e dielétricas dos materiais em subsuperfície. É um método indicado para ambientes de baixa perda onde a energia dissipada (associada a correntes de condução) é pequena quando comparada a energia armazenada (relacionada à corrente de deslocamento).

As propriedades do campo de onda são a velocidade, a atenuação e a impedância. A capacidade do radar de penetração no solo de detectar a posição e os atributos geométricos dos objetos em profundidade depende da resolução, a qual é formada por duas componentes: uma longitudinal e outra lateral, sendo ambas funções da frequência central da antena. Esse parâmetro é empregado para definir o intervalo de amostragem no tempo e no espaço que serão empregados no levantamento GPR.

Os levantamentos GPR são operados através de três modos: perfis de reflexão, sondagens de velocidade e transiluminação ou tomografia. O primeiro método é conhecido como *Common-offset*, onde as antenas transmissora e receptora são mantidas com uma distância fixa, sendo transportadas ao longo do perfil.

Este procedimento pode ser obtido pelo modo passo-a-passo, ou *step mode*, onde as antenas são puxadas pelas mãos de maneira repetitiva, ou pelo modo contínuo, em que são rebocadas por carros ou pelas mãos, mas sem interrupções durante a aquisição dos dados.

O resultado é um perfil (radargrama) em que no eixo horizontal estão as distâncias e no eixo vertical as reflexões em função do tempo duplo do sinal GPR.

Os termos básicos para descrever os atributos dos perfis de reflexão de radar (radargramas) são derivados em parte daqueles usados em estratigrafia sísmica (Mitchum et al., 1977). Os perfis de reflexão de radar são interpretados a partir da definição das fácies de radar (radarfácies), as quais são descritas em termos da forma, mergulho, relacionamento e continuidade das reflexões (Neal, 2004). As terminações das reflexões, na base e no topo das fácies de radar, configuram superfícies delimitadoras denominadas de superfícies de radar (Neal & Roberts, 2001; Neal et al., 2002). Elas representam quebras ou discontinuidades entre conjunto de reflexões os quais capturam a estrutura primária dos pacotes sedimentares (Neal, 2004).

As investigações na Ilha do Maranhão foram realizadas no período de 09 a 14 de março de

2013, totalizando 21,97 km de linhas, no sentido do Litoral de Mangues e Rias em direção aos Tabuleiros Costeiros Maranhenses (Figura 2).

Os levantamentos visaram a identificação de superfícies de discontinuidades entre Sedimentos Pós-Barreiras e o Grupo Barreiras. Elas constituem contatos entre pacotes sedimentares contíguos, com estruturas internas diferenciadas, diagnósticas de alterações no padrão de deposição (Suguio, 2003; Pomerol et al., 2013).

Localmente, são superfícies intemperizadas, marcadas por relevo erosivo, concreções ferruginosas, paleossolo laterítico e representam marcadores estratigráficos relevantes na classificação dos depósitos sedimentares neogênicos e quaternários (Rossetti, 2000; Rossetti et al., 2013b). Sua detecção nas seções de radar está associada a mudanças significativas nas propriedades dielétricas e condutivas dos materiais geológicos em subsuperfície, resultando em sinais refletivos conspícuos, de importância particular em aplicações sedimentológicas de GPR (Neal, 2004).

As investigações foram executadas empregando-se uma unidade de controle, modelo SIR3000, (*Geophysical Survey Systems Inc.*) acoplada a uma antena blindada, modelo 5106, série 2434, com frequência de 200 MHz (Instituto Nacional de Criminalística – INC/Departamento de Polícia Federal).

Os dados GPR foram adquiridos empregando-se o modo de operação perfil de reflexão e a técnica denominada *Common-offset*.

Durante as aquisições, as antenas operaram em modo contínuo (rebocadas através de um veículo), com a orientação perpendicular ao percurso, segundo o padrão transversal elétrico – TE, que proporciona uma área de cobertura angular mais larga de um refletor em subsuperfície, e mantidas o mais próximo possível do terreno, visando minimizar a reflexão na interface ar-solo.

Os parâmetros de configuração do sistema para obtenção dos perfis de reflexão foram: espaçamento entre os traços: 0,05 m; amostragem temporal: 0,3417969 ns; número de amostras por traço: 1024; e janela temporal foi de 300 ns.

O processamento dos dados ocorreu no módulo 2D data analysis do software Reflex-Win (SANDMIER, 2012), no qual se deu a importância dos perfis no formato “DZT”. Em seguida, foi realizada a correção do tempo zero, empregando-se a opção *Static Correction/muting*, no

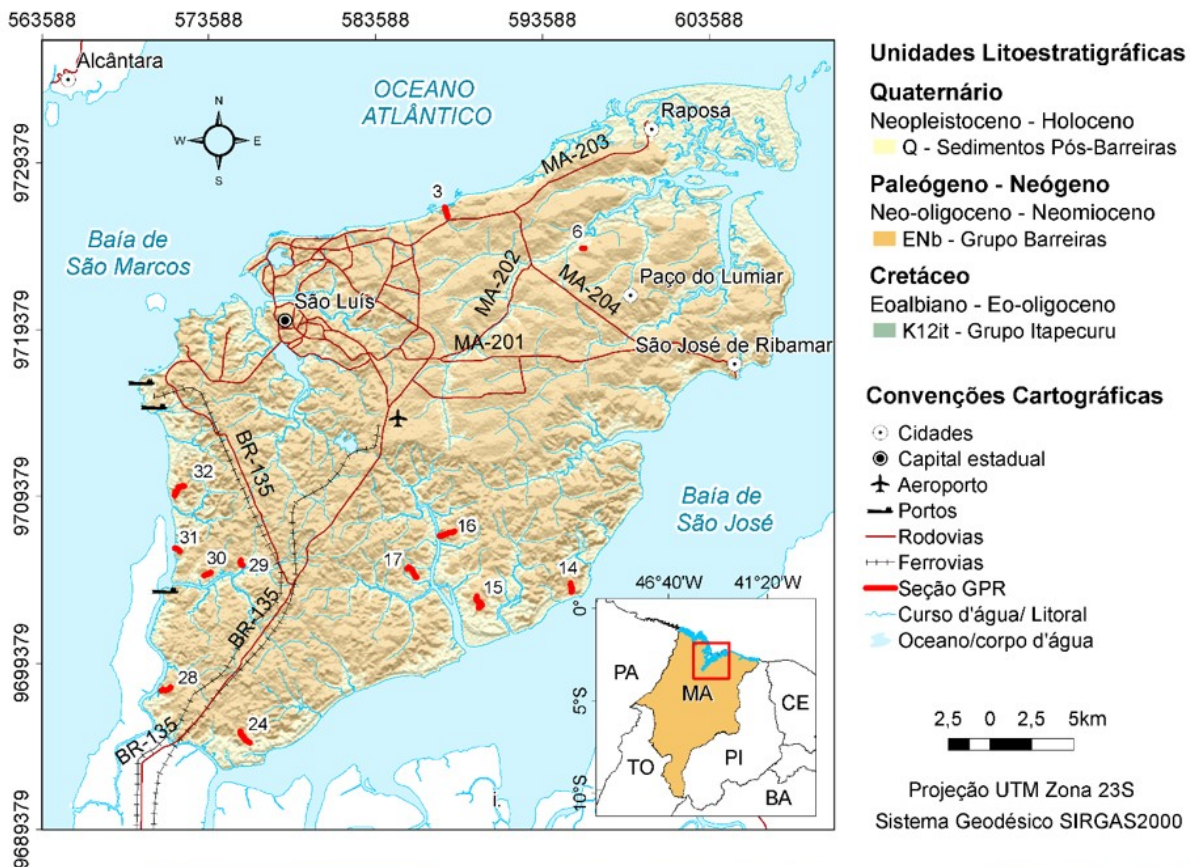


Figura 2 - Mapa geológico da Ilha do Maranhão com a localização das seções GPR e fotografias correspondentes às linhas de números 3, 6, 14, 15, 29 e 30.

menu *Processing*. Os ruídos instrumentais de baixa frequência foram removidos através do filtro unidirecional (*1D Filter*), *subtract-mean* (*dewow*).

Para realce das feições superficiais, foi aplicado um ganho de decaimento de energia (*energy-decay*) e para remoção da onda direta no solo foi aplicado o filtro bidimensional (*2D filter*) *background removal*. Os ruídos de alta frequência foram removidos através do filtro unidirecional (*1D Filter*).

Em seguida, realizou-se o ajuste hiperbólico, cujos parâmetros de velocidade (v , m/ns) e largura (*width*) foram empregados na migração (*Kirchhoff migration*). Após esse procedimento, as seções foram corrigidas topograficamente e interpretadas segundo os padrões de reflexão. Do total de dados obtidos, foram selecionadas as seções GPR representativas da geologia da área de estudo nas quais identificaram-se os padrões de reflexão e as feições estruturais características de depósitos sedimentares.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Padrões de Reflexão nas Seções de Radar

Na Ilha do Maranhão, as investigações GPR conduziram ao reconhecimento de estruturas sedimentares (Suguio, 2003) pré-deposicionais: superfícies de discontinuidades e paleocanais; sin-deposicionais: estratificação plana e cruzada; e pós-deposicionais: falhas e fraturas. Elas estão relacionadas às condições de transporte e empilhamentos sedimentares, bem como aos eventos neotectônicos que ocorreram na área de estudo.

Para fins descritivos, as estruturas sedimentares foram relacionadas a padrões de reflexão caracterizados segundo a forma, mergulho, relacionamento e continuidade dos refletores nas seções GPR (Neal, 2004). As feições foram observadas até a profundidade de aproximadamente 15

m, estimada a partir da velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio de 0,10 m/ns, obtida por meio de ajuste hiperbólico no *ReflexWin*, e segundo uma janela temporal de 300 ns.

Da análise das seções GPR obtidas, foram identificadas e selecionadas quatro radarfácies simbólicas dos depósitos sedimentares locais. A primeira, Rf1 (Figura 3A), na porção superior das seções, entre a 1 a 3 m de profundidade, é marcada em geral por reflexões de amplitude baixa e em alguns trechos por sinal de amplitude média a alta. Quanto à forma, elas foram classificadas como planares; em relação ao mergulho e ao relacionamento entre os refletores, como horizontais e subparalelas; e quanto à continuidade das feições, moderadamente contínuas a descontínuas, com presença de feições hiperbólicas.

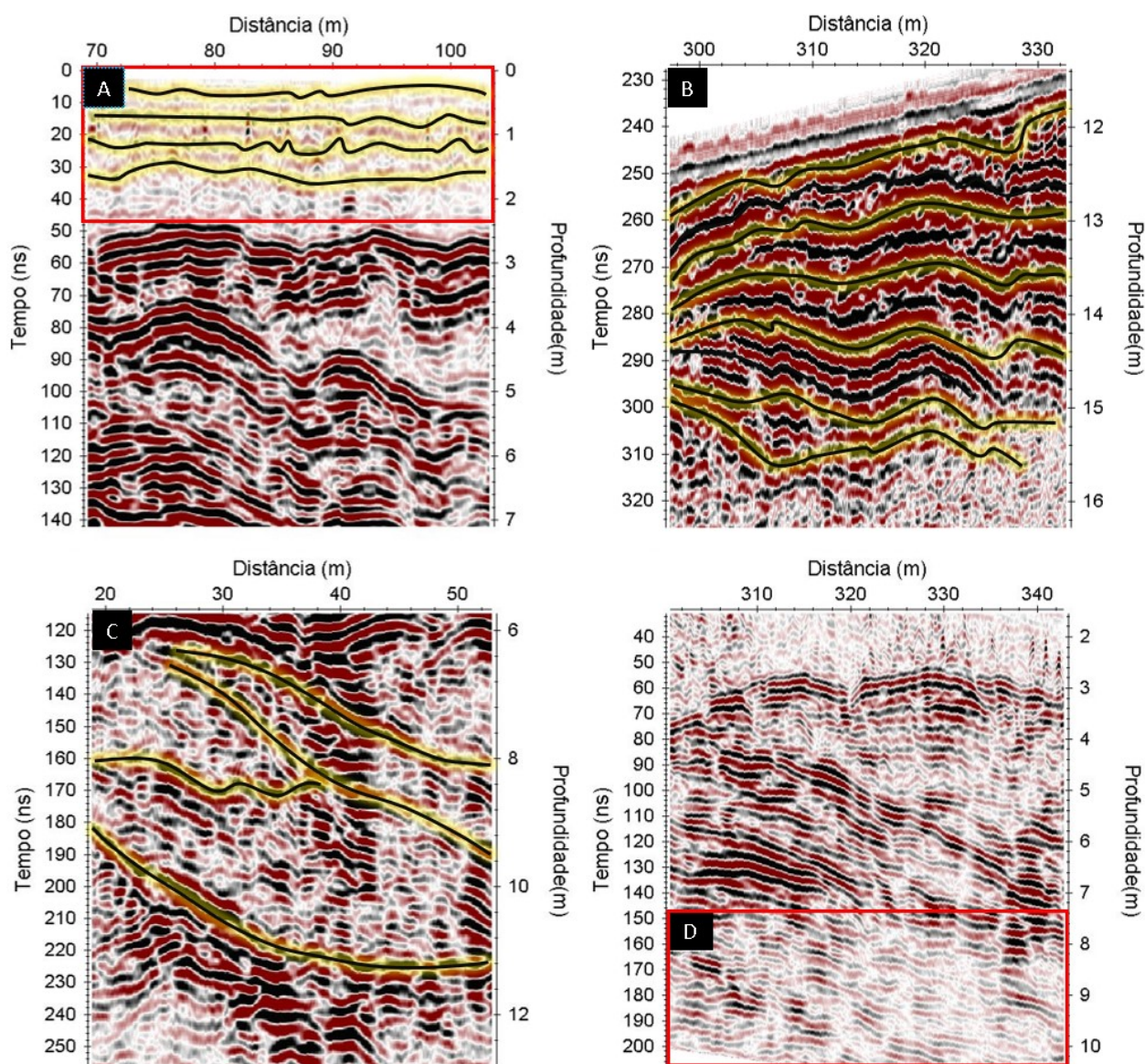


Figura 3 – Padrões de reflexão nas seções GPR: A) Rf1: estratificação plano-paralela com presença de concreções lateríticas; B) Rf2: estratificação plano-paralela à convoluta; C) Rf3: estratificação cruzada tangencial acanalada; D) Rf4: estratificação plano-paralela destacada no retângulo em vermelho.

Essa radarfácies foi relacionada a depósitos areno-argilosos a argilosos com estratificação plano-paralela. Os sinais de amplitude moderadamente alta, paralelos e contínuos no topo dessa radarfácies traduzem as camadas dos pavimentos flexíveis das estradas de rodagem. As feições hiperbólicas na porção inferior estão associadas às concreções lateríticas, as quais são frequentes entre as camadas superficiais dos depósitos cenozoicos na área de estudo

Na radarfácies Rf2 (Figura 3B), as reflexões ocorrem entre 3 a 8 m de profundidade e exibem em geral sinais de amplitude alta, intercalados em alguns trechos por feições de amplitude baixa e zonas com ausência de sinal. Os refletores apresentam uma configuração sinuosa e em determinados intervalos planar; em relação ao mergulho, são em sua maioria horizontais; quanto ao relacionamento e continuidade, as feições são subparalelas e moderadamente contínuas a descontínuas. Essas características são compatíveis com pacotes arenosos, com estratificação plano-paralela a convoluta.

A radarfácies Rf3 (Figura 3C) é caracterizada em primeiro plano por feições inclinadas com comprimento superior a 10 m; sinais de amplitude moderadamente alta; configuração planar e ângulo de mergulho dos refletores maior que 6°. As feições são moderadamente contínuas a descontínuas e apresentam entre si um relacionamento oblíquo tangencial. Em segundo plano, ocorrem reflexões de amplitude baixa, forma planar, horizontal, paralelas e zonas com ausência de sinal. Essa interpretação é condizente com depósitos areno-argilosos com estratificação cruzada acanalada tangencial de grande porte.

A radarfácies Rf4 (Figura 3D) corresponde a reflexões de amplitude média a baixa, descontínuas a caóticas e zonas com atenuação do sinal em profundidade. Esse aspecto está provavelmente relacionado a depósitos areno-argilosos com estratificação de plano-paralela.

Contextualização dos Padrões de Reflexão da Geologia Local

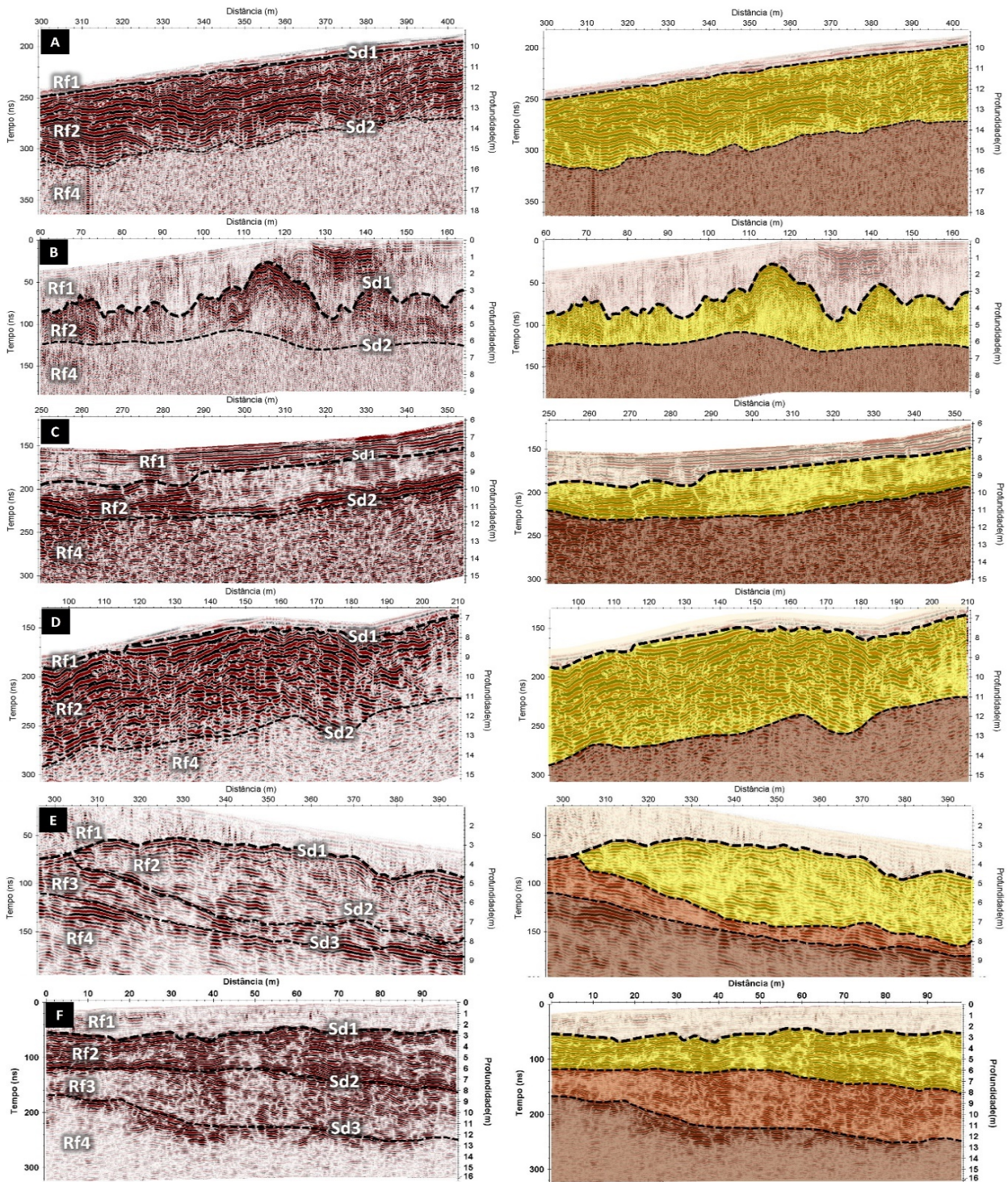
As características geológicas da área de estudo juntamente com os padrões de reflexão identificados nas seções GPR permitiram a proposição de duas unidades de radar (A e B) nos depósitos cenozoicos na Ilha do Maranhão. Essas unidades foram identificadas nos seis radargramas interpretados, a saber: 3 e 6, na região norte da área de estudo (Figuras 4A e 4B); 14 e 15, na porção leste (Figuras 4C e 4D); e 29

e 30, no compartimento oeste da área investigada (Figuras 4E e 4F). Os radargramas mencionados constituem partes representativas das seções integrais (Figura 5) que exibiram melhor contraste das feições interpretadas.

A unidade de radar “A” é constituída pela radarfácies Rf1; apresenta espessura de até 4 m (Figura 4B) e repousa discordantemente sobre a unidade B através da superfície de radar Sd1. Ela exibe sinais de amplitude alta em todas as seções analisadas; continuidade lateral com truncamentos de reflexões subjacentes em padrão Toplap (Figura 4D); e topografia irregular, conformando feições associadas a antigos vales fluviais (Figuras 4B e 4E). Estes aspectos conferem a superfície aludida o caráter de uma descontinuidade erosiva.

A unidade de radar B é formada pelas radarfácies Rf2, Rf3 e Rf4 as quais foram relacionadas as subunidades B1, B2 e B3, respectivamente. A primeira, com espessura de até 4 m, em geral, repousa subjacente a unidade A e sobrejacente a subunidade B3 através das superfícies Sd1 e Sd2 (Figuras 4A, 4B, 4C e 4D). A subunidade B2 possui espessura também de até 4 m; é subjacente a subunidade B1 e sobrejacente a subunidade B3 através das superfícies de radar Sd2 e Sd3, respectivamente. Seu padrão de reflexão associado a estratificação cruzada tangencial acanalada somente foi identificado nas seções GRP 29 e 30, na região oeste da área de estudo (Figuras 4E e 4F). A subunidade B3 encontra-se na base das seções analisadas na Ilha do Maranhão; possui espessura superior a 5 m; com exceção das seções GPR 29 e 30 (Figuras 4E e 4F), acha-se subjacente a subunidade B1 através da superfície Sd2 (Figuras 4A, 4B, 4C e 4D); e exibe um padrão de reflexão caracterizado por forte atenuação do sinal em profundidade.

As unidades A e B descritas foram correlacionadas geologicamente aos Sedimentos Pós-Barreiras, do Neopleistoceno ao Holoceno, e aos depósitos do Grupo Barreiras, do Oligoceno/Mioceno ao Mioceno, respectivamente. Essa afirmação está apoiada nas investigações de Rossetti (2000), entre as cidades Alcântara e Guimarães, na Bacia de São Luís, em que os depósitos da Sucessão Pirabas/Barreiras foram divididos em três unidades (Figura 6A). A unidade superior encontra-se subjacente a uma inconformidade intemperizada, com paleossolo laterítico, acentuado relevo erosional e extensão lateral quilométrica, e que representa o topo da deposição do Mioceno na área aludida.



Unidade de radar A: Sedimentos Pós-Barreiras

- A** Depósitos areno-argilosos a argilosos, com estratificação plano-paralela
- Sd1** - Superfície descontinuidade erosiva
- Sd2 e Sd3**: Superfícies de descontinuidade
- Rf1 a Rf4: Radarfácies

Unidade de radar B: Grupo Barreiras

- B1** Depósitos arenosos com estratificação plano-paralela a convoluta
- B2** Depósitos areno-argilosos com estratificação cruzada
- B3** Depósitos areno-argiloso com estratificação plano-paralela

Figura 4 – Interpretação das feições de radar na Ilha do Maranhão: A) seção GPR 3; B) seção GPR 6; C) seção GPR 14; D) seção GPR 15; E) seção GPR 29; F) seção GPR 30.

Sua morfologia e constituição geológica podem explicar os sinais de alta amplitude associados à superfície de descontinuidade entre as unidades A e B nas seções GPR na Ilha do Maranhão (Figura 4A a F). Nessa mesma região da Bacia de São Luís, os Sedimentos Pós-

Barreiras foram datados por Rossetti et al. (2013b), por meio de luminescência opticamente estimulada, e apontaram deposição entre ao Neopleistoceno e o Holoceno, período semelhante ao obtido por Tatumi et al. (2008) para esses depósitos no nordeste do Pará.

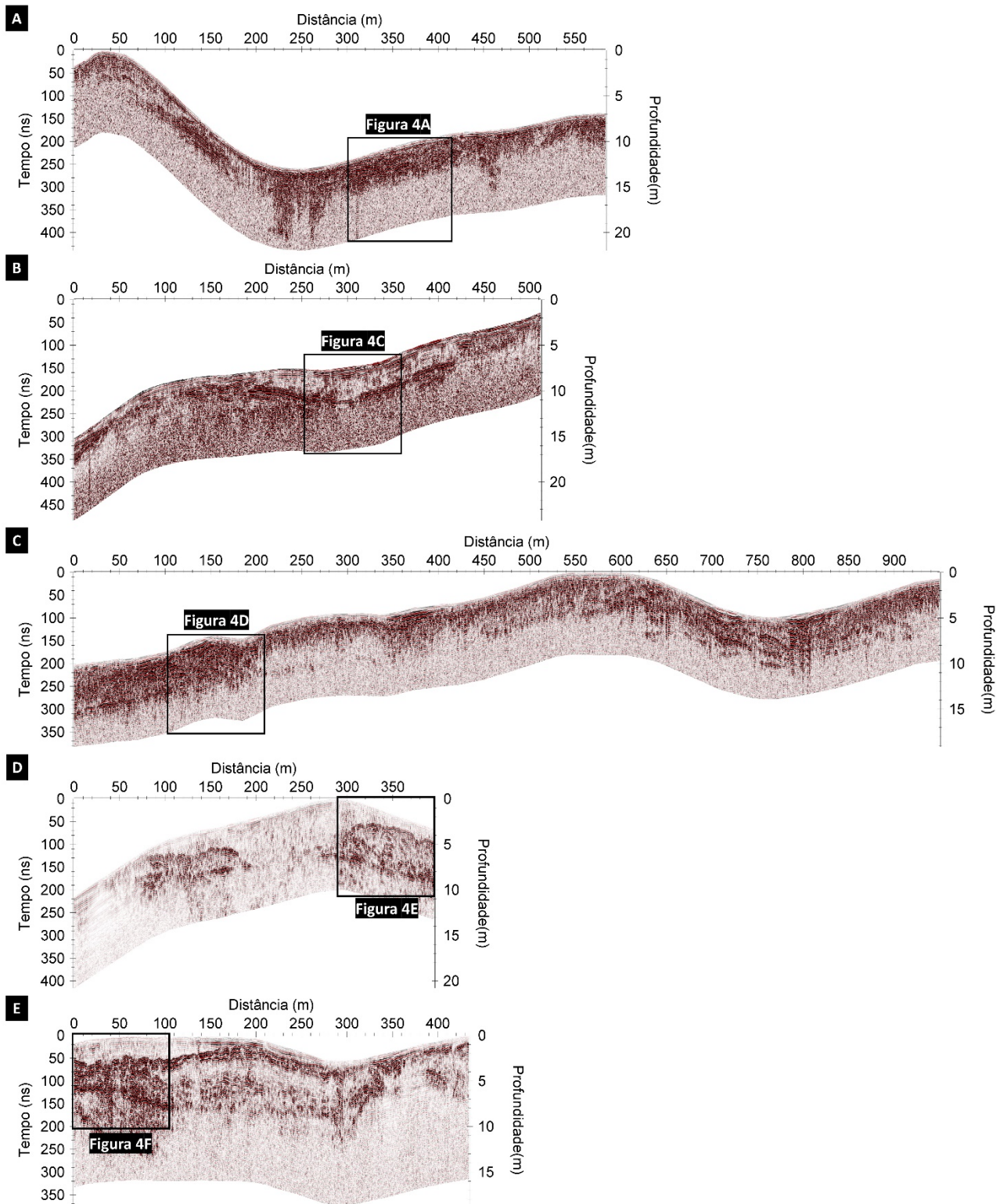


Figura 5 - Seções GPR investigadas na Ilha do Maranhão: A) seção GPR 3; B) seção GPR 14; C) seção GPR15; D) seção GPR 29; E) seção GPR 30. Os trechos destacados 4A a 4F correspondem às seções interpretadas e ilustradas na figura 4.

Nessa porção do Pará, os levantamentos GPR realizados de Rossetti & Góes (2001) levaram à identificação de quatro unidades de radar, sendo duas superiores e duas inferiores, associadas respectivamente aos Sedimentos Pós-Barreiras e a Sequência Pirabas/Barreiras (Figura 6B). Segundo os autores, no limite entre as duas unidades, acha-se uma superfície de descontinuidade de até 600 km entre o litoral do Pará e

Maranhão.

A continuidade das investigações GPR nessa região conduziu Rossetti et al. (2001) ao reconhecimento de três unidades de radar nos Sedimentos Pós-Barreiras (Figura 6C), com a unidade inferior repousando sobre embasamento miocênico, marcado por discordância com forte relevo erosivo.

Segundo os autores, trata-se de uma superfície

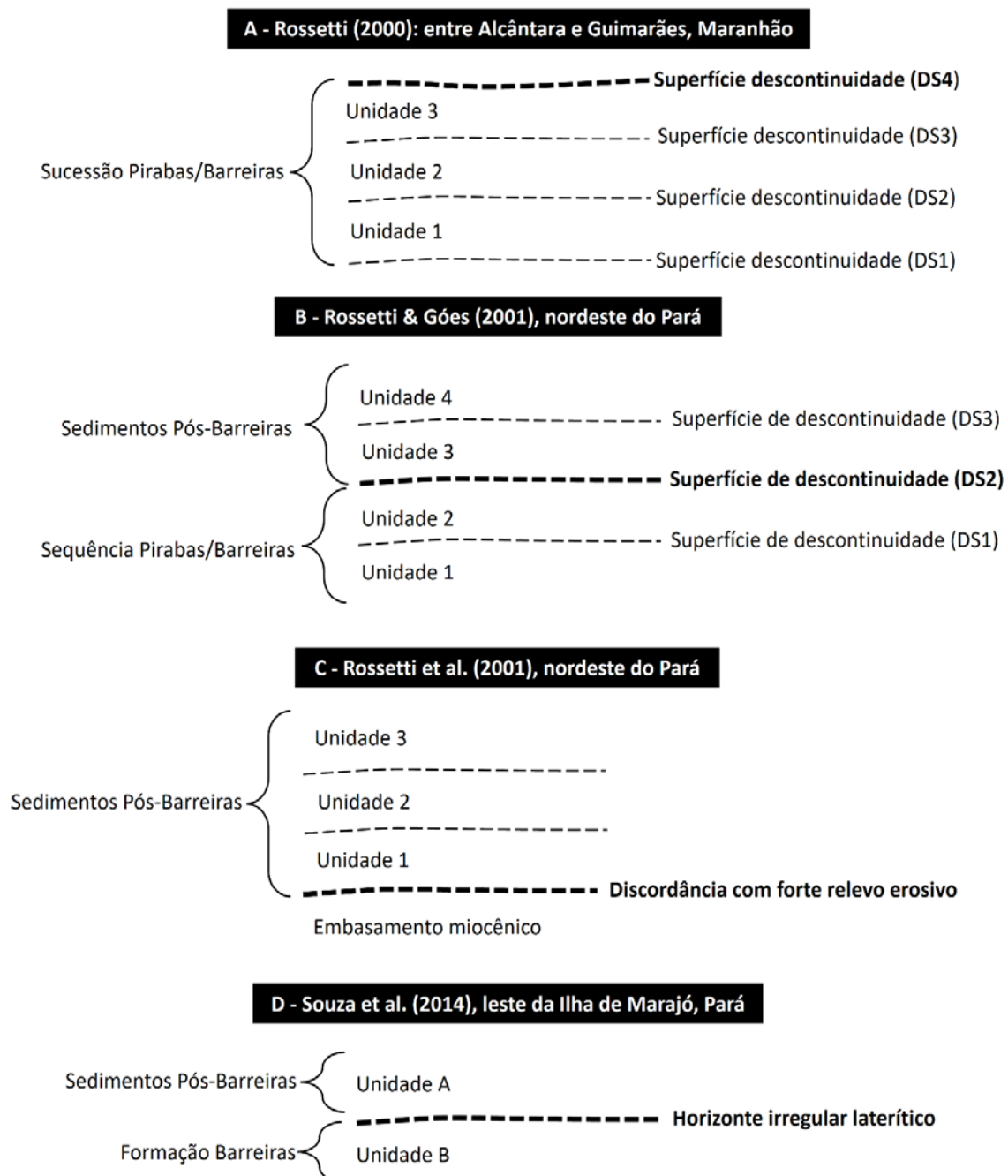


Figura 6 - Contextualização das unidades geológicas cenozoicas entre o nordeste do Pará e noroeste do Maranhão identificadas por: A) Rossetti (2000); B) Rossetti & Góes (2001); C) Rossetti et al. (2001); D) Souza et al. (2014). A superfície de descontinuidade destacada constitui a interface entre os depósitos Barreiras e o Sedimentos Pós-Barreiras.

mapeável na área investigada devido à presença de reflexões de alta amplitude; correlacionável da Zona Bragantina até, pelo menos, o norte da Bacia de São Luís-Grajaú; e pertinente ao período de emergência, provavelmente de escala mundial, que sucedeu a transgressão miocênica. Ela foi designada por Arai (2006) de Discordância Tortoniana, produzida pela maior queda eustática do Neógeno, associada a gênese da calota glacial da Antártica.

Na região leste da Ilha de Marajó, no litoral do Pará, Souza et al. (2014) definiram duas unidades de radar através de levantamentos GPR: a primeira foi relacionada aos depósitos da Formação

Barreiras e a segunda aos Sedimentos Pós-Barreiras (Figura 6D). Conforme os autores, elas se mostraram intercaladas por um horizonte irregular laterítico (em alguns locais, somente a 1 ou 2 m abaixo da superfície), associado nas seções de radar a reflexões de alta amplitude, contínuas, acompanhadas de reflexões hiperbólicas e sobrepostas por alguns metros por sinais caóticos de baixa amplitude.

Dessa forma, em todas as pesquisas relatadas entre o nordeste do Pará e o noroeste do Maranhão, as unidades de radar foram relacionadas aos depósitos do Grupo Barreiras sotoposto aos Sedimentos Pós-Barreiras por meio de uma

superfície de descontinuidade, marcada por níveis lateríticos e relevo erosional, tal como observado nas seções radar analisadas na Ilha do Maranhão, o que sustenta a correlação das unidades A e B às unidades estratigráficas supracitadas.

Na Ilha do Maranhão, além dos padrões de reflexão descritos anteriormente, as seções GPR evidenciaram segmentos deslocados, lateralmente limitados por ausência de sinal, verticais a subverticais que se projetam para cima (Figuras 7A a D). Esses padrões foram relacionados a falhas e fraturas nos estratos do Grupo Barreiras, em concordância ao verificado por Rossetti et al. (2012b) no leste da Ilha de Marajó.

Nessa região, nos depósitos cenozoicos, feições

dessa natureza evidenciaram períodos de instabilidade tectônica, associada a movimentos *strike-slip* que produziram estruturas transtensivas e transpressivas durante o Cenozoico.

A ascendência dessas feições na unidade relacionada aos Sedimentos Pós-Barreiras (Figura 7) é consistente com as reativações sin ou pós-deposicionais verificadas no Neopleistoceno-Holoceno. Estes aspectos foram tratados por Rossetti et al. (2011a, b), Bezerra et al. (2014), entre outros, ressaltando a tectônica e a eustasia como fatores controladores da acumulação sedimentar e da erosão de unidades neogênicas e quaternárias na margem continental equatorial brasileira.

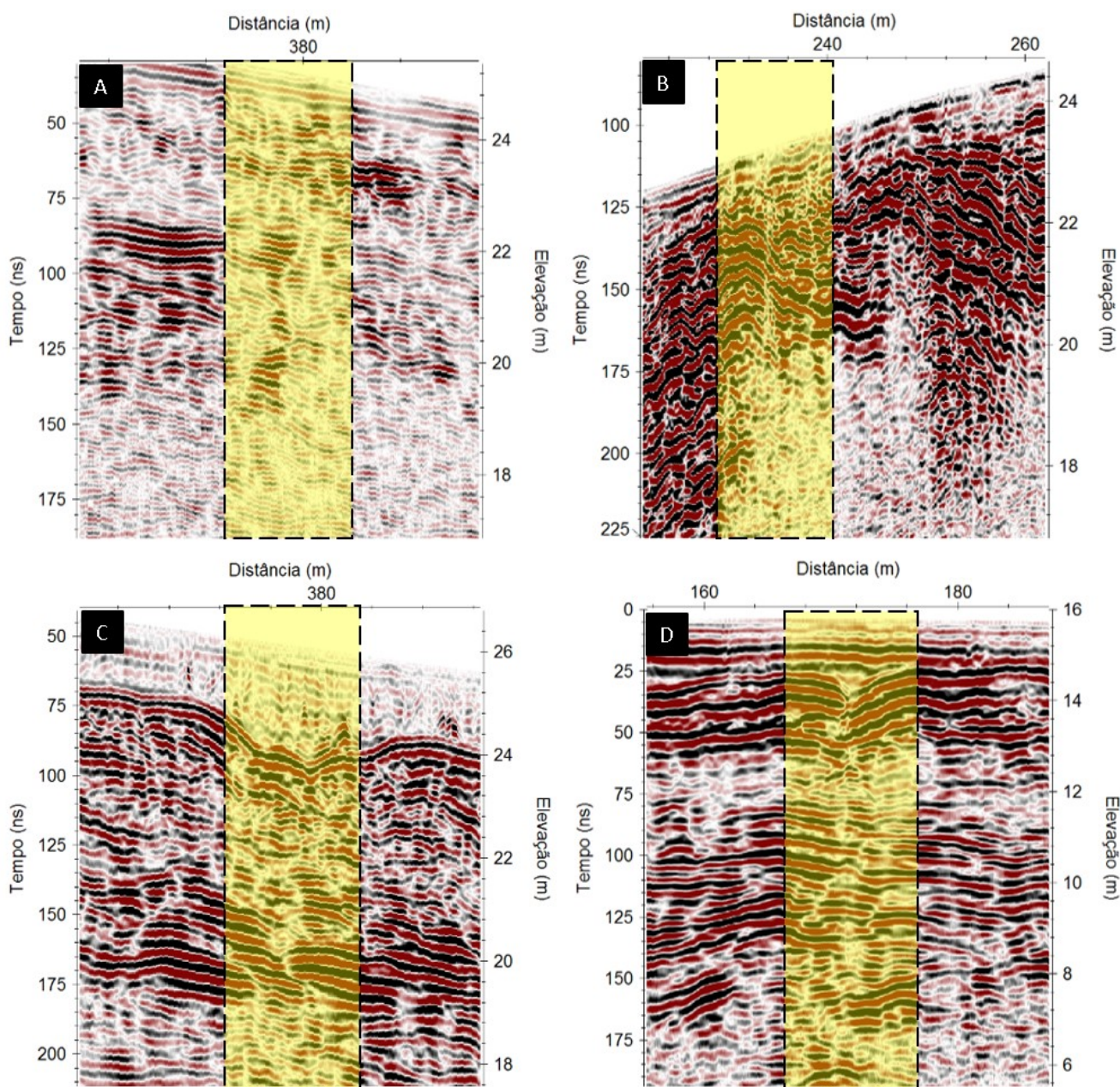


Figura 7 - Descontinuidades verticais associadas a falhas e fraturas nas seções GPR: A) trecho da linha 24; B) trecho da linha 28; C) trecho da linha 29; D) trecho da linha 30.

Os movimentos neotectônicos são responsáveis pela configuração do arcabouço da Bacia de São Luís, desenvolvido a partir da interação de falhas transcorrentes de direções E-W, com a componente transtensiva orientada na direção NE-SW (Ferreira Júnior, 1996). Também estão implicados na escultura do relevo moderno, evolução e desenvolvimento de sistemas deposicionais, entalhamento de corpos d'água, soerguimentos e subsidências, criando espaços para renovada sedimentação.

Eles demonstram que as margens passivas não permaneceram tectonicamente inativas após a ruptura continental, mas que experimentaram uma importante sismicidade ao longo do Quaternário (Almeida-Filho et al., 2009; Rossetti et al. 2008; Maia & Bezerra, 2011; Burbank & Anderson, 2011).

CONCLUSÕES

O radar de penetração no solo constitui um método geofísico, não invasivo, que faz uso de ondas eletromagnéticas de alta frequência capaz de produzir imagens em alta resolução dos estratos em profundidade, especialmente em regiões de geologia sedimentar, com pouca incidência de afloramentos. Na Ilha do Maranhão, na transição entre os tabuleiros costeiros e a planície litorânea, os registros balizaram, em geral, dois padrões de reflexão separados por sinais de alta amplitude, contínuos, paralelos a subparalelos, relacionados à superfície de descontinuidade, marcada por relevo erosivo, paleossolo laterítico, que remete a transição entre a sedimentação neogênica do Grupo Barreiras e a quaternária dos Sedimentos Pós-Barreiras, constituindo-se um marcador estratigráfico relevante para estudos hidrogeológicos.

As descontinuidades verticais presentes nos depósitos cenozoicos apresentam uma série de implicações. Elas ilustram a ação da neotectônica na área de estudo e suas consequências nas movimentações de massa em áreas de risco de deslizamento; no condicionamento de fluxos verticais que acentuam a recarga dos sistemas aquíferos pelas águas pluviais; e na contaminação da água subterrânea por fluidos provenientes de vazamentos em sistemas de esgotamento sanitário, sistemas subterrâneos de armazenamento de combustíveis e de resíduos sólidos. Além disso, o caráter resistivo da superfície de descontinuidade entre os depósitos sedimentares do Grupo Barreiras e Pós-Barreiras, sinalizada por reflexões de alta amplitude, pode contribuir para escoamento lateral, favorecendo, localmente, a ocorrência de aquíferos suspensos.

Essas superfícies de descontinuidade são em geral resistivas, apresentam baixa drenança e sua continuidade lateral pode ser indutora de escoamento horizontal subsuperficial (*interflow*), conduzindo à existência de aquíferos suspensos temporários e de nascentes ao longo das falésias costeiras.

A presença de falhas e fraturas nos depósitos miocênicos e quaternários, observadas nos radarogramas, pode incrementar os fluxos verticais e, por conseguinte, as taxas de infiltração nos depósitos cenozoicos, as quais constituem importante mecanismo de estabilidade da interface água doce - água salgada em ambientes costeiros insulares. Contrariamente, essas deformações acentuam a vulnerabilidade à poluição dos sistemas aquíferos rasos, favorecendo o transporte de contaminantes procedentes das atividades antrópicas.

AGRADECIMENTOS

A Universidade Estadual do Maranhão, por meio da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, pela concessão do afastamento e bolsa de estudos durante a realização da pesquisa. Ao Laboratório de Geofísica Aplicada, do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, pela disponibilização da unidade de controle, modelo SIR3000, (Geophysical Survey Systems Inc.); e ao Instituto Nacional de Criminalística – INC do Departamento de Polícia Federal, pela concessão da antena blindada, modelo 5106, série 2434, com frequência de 200 MHz.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA-FILHO, R.; ROSSETTI, D.F.; MIRANDA, F.P.; FERREIRA, F.J.; SILVA, C.; BEISL, C. 2009. Quaternary reactivation of a basement structure in the Barreirinhas Basin, Brazilian Equatorial Margin. *Quaternary Research*, v. 72, p. 103-110, 2009.
- ANNAN, A.P. *Ground penetrating radar: workshop notes*. Mississauga, Ontário: Sensors & Software Inc, 197 p., 2001.
- ARAI, M. A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. *Geologia USP, Série Científica*, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.
- ARANHA, L.G.F.; LIMA, H.P.; SOUZA, J.M.P. DE; MAKINO, R.K.; FIGUEIRAS, A.J.M. 1988. Evolução tectônica e sedimentar das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35,

- 1988, Belém. **Anais...** Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988, p. 2487-2497.
- AZEVEDO, R.P. **Tectonic evolution of Brazilian equatorial continental margin basins.** London, 1991. 494 p. Thesis (Doctoral of Philosophy) - University of London.
- BAKER, G.S. & JOL, H.M. **Stratigraphic analyses using GPR.** Boulder, Colorado: Geological Society of America, 181 p., 2007.
- BATISTA, A.M. **Caracterização paleoambiental dos sedimentos Codó-Grajaú, Bacia de São Luís (MA).** Belém, 1992. 102 p. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará.
- BERES JR., M. & HAENI, F.P. Application of ground-penetrating-radar methods in hydrogeologic studies. **Groundwater**, v. 29, n. 3, p. 375-386, 1991.
- BEZERRA, F.H.R.; ROSSETTI, D.F.; OLIVEIRA, R.G.; MEDEIROS, W.E.; BRITO-NEVES, B.B.; BALSAMO, F.; NOGUEIRA, F.C.C.; DANTAS, E.L.; ANDRADES-FILHO, C.; GÓES, A.M. Neotectonic reactivation of shear zone and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. **Tectonophysics**, v. 614, p. 78-90, 2014.
- BORGES, W.R. **Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP.** São Paulo, 2007. 260 p. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.
- BRISTOW, C.S. & JOL, H.M. **Ground penetrating radar in sediments.** London: Geological Society, 327 p., 2003.
- BURBANK, D.W. & ANDERSON, R.S. **Tectonic geomorphology.** NJ, USA: John Wiley & Sons, 274 p., 2011.
- DANIELS, J.; EHSANI, M.R.; ALLRED, B.L. Ground-penetrating radar methods (gpr). In: ALLRED, B.J.; DANIELS, J.J.; EHSANI, M.R. (Editors), **Handbook of agricultural geophysics.** New York: Taylor & Francis Group, p. 129-145, 2008.
- FERREIRA JÚNIOR, C.R.P. **Neotectônica da bacia de São Luís.** Belém, 1996. 139 p. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará.
- GORAYEB, P.S.S.; GAUDETTE, H.; MOURA, C.A.V.; ABREU, F. DE A.M. DE. Geologia e geocronologia da Suíte Intrusiva Rosário, Nordeste do Brasil, e sua contextualização geotectônica. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 4, p. 571-578, 1999.
- GORINI, M.A. The tectonic fabric of Equatorial Atlantic and adjoining continental margins: Gulf of Guinea to Northeastern Brazil. In: Projeto REMAC. **Estruturas e tectonismo da margem continental brasileira, e suas implicações nos processos sedimentares e na avaliação do potencial de recursos minerais.** Rio de Janeiro: PETROBRÁS, CENPES, DINTEP, p. 11-116, 1981.
- HASUI, Y. Tectônica de placas e evolução dos continentes. In: HASUI, Y.; CARNEIRO, C.D.R.; ALMEIDA, F.F.M. DE; BARTORELLI, A. (Coords). **Geologia do Brasil.** São Paulo: Beca, p. 66-111, 2012.
- JOL, H.M. Ground penetrating radar: theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 544 p., 2008.
- KLEIN, E.L. & MOURA, C.A.V. Síntese geológica e geocronológica do Cráton São Luís e do Cinturão Gurupi na região do rio Gurupi (NE-Pará/NW-Maranhão). **Geologia USP, Série Científica**, v. 3, p. 97-112, 2003.
- LIMA, H.P.; ARANHA, L.G.F.; FEIJÓ, F.J. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Graben de Ilha Nova. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 8, n. 1, p. 111-116, 1994.
- LIMA, L.G. DE. **Estratigrafia e evolução holocênica de uma barreira costeira transgressiva/ regressiva, litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil.** Porto Alegre, 2012. 119 p. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- MAIA, R.P. & BEZERRA, F.H.R. Neotectônica, geomorfologia e sistemas fluviais: uma análise preliminar do contexto nordestino. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, p. 37-46, 2011.
- MITCHUM, R.M.; VAIL, P.R., SANGREE, J.B. Stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences. In: PAYTON, C.E. Ed., **Seismic Stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration.** Tulsa: AAPG, v. 26, p. 117-123, 1977.
- NEAL, A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-Science Reviews**, v. 66, p. 261-330, 2004.
- NEAL, A.; PONTEE, N.I.; PYE, K.; RICHARDS, J. Internal structure of mixed-sand-and-gravel beach deposits revealed using ground-penetrating radar. **Sedimentology**, v. 49, n. 4, p. 789-804, 2002.
- NEAL, A. & ROBERTS, C.L. Internal structure of a trough blow-out, determined from migrated ground-penetrating radar profiles. **Sedimentology**, v. 48, n. 4, p. 791-810, 2001.
- PEDRÃO, E. **Palinoestratigrafia e evolução paleoambiental de rochas sedimentares aptianas cenomanianas das bacias de Bragança-Viseu e São Luís (margem equatorial brasileira).** Rio de Janeiro, 1995, 215 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- POMEROL, C.; LAGABRIELLE, Y.; RENARD, M.; GUILLOT, S. **Princípios de geologia: técnicas modelos e teorias.** 14. ed. Porto Alegre: Bookman, 1017 p., 2013.
- PORSANI, J.L. **Ground penetrating radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado-SP.** Rio Claro, 1999. 145 p. Tese (Doutorando em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- REZENDE, W.M. & ARAÚJO, E. Integração geológica regional das áreas continental e oceânica da bacia de Barreirinhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24, 1970, Brasília. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Geologia, 1970, p. 141-155.
- REZENDE, W.M. & PAMPLONA, H.R.P. Estudo do desenvolvimento do arco Ferrer-Urbano Santos. **Boletim Técnico Petrobrás**, v. 13, n. 1/2, p. 5-14, 1970.
- ROBINSON, M.; BRISTOW, C.; MCKINLEY, J.; RUFFELL, A. Ground penetrating radar: techniques in geomorphology. **Geomorphological Techniques**, v. 1, p. 1-26, 2013.
- ROSSETTI, D.F. Influence of low amplitude/high frequency relative sea-level changes in a wave-dominated estuary (Miocene), São Luís Basin, northern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 133, p. 295-324, 2000.
- ROSSETTI, D.F. Arquitetura deposicional da Bacia de São Luís-Grajaú. In: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; TRUCKENBRODT, W. (Coords), **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú.** Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, p. 31-66, 2001.
- ROSSETTI, D.F. Evolução sedimentar miocênica nos estados do Pará e Maranhão. **Geologia USP, Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 7-18, 2006.
- ROSSETTI, D. DE F. & TRUCKENBRODT, W. Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, Maranhão. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra**, v. 9, p. 29-41, 1997.
- ROSSETTI, D.F. & GÓES, A.M. Imaging Upper Tertiary to Quaternary deposits from northern Brazil applying ground penetrating radar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 2, p. 195-202, 2001.
- ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; SOUZA, L.S.B. Estratigrafia da Sucessão Sedimentar Pós-Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 19, n. 2, p. 113-130, 2001.
- ROSSETTI, D.F.; BEZERRA, F.H.R.; GÓES, A.M.; NEVES, B. B. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeastern Brazil: evidence for paleoseismicity in passive margin. **Sedimentary Geology**, v. 235, p. 172-187, 2011a.

- ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; VALERIANO, M.M.; MIRANDA, M.C.C. Quaternary tectonics in the passive margin: Marajó Island, northern Brazil. **Journal of Quaternary Science**, v. 23, n. 2, p. 121-135, 2008.
- ROSSETTI, D.F.; BEZERRA, F.H.R.; GÓES, A.M.; VALERIANO, M.M. ANDRADES-FILHO, C.O.; MITTANI, J.C.R.; TATUMI, S.H.; BRITO-NEVES, B.B. Late Quaternary sedimentation in the Paraíba Basin, Northeastern Brasil: landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. **Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology**, v. 300, p. 191-204, 2011b.
- ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M.; BEZERRA, F.H.R.; VALERIANO, M.M.; BRITO-NEVES, B.; OCHOA, F.L. Contribution to the stratigraphy of the onshore Paraíba Basin, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, n. 2, p. 313-333, 2012a.
- ROSSETTI, D.F.; SOUZA, L.S.B.; PRADO, R.; ELIS, W.R. Neotectonics in the northern equatorial Brazilian margin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 37, p. 175-190, 2012b.
- ROSSETTI, D.F.; BEZERRA, F.H.R.; DOMINGUEZ, J.M.L. Late Oligocene-Miocene transgressions along the equatorial and eastern margins of Brazil. **Earth-Science Reviews**, v. 123, p. 87-112, 2013a.
- ROSSETTI, D.F.; ROCCA, R.R.; TATUMI, S.H. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira da Bacia de São Luís, Maranhão, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências Naturais**, v. 8, n. 1, p. 11-25. 2013b.
- SANDMIER. **Reflexw - GPR and seismic processing software. Versão 7.0**. Karlsruhe, Germany: Sandmier Geophysical Research, 2012.
- SANTOS, M.E.C.M. & CARVALHO, M.S.S. DE. Paleontologia das Bacias de Parnaíba, Grajaú e São Luís: reconstituições paleobiológicas. Rio de Janeiro: CPRM-Serviço Geológico do Brasil – DGM/DIPALE, 215 p., 2009. Disp. em: <https://www.sgb.gov.br/publique/Geologia/Estratigrafia,-Paleontologia-e-Sedimentologia/Paleontologia-das-Bacias-do-Parnaiba-Grajaú-e-Sao-Luis-Reconstituicoes-Paleobiologicas-1261.html>. Acessado em: 21out2023.
- SMITH, D.G. & JOL, H.M. Ground penetrating radar: antennae frequencies and maximum probable depths of penetrating in Quaternary sediments. **Journal of Applied Geophysics**, v. 33, p. 93-100, 1995.
- SOUZA, L.S.B. **Evidências tectônicas no leste da Ilha do Marajó: integração de dados morfoestruturais e geofísicos**. São Paulo, 2010. 203 p. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Universidade de São Paulo.
- SOUZA, L.S.B.; ROSSETTI, D.F.; PRADO, R.L. Radar de penetração no solo aplicado à caracterização de estruturas tectônicas miocênicas e quaternárias no leste da Ilha de Marajó (PA). **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, n. 1, p. 55-72., 2014.
- SUGUIO, K. **Geologia sedimentar**. São Paulo: Blucher. 400 p., 2003.
- SUNJAY, S. Ground penetration radar (GPR) applications in hydrogeological study aquifers. In: JOINT INTERNATIONAL CONVENTION OF 8TH IAHS ASSEMBLY AND 37 CONGRESS WATER, 8, 2009, Hyderabad, India. **Acta...Hyderabad**.
- TAMURA, L.N.; ALMEIDA, R.P. DE; TAIOLI, F.; MARCONATO, A.; JANIKIAN, L. Ground penetrating radar investigation of depositional architecture: the São Sebastião and Marizal formations in the Cretaceous Tucano Basin (Northeastern Brazil). **Brazilian Journal of Geology**, v. 46, n. 1, p. 15-27, 2016.
- TATUMI, S.H.; SILVA, L.P. DA; PIRES, E.L.; ROSSETTI, D. DE F.; GÓES, A.M.; MUNITA, C.S. Datação de Sedimentos Pós-Barreiras no norte do Brasil: implicações paleogeográficas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 3, p. 514-524, 2008.
- VERECKEN, H.; BILEV, A.; CASSIANI, G.; REVIL, A. Applied hydrogeophysics. In: VERECKEN, H.; BILEV, A.; CASSIANI, G.; REVIL, A.; TITOV, K. **Applied hydrogeophysics**. (Editors), Dordrecht, The Netherlands: Springer, p. 1-8, 2006.
- ZALAN, P.V. Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 341-345, 2007.

*Submetido em 3 de outubro de 2022
Aceito para publicação em 29 de novembro de 2023*