Intensidade tectônica relativa da borda norte da Bacia Paraíba (PB) com base em técnicas de geoprocessamento

Fabio Corrêa Alves

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil {alves.fabioc@gmail.com}

Resumo. A região nordeste do Brasil foi considerada por muito tempo como tectonicamente estável devido à sua localização na margem passiva da placa Sul-Americana. Porém, têm sido crescente o registro de estruturas tectônicas em diferentes setores dessa região, particularmente, na Bacia Paraíba, onde falhas e dobras exercem forte controle no relevo. Influência neotectônica têm sido inferida com base em análise morfoestrutural e índices geomórficos. Esses últimos vêm sendo combinados com operações de geoprocessamento a fim de estabelecer classes de intensidade tectônica relativa, em diversos assentamentos geológicos. Porém, faltam ainda mais análises, visando melhor definir índices e critérios para uma categorização adequada de áreas com forte influência tectônica. O objetivo do presente trabalho é estabelecer classes de intensidade tectônica relativa em sub-bacias localizadas na borda norte da Bacia Paraíba, a partir da integração dos índices geomórficos fator de assimetria de bacias (AF), fator de simetria topográfica transversal (FSTT) e índice de forma de bacia (Bs) com base em técnicas de geoprocessamento. Os índices geomórficos foram calculados a partir de modelo digital de elevação (MDE) derivado da missão Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) e operações de geoprocessamento. As classes de intensidade tectônica relativa foram geradas a partir da operação de algebra de mapas, em especial, utilizando inferência geográfica por lógica Fuzzy. Junto com o contexto geológico da área de estudo, os resultados obtidos sugerem que os cenários derivados pelos operadores Fuzzy Gamma 0,7 e Fuzzy Or foram os que melhor representam o arcabouço estrutural da área de estudo. Sub-bacias classificadas com classes de intensidade tectônica relativa variando entre alta e muito alta estão situadas em áreas de relevo dômico, com forte influência na configuração do padrão regional da drenagem e relevo. Em áreas de bons afloramentos em campo, essas áreas dômicas registram depósitos sedimentares contendo estruturas dobradas, sobretudo, na porção sul da Bacia Paraíba.

Palavras-chave: Análise morfoestrutural, neotectônica, modelo digital de elevação, lógica Fuzzy.

1. Introdução

Várias publicações recentes tem demonstrado influência de atividades neotectônicas na região nordeste do Brasil, apesar de sua localização na margem passiva da placa Sul-americana (p.e., Bezerra et al., 2008, 2014; Brito Neves et al., 2004, 2009; Rossetti et al., 2011a, 2011b; Alves e Rossetti, 2016). Influência neotectônica na região tem sido sugerida com base em análise morfoestrutural e de campo, bem como, a partir do uso de índices geomórficos. Esses vêm demonstrando potencial favorável à caracterização quantitativa do arcabouço estrutural da Bacia Paraíba, como demonstra publicações prévias (Alves et al., 2014; Andrades Filho e Rossetti, 2015).

Índices geomórficos têm sido aplicados em segmentos únicos da rede de drenagem, a bacias hidrográficas, ou em áreas de interesse particular. Muitos desses índices tem sua aplicação favorecida com base em dados topográficos obtidos diretamente de modelos digitais de elevação (MDEs), como aqueles da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), adquiridos na banda C ($\lambda = \sim 5.6$ cm) por interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) (Rabus et al., 2003). Para alguns índices, entretanto, operações de aquisição de dados e cálculos matemáticos representam um consumo de tempo considerável. Porém, índices como o fator de assimetria de bacias (AF), fator de simetria topográfica transversal (FSTT) (Hare e Gardner, 1985; Cox, 1994) e o índice de

forma de bacia (Bs) (Ramırez-Herrera, 1998) têm aplicação favorecida por permitirem reconhecer, de maneira simples, áreas sujeitas a deformações tectônicas, quando excluída a possibilidade de interferência geológica (p.e., El Hamdouni et al., 2008; Garrote et al., 2008; Sarma et al., 2011, Mahmood; Gloaguen, 2012; Ibanez et al., 2014; Jacques et al., 2014).

Diversas operações de geoprocessamento vêm sendo combinadas com índices geomórficos para o estabelecimento de classes de intensidade tectônica relativa, não apenas em áreas do território brasileiro (p.e., Andrades Filho; Rossetti, 2015), mas também em diversas outras áreas do globo (El Hamdouni et al., 2008; Mahmood; Gloaguen, 2012). Porém, faltam ainda mais análises, visando melhor definir índices e critérios para uma categorização adequada de áreas com forte influência tectônica. Dentre as principais operações utilizadas com essa finalidade destaca-se à operação de algebra de mapas, a partir da manipulação de dados vetoriais e matriciais combinada com métodos de inferência geográfica, como, por exemplo, utilizando operadores por lógica Fuzzy (p.e., *Or, And, Product, Sum e Fuzzy Gamma*) (Moreira et al., 2003).

A porção norte da Bacia Paraíba na região nordeste do Brasil é uma área adequada para aplicação dos índices geomórficos AF, FSTT e Bs a fim de estabelecer classes de intensidade tectônica relativa. Isto porque essa área possui registro de estruturas tectônicas, como falhas e dobras, com forte influência na configuração regional da drenagem e relevo (Alves e Rossetti, 2016), esse último sendo configurado por feições dômicas típicas, com morfologia convexa e altitudes elevadas (Figura 1c). Assim, o objetivo do presente trabalho é estabelecer classes de intensidade tectônica relativa em sub-bacias localizadas na borda norte da Bacia Paraíba, a partir da integração dos índices geomórficos AF, FSTT e Bs com base em técnicas de geoprocessamento.

2. Material e Métodos 2.1. Área de estudo

A área proposta para o presente estudo está localizada na porção norte emersa da Bacia Paraíba, no Estado da Paraíba, região nordeste do Brasil (Figura 1a-c).

No setor oeste da área de estudo, ocorrem rochas do embasamento cristalino, constituídas por gnaisses e migmatitos da Província Estrutural Borborema (Brito Neves et al., 2009) (Figura 1b). Para leste, ocorrem rochas da Bacia Paraíba, limitada pela falha de Mamanguape ao norte e pelo lineamento Pernambuco ao sul (Figura 1b). De forma geral, as unidades aflorantes em superfície na área de estudo consistem principalmente de Sedimentos Pós-Barreiras (Rossetti et al., 2012) e, secundariamente, da Formação Barreiras (Barbosa et al., 2003). Além dessas unidades sedimentares, a Bacia Paraíba também contém sedimentos aluviais recentes (Holoceno Tardio) ao longo dos vales fluviais (Figura 1c).



Figura 1. (a) Localização da área de estudo no nordeste brasileiro. (b) Contexto geológico e estrutural da porção emersa da Bacia Paraíba. (c) Detalhe da área de estudo no MDE-SRTM em paleta de cores personalizada, com indicação das dezoito sub-bacias analisadas no presente trabalho (Rd = Relevo dômico).

2.2. Material

Duas cenas de MDE-SRTM v.3, produzido na resolução espacial de 1 arco-segundo (~30m) desde a aquisição (acesso em: http://earthexplorer.usgs.gov/) foram utilizadas como base para extração semi-automática da rede de drenagem e sub-bacias correspondentes. Além desses dados também foi utilizada a base vetorial de máscara de córpos d'água derivada dos dados SRTM (acesso em: http://earthexplorer.usgs.gov/). Todos esses dados foram analisados e integrados em estrutura de sistema de informação geográfica (SIG). Como informações complementares para validação, foram utilizados registros fotográficos de afloramentos da Formação Barreiras e dos sedimentos Pós-Barreiras, a partir de campanhas prévias de campo.

2.3. Métodos

2.3.1. Extração de rede de drenagem e sub-bacias

Inicialmente, o MDE-SRTM foi pré-processado com aplicação de máscara de córpos d'água. Esse MDE-SRTM devidamente pré-processado foi utilizado como base para extração da rede de drenagem e sub-bacias com auxílio do aplicativo TerraHidro que possui operações adequadas para análises hidrológicas consistentes, como demonstra um estudo recente (Rosim et al., 2013). Para atingir tal finalidade as seguintes operações foram realizadas: (i) conversão do MDE-SRTM para direção de fluxo; (ii) conversão de fluxo para área de contribuição e; (iii) extração da rede de drenagem. Como limiar de área de contribuição para extração da rede de drenagem foi utilizado o valor de 5.000 pixels. A etapa seguinte foi converter a base de rede de drenagem para arquivo vetorial em geometria linha. Com base no arquivo vetorial de rede de

drenagem foram extraídas sub-bacias em torno das áreas de relevo dômico (Figura 1c). Dezoito sub-bacias principais foram extraídas e utilizadas como base para aplicação dos três índices geomórficos (Figura 1c). Sub-bacias principais se referem à sub-bacias \geq a ordem 3 (Strahler, 1957), com área de drenagem igual ou superior a 18,4 km².

2.3.2. Cálculo de índices geomórficos

Com base na manipulação dos arquivos vetoriais de rede de drenagem e sub-bacias hidrográficas foi realizado o cálculo dos índices AF, FSTT e Bs. O índice AF foi calculado com base nos valores de área total (At) e de margem direita (Ar) de cada sub-bacia avaliada, de acordo com a equação 1:

$$AF = (Ar/At) \times 100 (1)$$

Onde Ar é a área da bacia de drenagem da margem direita do rio (olhando na direção a jusante), At é a área total da bacia de drenagem. Em áreas geologicamente uniformes, AF maior ou menor que 50 indica bacias assimétricas sugestivas de atividade tectônica, enquanto que bacias com valores de AF próximo a 50 são simétricas, onde não existe ou existe pouca influência de atividades tectônicas (Hare and Gardner, 1985; Cox, 1994).

O FSTT foi calculado com base na informação de distâncias computadas entre rios principais, eixos de sub-bacias e interflúvios de acordo com a equação 2:

$$T \text{ index} = Da/Dd (2)$$

Onde, Da é a distância da linha do eixo médio da sub-bacia ao rio principal ativo, Dd é a distância da linha do eixo médio da sub-bacia ao seu interflúvio. Valores de FSTT próximos a 0 indicam que não há alteração do perfil topográfico, enquanto a assimetria aumenta à medida que os valores se aproximam de 1 (Cox, 1994). As causas dessas variações podem estar relacionadas à dinâmica natural inerente ao sistema fluvial ou, mais comumente, a fatores tectônicos (Garrote et al., 2008). O cálculo dos valores de distâncias (i.e., dos parâmetros Da e Dd) foram feitos de forma semi-automática utilizando o algoritmo *ValleyMorph Tool* disponibilizado recentemente pela comunidade de sensoriamento remoto em ambiente *Python* (Daxberger et al., 2014). Para cada sub-bacia analisada, o FSTT foi aplicado ao longo do rio principal, em intervalos espaçados a cada 500 m, a fim de se obter amostras com representatividade estatística. Esse limiar de comprimento foi escolhido por representar pelo menos duas vezes a largura de segmentos de rios da área de estudo (c.f., Cox, 1994).

As seguintes operações de geoprocessamento foram adicionalmente utilizadas a fim de calcular pontualmente os valores do índice FSTT: (i) edição vetorial (p.e., conversão de dados vetoriais de linhas pra pontos); (ii) edição de campos em tabelas para cálculo do índice FSTT e; (iii) resgate de informações georreferenciadas através de um campo em comum (ID). Porém, após análise em detalhe dos valores pontuais de FSTT ao longo de cada rio principal foram identificados valores espúrios, bem como, subestimativa e superestimativa de amostras, principalmente, em segmentos assimétricos de rios. Assim, com o intuito de realizar uma análise consitente dos dados, as amostras de FSTT contendo tais características foram editadas e excluídas do conjunto final analisado. Após isso, foi feita a regionalização dos valores pontuais

do índice FSTT em cada sub-bacia avaliada. Para isso, foi utilizada a média, como parâmetro estatístico representativo do conjunto de dados analisado.

O índice Bs foi computado com base na projeção horizontal das sub-bacias, isto é, utilizando as informações de comprimento e largura da sub-bacia hidrográfica, de acordo com a equação 3:

$$Bs = B1/Bw$$
 (3)

Onde, B1 é o comprimento da sub-bacia medido do seu ponto da cabeceira à foz, Bw é a largura da sub-bacia medida em seu ponto de maior amplitude. Altos valores de Bs são associados a sub-bacias alongadas, geralmente associadas a influência de atividade tectônica alta, enquanto que baixos valores de Bs indicam sub-bacias com forma mais circular, onde geralmente há baixa influência tectônica (Bull e McFadden, 1977; Ramırez-Herrera, 1998). Após realizado o cálculo de todos os três índices geomórficos, o valor resultante de cada índice foi adicionado na tabela de atributos das sub-bacias hidrográficas.

2.3.3. Algebra de mapas

Após cálculo dos três indices geomórficos utilizados no presente trabalho, esses tiveram seus valores normalizados entre 0 e 1 (transformação linear simples) para posterior aplicação de inferência geográfica por lógica *Fuzzy*. Esses dados foram posteriormente convertidos em arquivos no formato matricial. No caso do presente trabalho foram testados dois operadores por lógica Fuzzy, que incluem: Or e operador *Fuzzy Gamma*. O operador *Fuzzy Or* atribui para cada pixel de saída o valor máximo contido entre os membros do plano de informação de entrada (Moreira et al., 2003). O operador Or é expresso pela seguinte equação 4:

Fuzzy
$$Or = max(p1, ..., pn)$$
 (4)

Onde p1 é o plano de informação de entrada.

O operador *Fuzzy Gamma* é o produto algébrico dos operadores *Fuzzy Product* e *Fuzzy Sum* elevados ao expoente *gamma*, de acordo com a seguinte equação 5:

$$\mu(\mathbf{x}) = (FuzzySum)^{\gamma} \mathbf{x} (FuzzyProduct)^{1-\gamma} (5)$$

Onde, γ varia entre 0 e 1. Se o valor de *gamma* é 1, o valor do plano de informação resultante dependerá apenas do operador *Fuzzy Sum*, se o *gamma* é 0, o valor de saída dependerá apenas do operador *Fuzzy Product* (Moreira et al., 2003). Limiares próximos aos valores extremos irão indicar uma tendência diminutiva e aumentativa nos valores de saída. Além disso, alteração nos valores de *gamma* geram produtos com diferentes cenários de análise. Para efeitos comparativos, foram testados três limiares de *gamma*, incluíndo os valores 0,25, 0,5 e 0,7. Esses limiares foram definidos empiricamente, com base em testes prévios. Após aplicação de inferência geográfica por lógica *Fuzzy*, os valores dos diferentes cenários analisados foram agrupados em intervalores regulares, e atribuídos a cinco classes temáticas de intensidade tectônica relativa, sendo elas: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. A metodologia empregada no presente trabalho está expressa no modelo OMT-G da figura 2.



Figura 2. Modelo OMT-G de execução do trabalho proposto.

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos com a aplicação do índice AF são ilustrados na Figura 3. Para efeito comparativo, os valores do índice AF foram fatiados em cinco classes de interesse: muito baixo (AF < 0,2), baixo (AF entre 0,2 - 0,4), moderado (AF entre 0,4 e 0,6), alto (AF entre 0,6 e 0,8) e muito alto (AF > 0,8). Assim, classes com valores altos e muito altos de AF representando subbacias altamente assimétricas foram emcontradas nas sub-bacias 3, 11, 12, 14, 15, e 18 (Figura 3). Sub-bacias classificadas com valores moderados de AF com nível de assimetria moderada incluiu apenas as sub-bacias 2 e 17 da porção norte e sul da área de estudo, respectivamente. Classes de AF com valores baixos e muito baixos sugestivos de sub-bacias simétricas, e, portanto, com baixa influência de atividade tectônica incluem as sub-bacias 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13 e 16 (Figura 3).



Figura 3. Valores normalizados do índice AF para o conjunto de dezoito sub-bacias avaliadas na área de estudo.

Os valores do índice FSTT em cada sub-bacia avaliada, bem como, a indicação dos valores pontuais de FSTT em cada segmento de drenagem analisado são ilustrados na Figura 4. Os primeiros foram agrupados em cinco classes de interesse, incluíndo: muito baixo (FSTT < 0,2), baixo (FSTT entre 0,2 - 0,4), moderado (FSTT entre 0,4 e 0,6), alto (FSTT entre 0,6 e 0,8) e muito alto (FSTT > 0,8). Assim, classes com valores altos e muito altos de FSTT que representam sub-bacias altamente assimétricas foram encontradas nas sub-bacias da porção central e sul da área de estudo. Essas incluem as sub-bacias 11, 12, 13, 14, 15 e 18 (Figura 4). Sub-bacias classificadas com valores moderados de FSTT com nível de assimetria moderada inclui apenas as sub-bacias 2, 3, 10 e 17. Classes de FSTT com valores baixos e muito baixos sugestivas de sub-bacias 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 16 (Figura 4). Em geral, sub-bacias classificadas com menor grau de assimetria ocorreram na porção norte da área de estudo, enquanto que na porção central e sul ocorreram sub-bacias mais assimétricas.



Figura 4. Valores do índice FSTT regionalizados para cada sub-bacia avaliada na área de estudo. Também inclusos estão os valores pontuais do índice FSTT em cada segmento de drenagem avaliado (Rd = relevo dômico).

Em análise de maior detalhe considerando os valores de FSTT distribuídos pontualmente em cada trecho de drenagem, observou-se que, em geral, vários segmentos de rios assimétricos ocorrem em sub-bacias situadas sobre ou em torno das áreas dômicas, como é o caso, por exemplo, das sub-bacias 11, 12, 13 e 18 (Figura 4). Análise comparativa entre os valores normalizados dos índices de assimetria FSTT e AF aplicados para as dezoito sub-bacias da área de estudo revelou uma tendência de correlação linear entre o conjunto de dados analisado, o que sugere uma boa consistência na aplicação desses dois índices (Figura 5).



Figura 5. Diagrama de dispersão bidimensional entre os valores do índice AF e FSTT de dezoito sub-bacias avaliadas no presente trabalho.

A figura 6 ilustra os resultados obtidos com a aplicação do índice Bs. Esses valores também foram agrupados em cinco classes de interesse, sendo elas: muito baixo (Bs < 0,2), baixo (Bs entre 0,2 - 0,4), moderado (Bs entre 0,4 e 0,6), alto (Bs entre 0,6 e 0,8) e muito alto (Bs > 0,8). Assim, classes com valores altos e muito altos do índice Bs que representam sub-bacias alongadas, com influência de atividade tectônica alta foram encontradas apenas nas sub-bacias 1 e 18, localizadas nos extremos da área de estudo (Figura 6). Sub-bacias classificadas com valores moderados de índice Bs tendo formas variando entre alongada e circular incluem as sub-bacias 6, 8, 10, 14, 16 e 17 (Figura 6). Classes com valores baixos e muito baixos sugestivas de sub-bacias com formas circulares e menor influência de atividade tectônica incluem as sub-bacias 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 12, 13 e 15 (Figura 6).

Os diferentes cenários obtidos através da aplicação de lógica Fuzzy são apresentados na Figura 7. Os valores mais altos nos cenários derivados pelos operadores Fuzzy foram interpretados como sendo regiões de sub-bacias que tendem a ter maior controle tectônico (classes em cores mais escuras), enquanto que os menores valores consistem em regiões com baixa influência de atividade tectônica (classes em cores mais claras) (Figura 7). Em todos esses cenários a sub-bacia 18 apresentou-se com classe de intensidade tectônica relativa muito alta (Figura 7a-d). No geral, os cenários resultantes dos operadores Fuzzy Gamma 0,25 e 0,5 revelaram valores mais baixos, com classes de intensidade tectônica relativa variando entre muito baixa, baixa e moderada, particularmente, nas sub-bacias da porção norte da área de estudo (Figura 7a-b). Exceção foram as sub-bacias 14 e 18 que apresentaram classes de intensidade tectônica relativa alta e muito alta, respectivamente (Figura 7a-b). Por outro lado, os cenários resultantes dos operadores *Fuzzy Gamma* 0,7 e *Fuzzy Or* apresentaram valores mais elevados, com classes de intensidade tectônica relativa levemente mais acentuadas que os demais cenários (Figura 7c-d). Em ambos esses cenários, as sub-bacias situadas na porção central e sul da área de estudo foram as que apresentaram classes com altos níveis de intensidade tectônica, isto é, variando entre alta e muito alta (Figura 7c-d).

Com base nos resultados apresentados aqui e considerando o contexto geológico da área de estudo, os cenários que melhor representam o arcabouço estrutural da área de estudo foram aqueles obtidos pelos operadores *Fuzzy Gamma* 0,7 e *Fuzzy Or* (Figura 7c-d). Isto porque, o conjunto de sub-bacias caracterizadas com classes de intensidade tectônica relativa alta e muito alta, como as verificadas nesses dois cenários estão localizadas sobre maior influência de áreas onde há relevos soerguidos, provavelmente associados a estruturas tectônicas de dobras (Figura 8).



Figura 6. Valores normalizados do índice Bs para o conjunto de dezoito sub-bacias avaliadas na área de estudo.



Figura 7. Classes de intensidade tectônica relativa da área de estudo geradas a partir de inferência por lógica *Fuzzy* com base nos seguintes operadores: *Fuzzy Gamma* 0,25 (a), *Fuzzy Gamma* 0,5 (b), *Fuzzy Gamma* 0,7 (c) e *Or* (d).



Figura 8. Exemplos de afloramentos rochosos com estruturas dobradas. (a) Afloramento em falésia no litoral sul de João Pessoa, com dobra (sinclinal) na Formação Barreiras. (b) Afloramento na Rodovia BR 101, sul de João Pessoa, onde a Formação Barreiras é dobrada, mas os Sedimentos Pós-Barreiras sobrejacentes estão em posição de deposição original. (c) Perfil topográfico da área de estudo ilustrando o padrão regional do relevo configurado por feições dômicas (ver localização do perfil na Figura 7d). (d) Perspectiva em 3D do relevo dômico da porção central da área de estudo (Rd = relevo dômico).

Em áreas com afloramentos rochosos em campo, como é o caso da porção sul da área de estudo, é possível encontrar o registro de dobramentos em depósitos sedimentares, principalmente, da Formação Barreiras (Figura 8a-b). Essas estruturas tectônicas ocorrem não apenas em áreas dômicas como as registradas na porção sul da Bacia Paraíba, mas também ao longo das falésias desse setor do litoral nordestino. Adicionalmente, características morfológicas das áreas dômicas, tais como forma convexa, cotas altimétricas superiores as de terrenos mais antigos do embasamento cristalino adjacente (ver Figuras 1c e 8c-d) bem como, drenagem anômala com padrão variando entre recurvado a radial, sugerem processo de inversão neotectônica de bacia sedimentar. Embora na porção central e norte da área de estudo há uma

escassez de bons afloramentos em campo, o registro de estruturas tectônicas em relevo dômico similar da porção sul (Figura 8) corrobora a hipótese de sua origem induzida também por estruturas tectônicas de dobras. Relevos dômicos contendo estruturas tectônicas, como falhas e dobras, em depósitos sedimentares neógenos e quaternários já foram descritos não apenas na Bacia Paraíba (Bezerra et al., 2008, 2014; Brito Neves et al., 2004, 2009; Rossetti et al., 2011a, 2011b) mas também para outras áreas do nordeste brasileiro (Maia e Bezerra, 2014).

4. Considerações finais

A integração dos índices geomórficos AF, FSTT e Bs com operações de geoprocessamento utilizadas na presente análise foram úteis para a identificação de classes de intensidade tectônica relativa na borda norte da Bacia Paraíba. Em particular, o método de inferência geográfica por lógica Fuzzy se revelou com potencial para gerar diferentes cenários a fim de melhor representar classes de intensidade tectônica relativa na área de estudo. Os resultados obtidos sugerem que os cenários obtidos pelos operadores Fuzzy Or e Fuzzy Gamma 0,7 foram os que melhor representam o arcabouço estrutural da área de estudo. Esses cenários revelaram sub-bacias com classes de intensidade tectônica relativa classificadas como alta e muito alta, principalmente, aquelas situadas na porção central e sul da área de estudo. Essas subbacias estão situadas sobre ou no entorno de relevo dômico típico com forte influência na configuração do padrão regional da drenagem e relevo, revelando estruturas tectônicas de dobras em áreas com bons afloramentos em campo. Porém, estudos futuros são necessários a fim de explorar limiares e índices adicionais com potencial para a caracterização estrutural não apenas da área de estudo, mas também de outros contextos tectônicos do globo. Além disso, a seleção minuciosa de critérios, incluindo a atribuição de pesos as variáveis de entrada por técnicas de suporte à decisão, como a de Processo Analítico Hierárquico (AHP) poderá auxiliar na delimitação mais precisa de classes de intensidade tectônica relativa.

Referências bibliográficas

Alves, F.C.; Rossetti, D.F.; Andrades Filho, C.O.; Cremon, E.E. Fator de assimetria e deformações neotectônicas na Bacia Paraíba, Nordeste do Brasil. **Revista Geonorte**, v. 10, p. 128-134, 2014.

Alves, F.C.; Rossetti, D.F. Influência neotectônica no estabelecimento dos vales dos rios Paraíba e Mamanguape, norte da Bacia Paraíba (PB). **Revista brasileira de geomorfologia**, v. 17, p. 517-532, 2016.

Andrades Filho, C.O.; Rossetti, D.F. Intensidade da atividade tectônica na porção emersa da Bacia Paraíba e embasamento cristalino adjacente, Nordeste do Brasil. **Pesquisa em Geociências**, v.42, p.113-130, 2015.

Barbosa, J.A.; Souza, E.M.; Lima Filho, M.; Neumann, V.H. A estratigrafia da bacia Paraíba: uma reconsideração. **Estudos Geológicos**, v. 13, p. 89-108, 2003.

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. 97, p. 555-582, 2008.

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 zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. **Tectonophysics**, v. 614, p. 78-90, 2014.

Brito Neves, B.B.; Riccomini, C.; Fernandes, T.M.G.; Sant´anna, L.G. O sistema tafrogênico terciário do saliente oriental nordestino na Paraíba: um legado Proterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 1, p. 127-134, 2004.

Brito Neves, B.B.; Albuquerque, J.P.T.; Coutinho, J.M.V.; Bezerra, F.H.R. Novos dados geológicos e geofísicos para caracterização geométrica e estratigráfica da Sub-Bacia de Alhandra (sudeste da Paraíba). **Geologia USP-Série Científica**, v. 9, p. 63-87, 2009.

Bull, W.B.; McFadden, L.D. **Tectonic geomorphology north and south of the Garlock Fault, California**. In Doehring, D.O. (Ed.), Geomorphology in Arid Regions, Proceedings of Eighth Annual Geomorphology Symposium, State University of New York, Binghamton, p. 115–138, 1977.

Cox, R.T. Analysis of drainage basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. **Geological Society of American Bulletin**, v. 106, p. 571-581, 1994.

Daxberger, H.; Dalumpines, R.; Scott D.M.; Riller U. The ValleyMorph Tool: An automated extraction tool for transverse topographic symmetry (T-) factor and valley width to valley height (Vf-) ratio. **Computers and Geosciences**, v.70, p. 154-163, 2014.

El Hamdouni, R.; Irigaray, C.; Fernández, T.; Chacón, J.; Keller, E.A. Assessment of relative active tectonics, southwest border of the Sierra Nevada (Southern Spain). **Geomorphology**, v. 96, p.150-173, 2008.

Garrote, J.; Heydt, G.G.; Cox, R.T. Multi-stream order analyses in basin asymmetry: a tool to discriminate the influence of neotectonics in fluvial landscape development (Madrid Basin, Central Spain). **Geomorphology**, v. 102, p. 130-144, 2008.

Hare, P.W.; Gardner, T.W. **Geomorphic indicators of vertical neotectonism along converging plate margins, Nicoya Peninsula, Costa Rica**. In: Morisawa, M., and Hack, J.T. (Eds.), Tectonic geomorphology: Proceedings of the 15th Geomorphology Symposia Series, Binghamton, p. 76-104, 1985.

Ibanez, D.M.; Riccomini, C.; Miranda, F.P. Geomorphological evidence of recent tilting in the Central Amazonia Region. **Geomorphology**, v. 214, p. 378-387, 2014.

Jacques, P.D.; Salvador, E.D.; Machado, R.; Grohmann, C.H.; Nummer, A.R. Application of morphometry in neotectonic studies at the eastern edge of the Paraná Basin, Santa Catarina State, Brazil. **Geomorphology**, v. 213, p. 13-23, 2014.

Maia, R.P.; Bezerra, F.H.R. Inversão neotectônica do relevo na Bacia Potiguar, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, p. 61-74, 2014.

Mahmood, S.M.; Gloaguen, R. Appraisal of active tectonics in Hindu Kush: Insights from DEM derived geomorphic indices and drainage analysis. **Geoscience Frontiers**, v.3, p.407-428, 2012.

Moreira, F.; Barbosa, C.; Câmara, G.; Almeida-Filho, R. Inferência Geográfica e Suporte à Decisão. In: Câmara, G.; Davis, C. e Monteiro, A.M.V. (Ed.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2003.

Rabus, B.; Eineder, M.; Roty, A.; Bamler, R. The Shuttle Radar Topographic Mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. ISPRS **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262, 2003.

Ramırez-Herrera, M.T. Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt. **Earth Surface Processes and Landforms,** v. 23, p. 317-332, 1998.

Rossetti, D.F.; Bezerra, F.H.; Góes, A.M.; Brito Neves, B.B. Sediment deformation in Miocene and post-Miocene strata, Northeastern Brazil: evidence for paleoseismicity in a passive margin. **Sedimentary Geology**, v. 235, p. 172-187, 2011a.

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: landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 300, p. 191-204, 2011b.

Rossetti, D.F.; Góes, A.M.; Bezerra, F.H.; 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 Ciência**, v. 84, p. 313-334, 2012.

Rosim, S.; Oliveira, J.R.F.; Jardim, A.C.; Namikawa, L.M.; Rennó, C.D. **TerraHidro: A Distributed Hydrology Modelling System With High Quality Drainage Extraction**. GEOProcessing 2013: The Fifth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services, p.161-167, 2013.

Sarma, J.N.; Acharjee, S.; Gogoi, C. Application of DEM, Remote Sensing and Geomorphic Studies in Identifying a Recent [or perhaps Neogene?] Upwarp in the Dibru River Basin, Assam, India. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 39, p. 507-517, 2011.

Strahler, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions of the American Geophysical Union**, v. 38, p. 913-920, 1957.