

Geomorfometria e geofísica aplicadas à discriminação de unidades sedimentares na Bacia Paraíba, nordeste do Brasil

Clódís de Oliveira Andrades Filho¹

Dilce de Fátima Rossetti^{1,2}

Francisco Hilario Rego Bezerra³

Édipo Henrique Cremon²

Viviana Aguilar Muñoz²

¹ Universidade de São Paulo - USP/IGc
CEP 05508-080 – São Paulo - SP, Brasil
andradesfilho@usp.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{rossetti, cremon, viaguila}@dsr.inpe.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN
CEP 59072-970 - Natal, RN - Brasil
bezerrafh@geologia.ufrn.br

Abstract. Integrating remote sensing and geophysical techniques enables discrimination of geologic units in the Paraíba Basin. Therefore, this work aims to recognize the possible relationships between geomorphometric and geophysical gamma-spectrometric data related to the sedimentary units of Barreiras Formation (Miocene) from the Post-Barreiras Sediments (late Quaternary) in the central part of Paraíba state, Brazil. The dataset used in this work includes: a) dissection geomorphometric index (IDissec) extracted from digital elevation model (DEM) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM); b) aerogamma-spectrometric product of radioisotope Thorium (Th) concentration; c) absolute dating of rocks, derived from optically stimulated luminescence technique (OSL); and d) geological map of the central portion of the Paraíba Basin. Sample plots were selected from the database, corresponding to areas previously recognized during field work. The results indicate an association between areas with low concentrations of Th and low dissection index values. Thus, we conclude that the integration of geophysical data (Th) and geomorphometric index (IDissec) has great feasibility for mapping sedimentary units in the Paraíba Basin, being a potential tool to be extended to the entire northeastern Brazilian coast, due to the large equivalence of the sedimentary units.

Palavras-chave: geomorphometry, gammaespectrometry, DEM, Barreiras Formation, Post-Barreiras Sediments, geomorfometria, gammaespectrometria, MDE, Formação Barreiras, Sedimentos Pós-Barreiras.

1. Introdução

O sensoriamento remoto contribui historicamente no mapeamento geológico - geomorfológico enquanto técnica indireta de obtenção de dados. Dentre os produtos de sensoriamento remoto utilizados destacam-se as imagens de radar de abertura sintética (SAR) que em áreas tropicais tem tido melhor sucesso em aplicações geológicas no território nacional (p.e., Paradella et al., 2005). Este tipo de aplicação pode ser potencializado com o uso de radar interferométrico de abertura sintética - InSAR, que possibilita geração de modelos digitais de elevação (MDE). Atualmente vários estudos têm realizado a extração de variáveis geomorfológicas sobre MDE's e um volume expressivo destes trabalhos possui em suas finalidades a discriminação de unidades geológicas (p.e., Grohmann et al., 2011; Valeriano e Rossetti, 2011) e são impulsionados pela ampla distribuição de dados topográficos digitais, como os modelos interferométricos derivados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Valeriano e Rossetti, 2012). Neste sentido, importante estudo foi realizado por Muñoz e Valeriano (2009) para o cálculo de dissecação topográfica. Este índice pode contribuir no mapeamento geológico por realçar áreas onde os processos erosivos

são mais ou menos expressivos, o que pode estar diretamente relacionado ao grau de maturidade de determinado terreno, ou seja, oferecendo indícios da idade relativa de determinados compartimentos geológicos.

Outra forma de observação geológica indireta é a análise de produtos aerogeofísicos, destacando-se os produtos gamaespectrométricos (Kearey et al., 2009) úteis no mapeamento geológico por permitirem a distinção de rochas a partir de suas assinaturas radioativas. Dentre os isótopos radioativos naturais mais utilizados neste tipo de mapeamento está o tório (^{232}Th). Os isótopos podem se desintegrar de forma espontânea quando são instáveis, possibilitando a emissão de radioatividade em raios gama e tal propriedade permite que este tipo de radiação seja utilizado para levantamentos aerotransportados (Kearey et al., 2009). Ao contrário da maior parte dos dados geofísicos a resposta geofísica dos raios gama ocorre numa posição superficial da crosta e apresenta influência lateral e vertical baixa, portanto apresenta-se como ferramenta potencial no mapeamento de unidades geológicas. Por fim, levantamento aerogeofísico recente realizado na faixa costeira do nordeste brasileiro pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) foi responsável pela geração de dados gamaespectrométricos, que incluem a área da Bacia Paraíba, e podem ser aproveitados para compor uma base de dados robusta que possibilite a discriminação de unidades geológicas sedimentares na região.

Em adição a dados geológicos gerados por observação indireta são importantes os dados de coleta direta (i.e., em campo) como amostragens de material sedimentar para datação absoluta. Neste sentido, técnicas de datação por luminescência opticamente estimulada (LOE) têm contribuído no reconhecimento da evolução geológica da costa nordeste brasileira (Rossetti et al., 2011) e tais informações, quando espacializadas, podem servir de suporte no mapeamento de unidades geológicas.

A expectativa é que a integração de dados de superfície e subsuperfície sejam aplicáveis de forma compatível ao mapeamento geológico. Desta forma o objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de discriminação das unidades geológicas dos Sedimentos Pós-Barreiras e Formação Barreiras a partir de informações geomorfométricas (i.e., índice de dissecação) e gamaespectrométricas (i.e., Th) e reunir parâmetros que permitam este mapeamento. Estas unidades geológicas ocorrem ao longo de uma extensa faixa da margem brasileira e a Bacia Paraíba foi selecionada para o presente teste por apresentar uma ampla base de dados e análises detalhadas das unidades sedimentares (p.e.; Bezerra et al., 2008; Rossetti et al., 2012). Entretanto, o mapeamento destas unidades é ainda problemático, tarefa que requer, ainda, esforços adicionais.

2. Área de Estudo

O recorte espacial utilizado abrange a porção central da Bacia Paraíba no nordeste brasileiro. Tendo como referência a capital do estado da Paraíba, João Pessoa, a área se estende aproximadamente 38 km para oeste e 42 km para sul (Figura 1). O preenchimento sedimentar é representado predominantemente pelos arenitos e argilitos intercamadados e conglomerados da Formação Barreiras (Mioceno) e pelos sedimentos arenosos e, subordinadamente, argilosos, da unidade Sedimentos Pós-Barreiras (Pleistoceno Tardio).

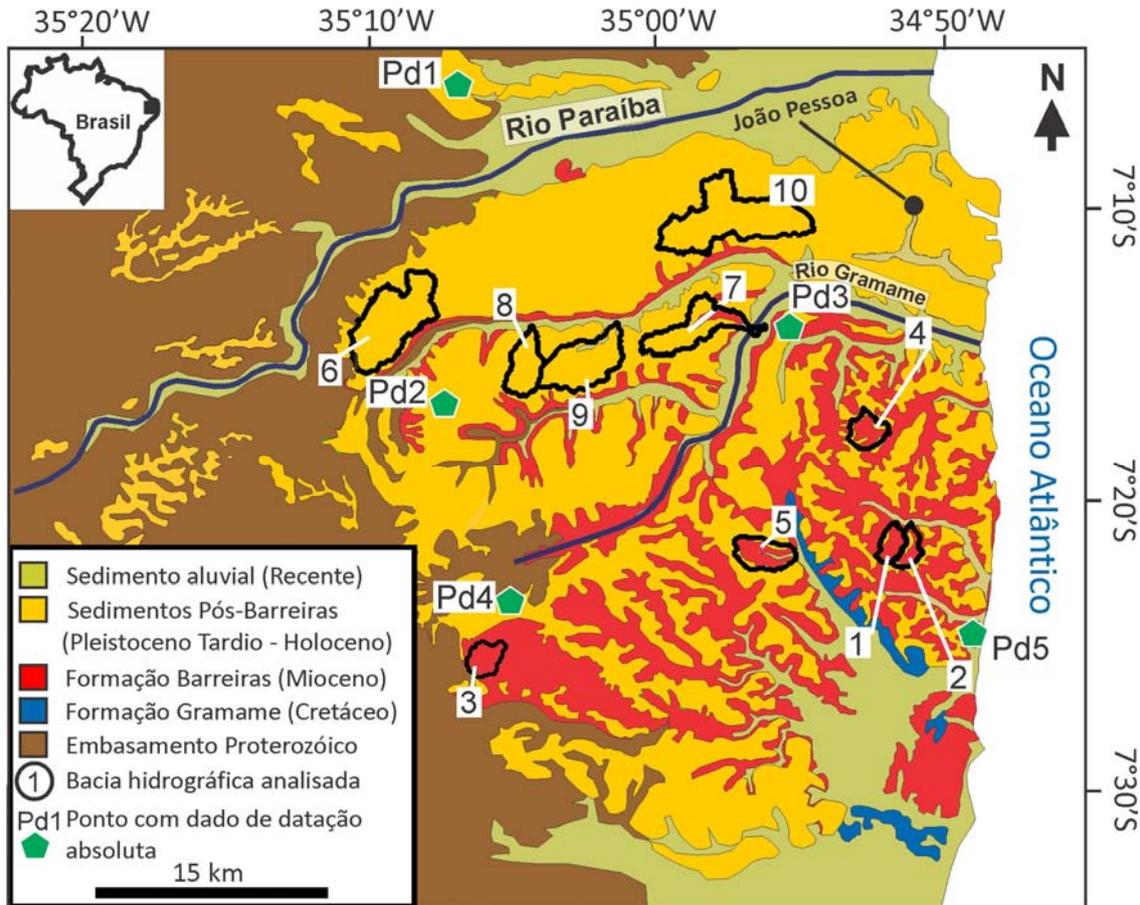


Figura 1. Localização da área de estudo na Bacia Paraíba.

3. Material

O banco de dados que compõe todas as informações usadas no estudo foi elaborado no programa SPRING 5.1.8. No conjunto de dados utilizados está a base proveniente da missão SRTM disponibilizada em sua 4ª versão a partir do endereço eletrônico <http://srtm.csi.cgiar.org>. Estes dados constituem a última versão disponibilizada, resultante da aplicação de novos algoritmos de interpolação e MDE's auxiliares, conforme descrito por Reuter et al. (2007), disponíveis na dimensão de pixel de aproximadamente 90 × 90m.

Compõe a base de dados geofísicos os dados digitais de aerogamaespectrometria obtidos no âmbito do Projeto Aerogeofísico Borda Leste do Planalto da Borborema - CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais). Estes dados estão disponíveis na escala 1:100.000, grid de 125 m × 125 m.

Dentre os produtos gamaespectrométricos disponíveis pelo levantamento da CPRM incluem os mapas radiométricos de concentração de: a) potássio - K (em %); b) urânio - U (em ppm); c) tório - Th (em ppm). Neste trabalho o foco de análise geofísica é sobre o dado de concentração de Tório por apresentar maiores contrastes visuais em análise prévia na área de estudo. Além disso, a literatura sugere que a concentração deste elemento está muitas vezes associada a maior ou menor exposição de determinado terreno ao intemperismo químico (Sordi, 2007).

Além dos dados de elevação, o trabalho está apoiado no mapeamento geológico apresentado por Rossetti et al. (2011) fundamentado por reconhecimento de campo e as datações absolutas apresentadas neste mesmo estudo, obtidas por luminescência opticamente estimulada (LOE) de sedimentos quaternários tardios (Pós-Barreiras) em alguns pontos da Bacia Paraíba (Figura 1).

4. Métodos

Como pré-processamento dos dados SRTM foi realizado o preenchimento de falhas. Em seguida para a extração da dissecação topográfica, esse trabalho se baseou em operações de vizinhança, como foi preconizado por Muñoz e Valeriano (2009), onde uma janela móvel é percorrida sobre o MDE e altitude máxima abrangida pela janela é atribuída ao pixel central, criando assim um mapa de máximos topográficos. Subtraindo o mapa de máximos topográficos pelo MDE original, se tem o mapa de dissecação. Nas etapas de manipulação do MDE, aplicação de janelas móveis e cálculo aritmético foi utilizado o aplicativo SAGA-GIS.

Para a definição do tamanho das janelas móveis, foi realizada no programa VarioWin a análise variográfica de diferentes conjuntos amostrais de 30x30 pixels no intuito de verificar qual a alcance (distância) mínimo de dependência espacial dos dados topográficos para a área de estudo. Após a análise preliminar de 12 amostras em diferentes contextos geomorfológicos, a dependência espacial mínima observada pela análise variográfica foi obtida com 9 arcos de segundo de alcance. Com isso, janelas móveis circulares com esse raio de alcance foram utilizadas para a extração dos máximos topográficos e após da dissecação do relevo. Ao produto resultante se deu o nome IDissec.

Em relação às informações geofísicas o *grid* de dados de concentração de Th (mínimo 0 ppm e máximo 25 ppm) foram importados no programa SPRING 5.1.8 em formato grade, compatível com às análises numéricas realizadas a partir do MDE.

O estudo está fundamentado na análise de dez parcelas amostrais (i.e., microbacias hidrográficas, 1 a 5 - 1º grupo e 6 a 10 - 2º grupo) cuja ocorrência, de acordo com o mapa publicado por Rossetti et al (2011), se dá sob as litologias da Formação Barreiras (i.e., 1, 2, 3, 4 e 5 - Figura 1) e sob as litologias dos Sedimentos Pós Barreiras (i.e., 6, 7, 8, 9 e 10 – Figura 1). A partir destes recortes busca-se apresentar as relações espaciais do dado geofísico e geomorfométrico e as unidades geológicas nestes setores amostrais onde se tem controle maior de informações de campo. A partir das parcelas amostrais foram efetuados recortes sobre o produto gamaespectrométrico de concentração de Tório e sobre o produto geomorfométrico IDissec. A partir de cada recorte foi realizada uma análise estatística descritiva a partir dos valores médios, máximos e mínimos relativos aos produtos utilizados e foram produzidos gráficos destas distribuições.

Adicionalmente, foram inseridos cinco pontos com disponibilidade de dados de datação por LOE (Rossetti et al., 2011) e foram obtidos os valores absolutos de concentração de Tório e de IDissec afim de realizar a comparação com os dados obtidos a partir das parcelas amostrais pelo dado de Tório e IDissec.

5. Resultados e Discussão

A manipulação dos dados geomorfométricos e geofísicos foi eficaz e a partir dos produtos qualitativos (i.e., visuais) (Figura 2) é possível destacar a possibilidade de associação entre variações do grau de dissecação do relevo e das concentrações do radioisótopo Th. A associação fica evidente ao observar a porção da área a noroeste do rio Gramame e a sul do rio Paraíba (Figura 2) onde tanto os valores de Th como os do IDissec, representados pela cor azul, são baixos. Observa-se que na porção ao sul do rio Gramame as tonalidades indicam valores mais altos tanto para a concentração de Th como para o IDissec. Tal associação recebe sentido geológico quando se observa a distribuição das unidades sedimentares da Formação Barreiras e os Sedimentos Pós Barreiras (Figura 1). De modo geral, fica evidente que onde ocorrem os valores mais altos (cores verdes, amarelas e vermelhas) de concentração Th e do IDissec tem relação espacial com as áreas de maior ocorrência da Formação Barreiras. De modo complementar, as áreas onde os valores são mais baixos (cores azuis e

verdes) estão relacionadas espacialmente às áreas de predomínio de ocorrência dos Sedimentos Pós Barreiras.

Na análise por parcelas amostrais (Figura 3) observa-se que as bacias hidrográficas numeradas de 1 a 5 apresentam um padrão visual de distribuição de valores que sugere a ocorrência de valores de dissecação e de concentração de Th mais altos em relação às bacias de 6 a 10. Além disso, o valor médio obtido para cada bacia hidrográfica confirma a tendência de obtenção de valores mais altos para as bacias 1 a 5 em relação às demais. Observando de forma mais detalhada é possível destacar que a bacia que possui o maior valor de concentração de Tório é a de número 4 (13,4 ppm). No entanto, supera em mais que o dobro o valor da bacia 10 (5,01 ppm), que apresenta o valor mais alto dentre as bacias do segundo grupo (6 a 10). No que diz respeito aos valores médios de IDissec observamos que a discrepância é menor em relação à concentração de Tório, mas também é possível indicar que o valor mais baixo dentre as bacias do primeiro grupo é a bacia 4 (24,8 m), e este valor é sensivelmente mais alto que o da bacia 8 (22,81 m), que possui índice mais alto dentre as bacias do segundo grupo.

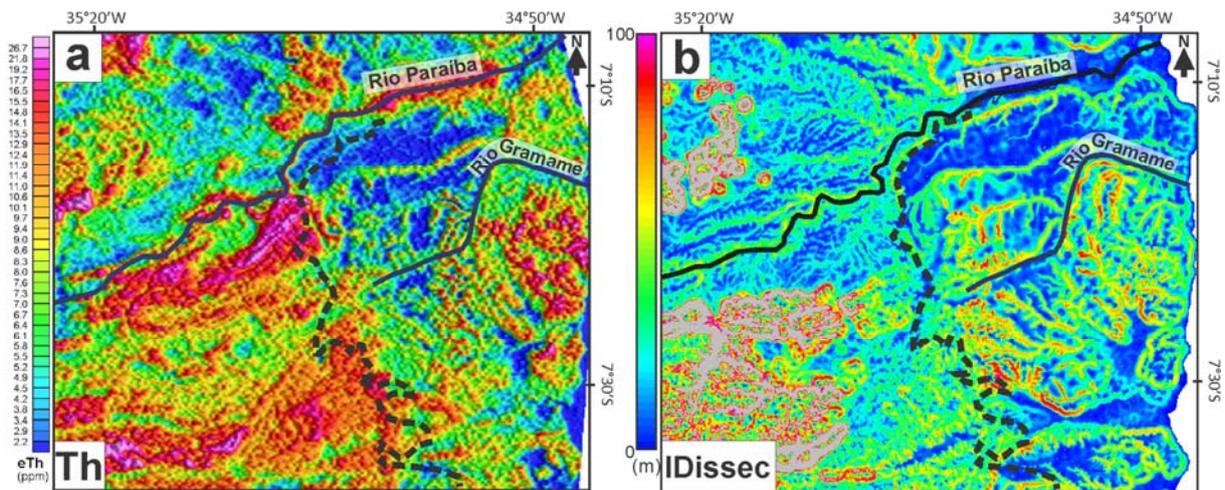


Figura 2. Produto aerogeofísico gamaespectrométrico (Tório-Th) (a) e o produto Índice de dissecação do relevo (IDissec) equivalentes à mesma porção na área de estudo (ver Figura 1).

Os gráficos da Figura 4 revelam de forma quantitativa a associação mais precisa entre variáveis. No gráfico a (Figura 4-a) fica evidente que a partir dos valores de média é possível separar a unidade sedimentare Formação Barreiras (círculos vermelhos) da unidade dos Sedimentos Pós Barreiras (círculos amarelos). A partir dos valores mínimos é possível observar uma separação quantitativa entre as unidades, visto que somente as bacias sobre a unidade Pós Barreiras possuem valores 0, o que não é possível a partir dos valores mais altos. No gráfico b (Figura 4-b) observa-se que é possível discriminar dos dois grupos de bacias a partir dos valores médios resultantes do IDissec, sendo que a relação é a mesma que a observada em relação à concentração de Th, os valores médios mais altos correspondem às amostragens sobre a unidade Formação Barreiras e os valores mais baixos correspondem à amostragens sobre a unidade dos Sedimentos Pós Barreiras.

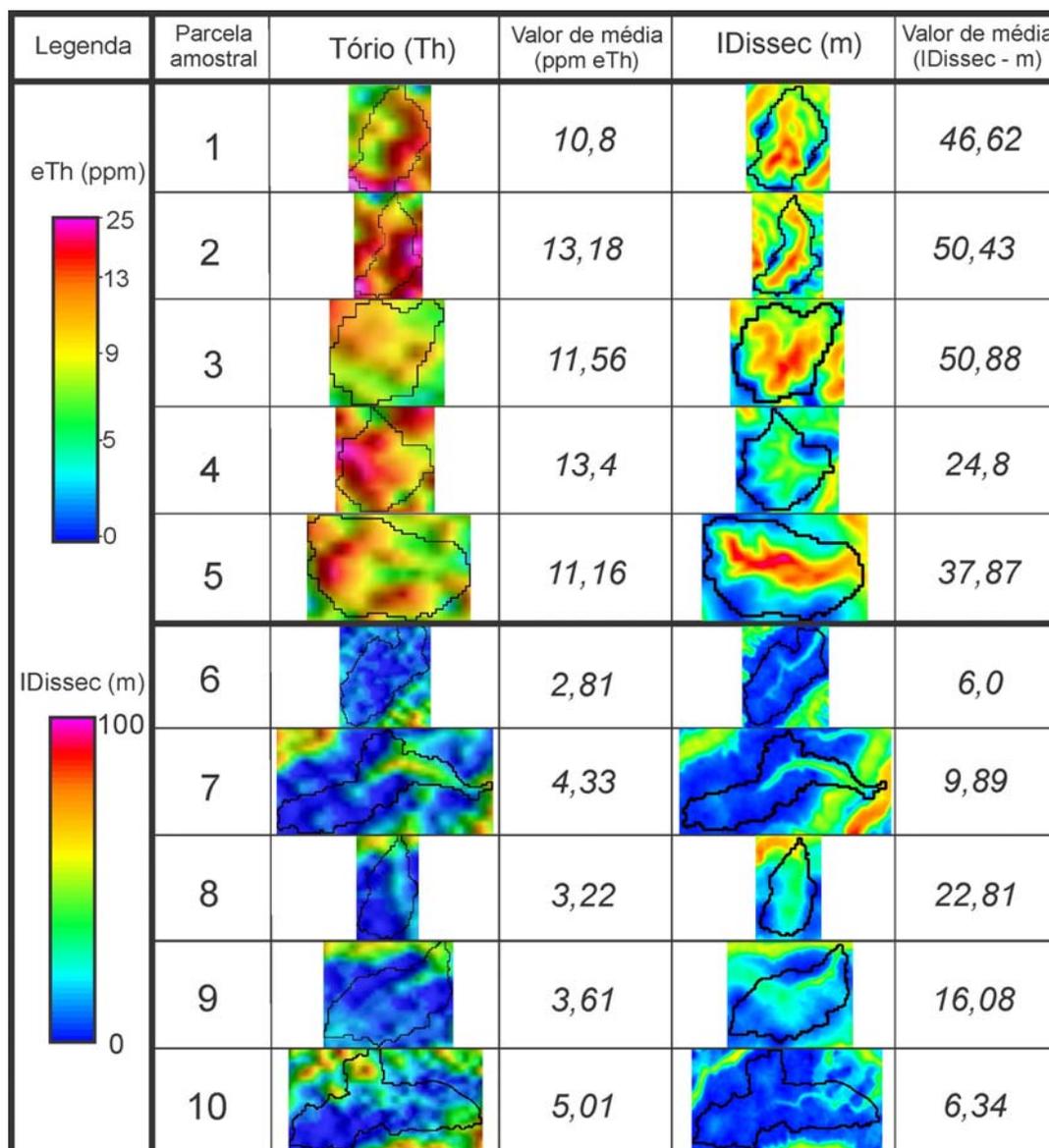


Figura 3. Parcelas amostrais da área de estudo sobre os dados gamaespectrométricos (Th) e a relação com os valores de dissecação do relevo (IDissec).

Os pontos de coleta que contém o dado de datação absoluta na área de estudo representam somente às idades da unidade Sedimentos Pós Barreiras, devido à sensibilidade do método utilizado (Rossetti et al., 2011). Os cinco pontos obtidos revelam idades que variam de aproximadamente 12 500 a 180 000 anos (Rossetti et al., 2011) (i.e., Pd1 – 12 550 ± 951; Pd2 – 21 500 ± 2 800; Pd3 – 22 260 ± 3 110; Pd4 - 178 263 ± 26 830; Pd5 – 40 609 ± 5 452), o que equivale ao período de deposição dos sedimentos Pós Barreiras no Pleistoceno Tardio. Portanto, tratam-se de pontos importantes para verificação da correspondência com os valores de Th e IDissec (Figura 5). Observa-se que todos os pontos amostrais de campo são compatíveis com os baixos valores de Th obtidos pela aerogeofísica sobre as bacias amostrais, ou seja, as medidas estão em geral abaixo do valor 5 ppm (Th) (Figura 5-a). Mesma relação é indicada pela análise do IDissec e os pontos de datação. Neste caso, os valores de IDissec para os pontos amostrais estão em geral abaixo de 20 m, o que corrobora a análise quantitativa das bacias amostrais e o IDissec que revelou que nas bacias onde há predominância de ocorrência dos sedimentos Pós Barreiras os valores de IDissec são baixos (Figura 4-b), principalmente quando comparados com as parcelas amostrais na Formação Barreiras.

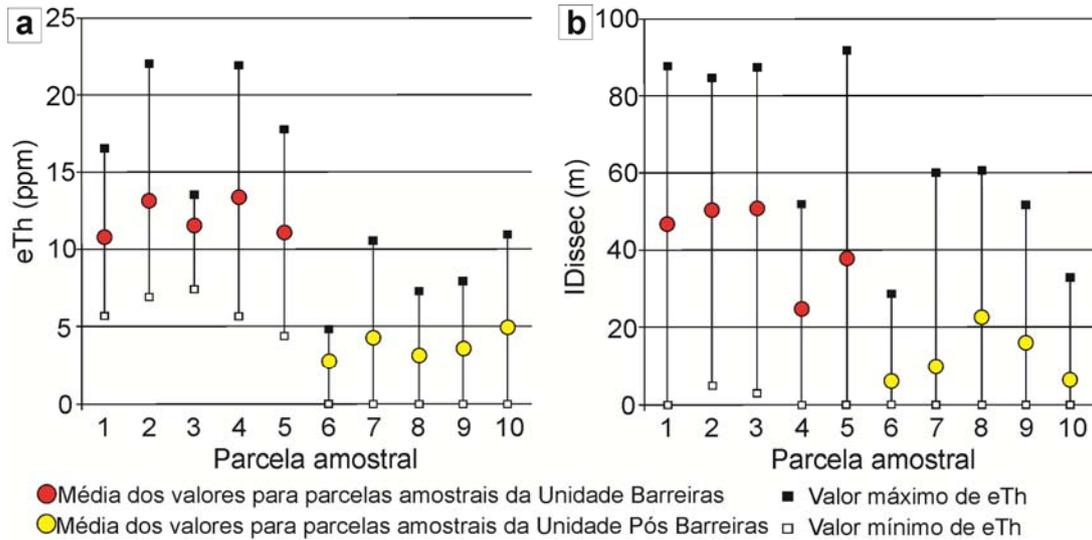


Figura 4. Síntese gráfica relativa a distribuição dos valores obtidos para a concentração de Tório (a) e do índice de dissecação do relevo – IDissec (b) para as bacias amostrais.

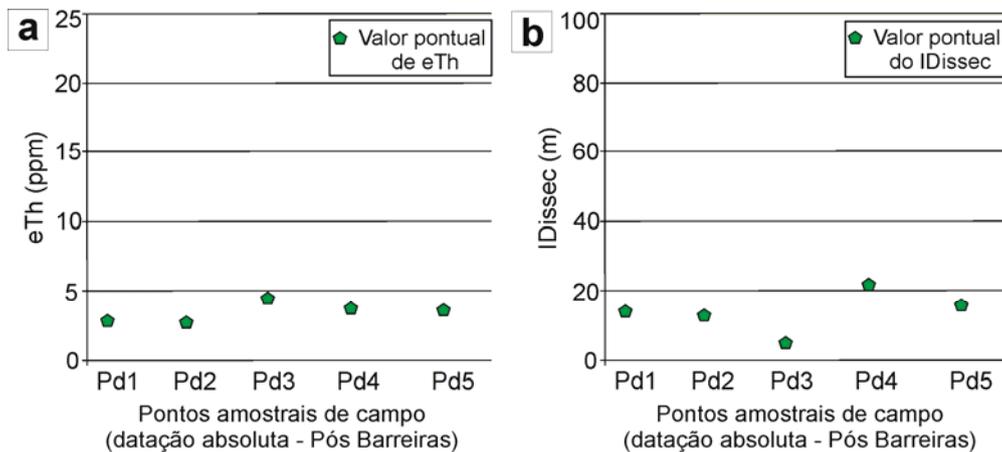


Figura 5. Síntese gráfica relativa à distribuição dos valores absolutos obtidos para os pontos com datação absoluta na área de estudo. (a) Medida de concentração de Tório. (b) Índice de dissecação do relevo – IDissec.

De modo geral, os resultados obtidos são consistentes com a idade mais recente da unidade Sedimentos Pós Barreiras. Do ponto de vista geomorfométrico era esperado que o relevo da área de predomínio dos sedimentos quaternários (Pós-Barreiras) tivesse sofrido com menor expressão os efeitos da erosão e o índice IDissec revelou que as porções amostrais sobre esta área são quantitativamente menos dissecadas em relação a área sob domínio da Formação Barreiras. Relação semelhante já foi observada por Andrades Filho e Rossetti (2011), porém com aplicação do índice integral hipsométrica (Hi), índice que não permite a geração de uma grade regular de valores de Hi, ao contrário do IDissec. Em contribuição, o produto de concentração de Th revela uma possível associação espacial entre as maiores concentrações (Formação Barreiras) e as menores concentrações (Pós Barreiras) (Figura 4). Tal resultado pode estar associado às colocações de Sordi (2007) que associa a maior concentração de Th às áreas sob maior influência do intemperismo químico, portanto, sendo a unidade Formação Barreiras (Mioceno) mais antiga que os sedimentos Pós-Barreiras é possível que esta área estivesse ou esteja exposta a uma maior ação do intemperismo químico. No entanto, é necessário a intensificação de estudos para confirmar estatisticamente tais correspondências e se possível incluir a análise de dados referentes a outros radioisótopos na área.

6. Conclusão

Os dados gamaespectrométricos (Th) e geomorfométricos (IDissec) são parâmetros que possibilitam a discriminação entre a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras na Bacia Paraíba. Estágios de menor dissecação do relevo e concentrações mais baixas do radioisótopo Tório estão associados às áreas amostrais na unidade Sedimentos Pós Barreiras. Portanto, a integração da variável geofísica (Th) variável geomorfométrica (IDissec) possui grande potencial para mapeamento das unidades sedimentares que ocorrem ao longo da costa nordeste brasileira.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, pelo auxílio à pesquisa (Projeto # FAPESP#06/04687-7) e pela concessão da bolsa de doutorado ao primeiro autor, e ao CNPq, pela concessão de bolsa de produtividade em pesquisa ao segundo e terceiro autor. Agradecemos também a CAPES pelas bolsas de doutorado do quarto e quinto autores.

Referências Bibliográficas

- Andrades Filho, C. O.; Rossetti, D. F.; Zani, H. Hipsometria derivada de MDE-SRTM aplicada na distinção entre a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras na Bacia Paraíba. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. Anais... São José dos Campos: INPE, 2011. p. 3443-3450.
- Bezerra, F. H. R.; Neves, B. B. B.; Correa, A. C. B.; Barreto, A. M. F.; Suguio, K.. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin - The Cariatá trough, northeastern Brazil. **Geomorphology**, v. 01, p. 555-582, 2008.
- Grohmann, C. H. ; Smith, M. J. ; Riccomini, C. . Multiscale Analysis of Topographic Surface Roughness in the Midland Valley, Scotland. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, p. 1200-1213, 2011.
- Paradella, W.R.; Santos, A.R.; Paulo, V.; Cunha, E.S.P. Radares Imageadores nas Geociências: Estado da Arte e Perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 1, p. 50-62, 2005.
- Muñoz, V. A. ; Valeriano, M. M. . Modelagem da dissecação por geoprocessamento para delineamento de manchas de solo. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 2009. p. 7741-7748.
- Reuter, H. I, Nelson, A., Jarvis, A. An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 21, n. 9, p. 983-1008, 2007.
- 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 Brazil: implications for the interplay among landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 300, p. 191-204, 2011
- Rossetti, D. F.; Góes, A. M.; Bezerra, F. H. R.; Valeriano, M. M.; Brito-Neves, B. 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, 2012.
- Sordi, D. A. **Aerogeofísica aplicada a compreensão do sistema de empurrões da sequência Santa Terezinha de Goiás, Brasil, Central**. 130 p. Dissertação (Mestrado em Geologia)-Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- Valeriano, M. M.; Rossetti, D. F. Análise digital do padrão de coerência da orientação de vertentes em terrenos planos. In: XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário Abequa, 2011, Armação de Búzios, RJ São Paulo, SP. **Anais...** 2011. p. 1-5. DVD.
- Valeriano, M. M.; Rossetti, D. F.. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.