

O uso da assimetria de bacias para o estudo neotectônico na Amazônia Central

Delano Menecucci Ibanez
Claudio Riccomini

Universidade de São Paulo - USP/IGc
Rua do Lago, 562 - 05508-080 – São Paulo - SP, Brasil
dibanez@usp.br, riccomin@usp.br

Abstract. We analyzed drainage-basin geometry in Central Amazonia in order to detect areas of lateral stream migration that could indicate recent tectonism. Toward this goal, a field of drainage basin asymmetry vectors was generated from a digital terrain model produced by the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) and compared to geologic structures, seismicity and geomorphological data. Transverse basin profiles were converted to two-dimensional vectors that denote channel position with respect to basin divides. These basin-asymmetry vectors record the net direction and degree of lateral migration of trunk streams. More than 2700 vectors were measured and spatially averaged within about 343 km² bins. This field of 30 mean vectors delineates 9 domains that show preferred directions of stream migrations possibly driven by ground tilting. Comparison of our mean vector field with geologic and geophysical data suggests that some domain boundaries are probably related to subsurface faults. Some domain boundaries correspond to mapped faults above Paleozoic section in our study area. Other subsurface and surface structures are also coincident with domain boundaries. In the northern part of the area, a domain is coincident with the region where a high concentration of seismic activity is associated with the Balbina dam. Thus, our results demonstrate that morphometric analysis of drainage-basin asymmetry can be an effective reconnaissance tool for identification of neotectonic movements.

Palavras-chave: neotectonic, drainage basins, Amazonia, SRTM, neotectônica, bacia hidrográfica, Amazônia, SRTM.

1. Introdução

De papel fundamental na vida dos povos amazônicos como meio de comunicação, comércio e fornecimento de alimentos e água, a rede de drenagem também mostra importante papel na indicação da atividade neotectônica da região. Ela tem sido relacionada em seu conjunto com as estruturas que compõem o arcabouço tectônico regional, em particular aquelas geradas e reativadas no Mesozóico (Costa et al. 2001), e aquelas indicativas da ocorrência de movimentação tectônica atual que alguns autores (Assumpção e Suárez 1988) consideram reflexos de movimentos das placas tectônicas do Caribe, de Nazca e da América do Sul.

A observação de feições retilíneas (Stenberg 1950) e/ou a identificação de padrões anômalos (Miranda et al. 1994) na rede de drenagem também tem sido usada como indicação da atividade neotectônica, especialmente na região do Rio Uatumã, na Amazônia Central.

Geologicamente, a região do Rio Uatumã está inserida no contexto da Bacia do Amazonas, a qual possui uma pilha sedimentar abrangendo sedimentos continentais, marinhos, marinhos rasos e fluviais, e rochas intrusivas, de idades desde o Proterozóico até o Recente (Cunha et al. 2007). Além disso, registros históricos de sismos (Assumpção e Suárez 1988), falhamentos em depósitos miocênicos (Soares 2007) e camadas deformadas por liquefação associada a abalos sísmicos (Riccomini e Soares 2004) têm demonstrado que se trata de uma área de intensa atividade sísmica.

Em áreas de densa cobertura vegetal, como a Amazônia, os dados do modelo digital de elevação da SRTM tem demonstrado grande potencial no estudo neotectônico (Almeida-Filho e Miranda 2007). Enquanto, que técnicas geomorfométricas, como a assimetria de bacia, aplicadas nos dados SRTM podem revelar valiosas informações do controle tectônico sobre a rede de drenagem (Käbner e Gloaguen 2009).

Neste estudo, a assimetria de bacias hidrográficas foi utilizada na região drenada pelos rios Urubu e Uatumã (Figura 1) para identificar domínios geomorfológicos que apresentem

fluxos preferenciais de direções de migração lateral. Estes resultados foram relacionados com estruturas de subsuperfície, dados estruturais de campo e padrões de sismicidade, para avaliar a possibilidade de que as migrações são motivadas pela movimentação atual de blocos. Os resultados mostram que a assimetria de bacias se relaciona com esses dados geológicos e geofísicos indicando, assim, possíveis basculamentos de blocos na região.

2. Materiais e Métodos

A estimativa de parâmetros morfométricos (índices geomórficos) requer a utilização de algum tipo de modelo digital de elevação. Visto que os MDEs oriundos de sensores remotos são mais precisos que os de carta topográfica disponível para a região amazônica (Santos et al. 2006), optou-se pelo emprego dos dados da SRTM, os quais foram aprovados para região amazônica no teste de precisão para o PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) classe A, para altimetria de escala 1:100.000 (Oliveira 2005).

Os dados da SRTM podem conter áreas com erro extremo de elevação como vãos e pontos espúrios, que podem representar valores extremamente altos (picos) ou negativos (vórtices). A partir disso, os valores espúrios foram eliminados e os vãos preenchidos por interpolação de vizinho mais próximo disponível no programa PCIGeomatica 9.1. Segundo Yilmaz (2007), a interpolação por vizinho mais próximo é um método eficiente para preencher os vãos nos dados quando estes estão uniformemente espaçados com apenas alguns valores em falta. Além do mais, esse método não provoca perda de exatidão altimétrica nos talwegues e divisores d'água. Após esse processamento de correção do MDE do SRTM, passou a se extrair informações morfométricas utilizando técnicas padrões de GIS por meio do ArcGIS e de scripts do Matlab.

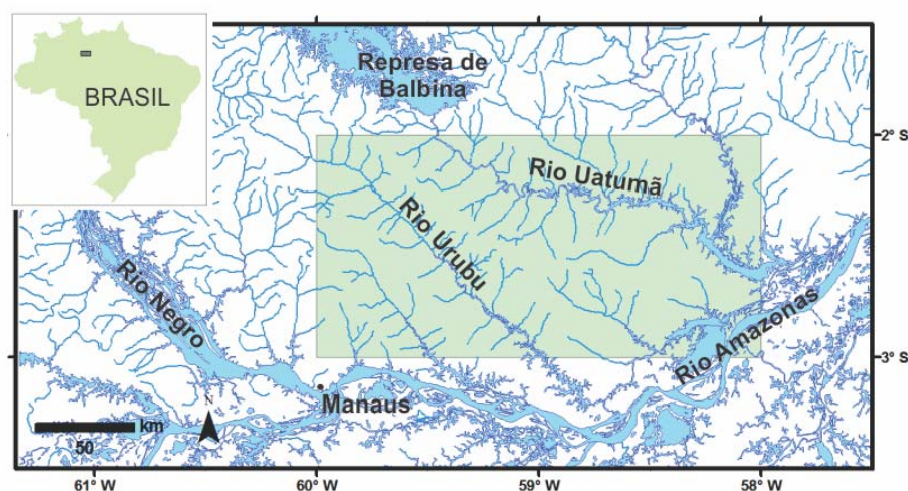


Figura 1: Localização da área de estudo, no flanco norte da Bacia do Amazonas.

2.1 Assimetria de Bacia

Para revelar possíveis padrões de basculamento na área de estudo foi utilizado o método de fator de simetria topográfica transversal (FSTT) de Cox (1994). O método FSTT avalia a quantidade de assimetria de um rio dentro de uma bacia e como esta assimetria varia de comprimento. Este método quantifica a direção da migração média para todos os canais de maiores ordens, permitindo, assim, uma discriminação entre migração de canais como uma consequência de processos internos fluviais ou de forças tectônicas (Garrote et al. 2008).

A Figura 2 mostra como foram obtidos os valores utilizados na relação $FSTT = D_a/D_d$, onde D_a é a distância da linha média da bacia até ao principal meandro ativo e D_d é a distância da linha média da bacia ao divisor da bacia. Quando não há alteração do perfil topográfico, FSTT é próximo a zero, enquanto a assimetria cresce à medida que os valores de

FSTT se aproximam de 1. Para uma melhor análise, o meandro ativo foi dividido em segmentos de 1,5 km e o método FSTT aplicado em cada segmento (Salvany 2004).

A análise da assimetria de bacias pelo método FSTT seguiu duas abordagens: a) o reconhecimento de domínios de assimetria utilizando a técnica de suavização de média estimada (running mean technique); e b) a análise individual da assimetria dos rios Abacate, Anebá, Caribe, Caru, Jatapu, Pitinguinha, Preto da Eva, Puraquequara, Sanabani, Uatumã e Urubu.

Na primeira abordagem, que já foi aplicada por Cox (1994) e Cox et al. (2001) para o sudoeste e sudeste do Mississippi, Estados Unidos, e Garrote et al. (2008) para a Bacia de Madrid, Espanha, utilizou-se a técnica de média estimada no reconhecimento de domínios preferenciais de assimetria dentro do campo de vetores. O campo vetorial foi suavizado pela média de todos os vetores espaciais dentro de uma caixa de aproximadamente 343 km² (10' x 10' ou 0,16667° x 0,16667°), no qual cada caixa fica em sobreposição de 50% com as caixas do lado norte, sul, leste e oeste. A média espacial em cada caixa gerou um campo de vetores médios distribuídos em uma grade de ~9,2667 km de espaçamento. O azimute do vetor médio indica a direção preferencial de migração lateral em cada caixa.

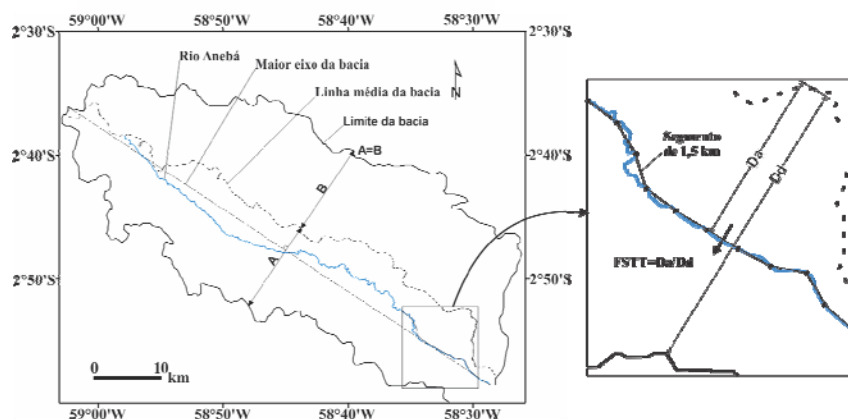


Figura 2: Cálculo do fator de simetria topográfica transversal (FSTT) para o deslocamento do rio Anebá considerando a topografia gerada por causas tectônicas.

O tamanho de ~343 km² foi escolhido para maximizar a resolução de quaisquer padrões nos dados, mantendo uma população média de aproximadamente 30 vetores por caixa. Cox et al. (2001) mencionam que populações menores não produzem médias significativas.

De acordo com a metodologia de Curry (1956), seguida por Tsodoulos et al. (2008), o nível estatístico de confiança de um vetor bidimensional pode ser determinado pela Equação 1:

$$p = e^{-(L^2 n)(10^{-4})} \quad (1)$$

onde p é a probabilidade de se obter um maior vetor magnitude médio pela combinação casual de vetores aleatórios, L é o vetor magnitude médio multiplicado por 100, e n é o número de observações. Deve-se ressaltar que sistematicamente a assimetria de bacias é sobreposta por outras propriedades da rede de drenagem, que podem ter um alto grau de aleatoriedade. Desse modo, para esse estudo, foi selecionado o valor 0,05 para p como limite superior evitando assim acomodar aleatoriedade herdada de outras propriedades (Cox et al. 2001).

Na segunda abordagem, aplicada por Salvany (2004) para a Bacia de Guadiamar, Espanha e Tsodoulos et al. (2008) para o Golfo de Corinto, Grécia, uma análise estatística de vetores foi utilizada para estimar a direção principal de migração, a magnitude e a dispersão dos rios Abacate, Anebá, Caribe, Caru, Jatapu, Pitinguinha, Preto da Eva, Puraquequara,

Sanabani, Uatumã e Urubu. Para cada conjunto de vetores, a direção principal foi encontrada por meio do cálculo do vetor resultante (Davis 2002). A direção do vetor resultante é a direção média (θ) de todos os vetores calculados. O comprimento do vetor resultante dividido pelo número de vetores calculado fornece o comprimento resultante médio (R), que é uma medida de dispersão (Davis 2002). O comprimento do vetor resultante varia de zero a um, onde valores de R perto de 1 indicam uma pequena dispersão da observação, enquanto que valores próximos de 0 estão amplamente dispersos (Tsodoulos et al. 2008). Ainda nessa abordagem, também foi calculado o nível estatístico de confiança para dados vetoriais bidimensionais, utilizando $p < 0,05$ como indicação de baixa probabilidade de que a distribuição tenha resultado pela amostragem casual de uma população aleatória (Curry 1956).

3. Resultados

Primeiramente, o método FSTT foi aplicado em onze rios da área de estudo (Figura 3). Os rios Abacate, Anebá, Caru, Preto da Eva, Puraquequara, Sanabani e Uatumã são caracterizados por migração SW, como sugerido pela direção média do vetor resultante (Tabela 1). O valor médio de FSTT é 0,64, 0,32, 0,14, 0,17, 0,16, 0,53 e 0,28, respectivamente. Os valores de R dos rios Abacate, Anebá e Sanabani mostram baixa dispersão, enquanto que os rios Caru, Preto da Eva, Puraquequara e Uatumã exibem uma dispersão de média a alta dos vetores. Isto sugere que somente os rios Abacate, Anebá e Sanabani têm migrado uniformemente para sudoeste.

Tabela 1: Parâmetros do fator de simetria topográfica transversal para as bacias hidrográficas da área de estudo. FSTT se refere ao fator de simetria, R a medida de dispersão e p a probabilidade do vetor ser aleatório.

Bacias	FSTTT	Direção de Basculamento (°)	R	p
Abacate	0,6365	223,0905	0,8486	<0,001
Anebá	0,3259	214,8065	0,9533	0,0084
Caribe	0,3837	0,5088	0,4951	<0,001
Caru	0,1380	207,6649	0,3669	0,7372
Jatapu	0,1994	276,5059	0,2846	0,1371
Pitinguinha	0,1580	76,2679	0,2497	0,8190
Preto da Eva	0,1734	191,2460	0,0850	0,1461
Puraquequara	0,1655	258,6778	0,4689	0,5180
Sanabani	0,5261	201,7691	0,8870	<0,001
Uatumã	0,2769	190,0196	0,0428	<0,001
Urubu	0,1591	352,7283	0,0335	0,0558

O rio Pitinguinha mostra valor médio de FSTT igual a 0,16 com migração para NE. Os valores de R (0,25) e do nível de significância (0,82) mostram que esse rio não migra uniformemente para nordeste. Uma migração uniforme também não foi verificada para os rios Caribe, Jatapu e Urubu. O rio Urubu apresenta valor médio de FSTT igual a 0,16 e migração para NW, enquanto que os rios Caribe e Jatapu exibem valores médio de FSTT igual a 0,38 e 0,20, respectivamente, e migração para N. A alta dispersão dos dados se confirmou pelos valores de R (0,03, 0,49 e 0,28, respectivamente), enquanto que a probabilidade dos dados serem aleatórios se apresenta maior que 0,05 para os rios Urubu e Jatapu, e menor que 0,05 para o rio Caribe.

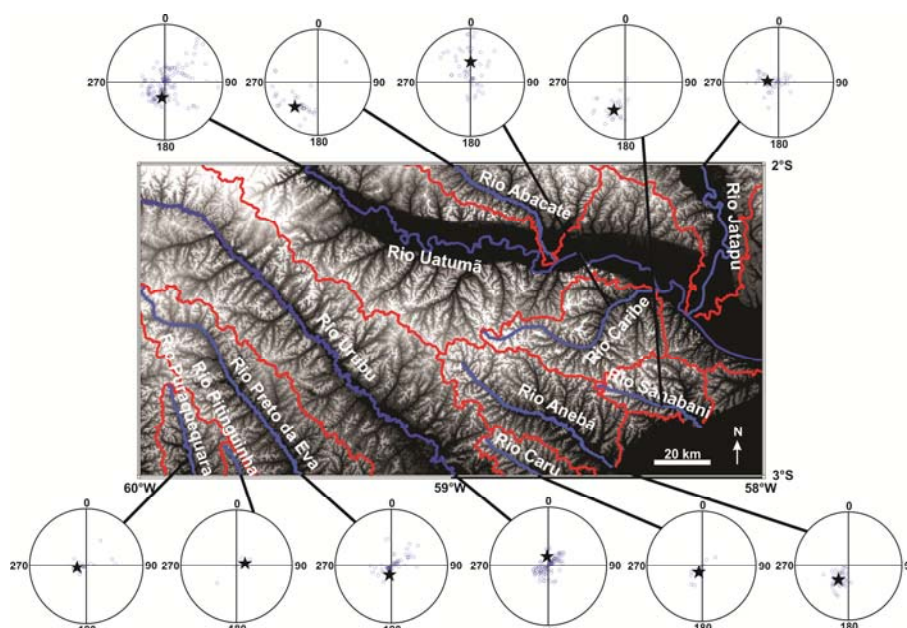


Figura 3: O gráfico polar como resultado do método FSTT proposto por Cox (1994) para cada bacia. No centro a magnitude igual a 0 e no perímetro igual a 1. A estrela no gráfico polar indica o vetor médio. A imagem de fundo corresponde à imagem SRTM.

Após a análise da simetria para os principais rios da área de estudo, realizou-se o reconhecimento de domínios de assimetria utilizando a técnica de suavização de média estimada. Nessa fase de análise mediu-se a assimetria de 246 drenagens com a geração de 2762 vetores de assimetria de bacia e média espacial de 253 caixas. Deste modo, foi possível delimitar nove domínios de assimetria de bacia denotados pelas letras A a I (Figura 4). A Tabela 2 exibe o sentido de migração e a quantidade de vetores com nível de significância menor que 0,05 para cada domínio.

Todos os domínios mostram migração inconsistente com os dados de rumo do mergulho do acamamento da região (Figura 5), o qual possui direção predominantemente para SE (Neves 1989). Na Figura 5 também é possível visualizar que tais domínios não possuem nenhuma relação clara com o mapa litológico da área de estudo. Isto pode evidenciar um controle neotectônico sobre esses domínios, fato corroborado pela relação dos limites desses domínios com dados estruturais e sísmicos da região. O limite norte do domínio A, por exemplo, é relacionado com a parte oeste da represa de Balbina, região onde ocorre uma concentração da atividade sísmica associada com esse reservatório (Veloso et al. 1989). Mesmo atribuindo uma origem induzida pela represa de Balbina para essa atividade sísmica, a concentração dessa atividade na parte oeste da represa pode estar associada a algum controle estrutural, o qual também pode estar exercendo um controle no basculamento do domínio A na mesma região.

Tabela 2: Parâmetros do fator de simetria topográfica transversal para os domínios de assimetria de bacia. FSTT se refere ao fator de simetria, R a medida de dispersão e p a probabilidade do vetor ser aleatório.

Domínios	FSTT	Deslocamento (°)	R	Número de vetores com $p < 0,05$
A	0,2778	4,7618	0,6592	13
B	0,2895	45,4438	0,8391	12
C	0,2727	272,6976	0,5981	35
D	0,3225	179,2059	0,6299	27
E	0,3110	305,9661	0,8708	24

F	0,2583	190,2434	0,8078	4
G	0,3256	1,609	0,6255	23
H	0,3465	59,9997	0,6362	11
I	0,3894	266,3052	0,6729	7

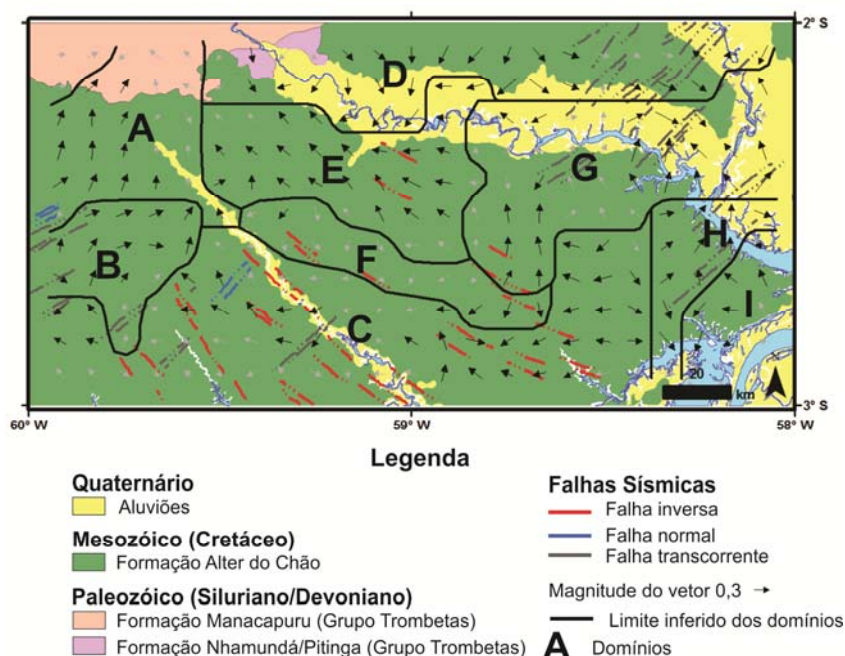


Figura 4: Mapa geológico da área de estudo com as sobreposições de falhas sísmica mapeadas sobre o pacote Paleozóico (Miranda et al. 1994) e da distribuição espacial de vetores médios de assimetria de bacia dentro de caixas com tamanho aproximado de 343 km². As setas pretas são os vetores médios para os quais existe baixa probabilidade de que eles representem migração aleatória da drenagem. Os vetores cinza tem probabilidade > 0,05 de representar migração aleatória da drenagem.

Outro exemplo do possível controle estrutural sobre os domínios geomorfológicos é o limite entre os domínios B e C que se mostra alinhado com a falha normal mapeada em trabalho de campo realizado em fevereiro de 2009 (Figura 6). Considerando o rumo do mergulho dessa falha e a direção de migração do domínio C, podemos supor que nessa região ocorre a subsidência do domínio B. Essa subsidência poderia explicar também a mudança de sinuosidade do Rio Preto da Eva, que passa apresentar trechos com valores mais altos de sinuosidade após cruzar esse limite. O basculamento desse domínio próximo ao limite do domínio de B com C causaria uma diminuição da declividade nesta região, o que leva os cursos d'água a tentarem manter o seu gradiente ampliando a sinuosidade (Schumm 1993). Esse limite também mostra forte relação com falhas transcorrentes mapeadas por sísmica sobre o pacote Paleozóico da Bacia do Amazonas na região do Rio Uatumã (Miranda et al. 1994). Essa coincidência pode estar evidenciando o controle neotectônico que estruturas do embasamento mantêm na geração de falhas mais novas e, conseqüentemente, no relevo da região.

O domínio C também se destaca pela alta concentração de falhas inversas mapeadas por sísmica sobre o pacote Paleozóico. Essas falhas também coincidem com o limite dos domínios C e F, e F e G, assim como, a própria disposição do domínio F que se mostra alongado na direção NW-SE. Outras estruturas em subsuperfícies mapeadas por Neves (1989) também exibem aparente controle sobre os domínios geomorfológicos. O lineamento Urubu coincide com os limites dos domínios A, B, C, D e E, enquanto que o lineamento Luca

Borges, a charneira norte e a falha normal na parte sudeste da área coincidem com os limites e forma dos domínios H e I (Figura 6).

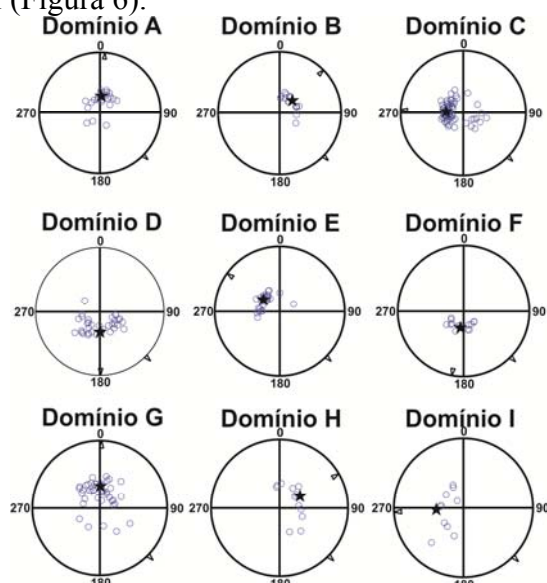


Figura 5: Gráfico polar de vetores de assimetria que mostram o azimute e a magnitude médio de cada vetor. No centro a magnitude igual a 0 e no perímetro igual a 1. O vetor médio para domínio é indicado pela estrela e seu azimute é indicado pela seta dentro do perímetro. A seta fora do perímetro indica o rumo do mergulho do acamamento para área de estudo (Neves 1989).

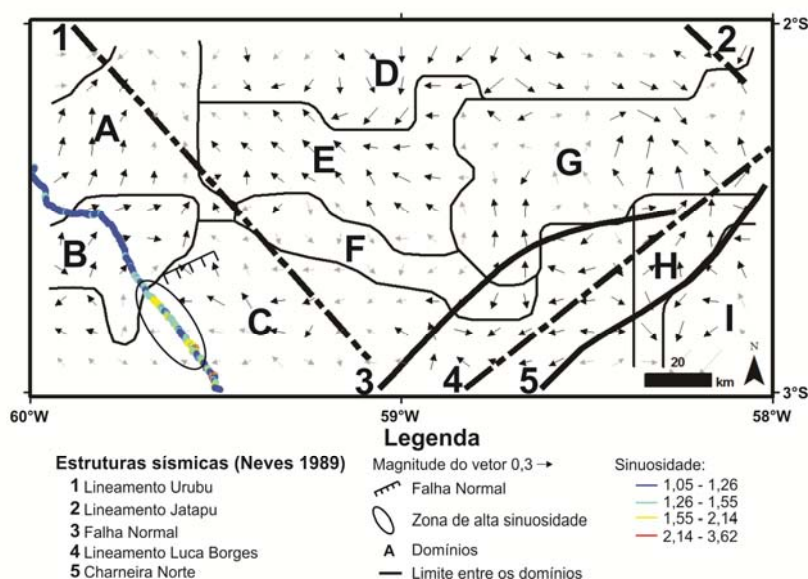


Figura 6: Relação entre os limites dos domínios geomorfológicos com estruturas sísmicas (Neves 1989), sinuosidade do Rio Preto da Eva e falha normal mapeada na área de estudo.

4. Conclusão

O uso da assimetria de bacia se mostrou uma ferramenta poderosa na identificação de eventuais indícios de atividade neotectônica em regiões com densa cobertura vegetal. Na região do Rio Uatumã, vetores médios da assimetria de bacia podem ser divididos espacialmente em domínios que mostram fortes tendências azimutais. Os limites e formas destes domínios mostram correspondência com falhas superficiais, subsuperficiais e padrões de sismicidade. Tais evidências sugerem que essa região possui uma atividade tectônica atuante que provoca a movimentação de blocos e modela a superfície.

Agradecimentos

Este estudo é parte da Tese de Doutorado de um dos autores (DMI), no curso de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica da Universidade de São Paulo (USP), com bolsa de estudo (processo n° 2008/04774-2) fornecida pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

Referências Bibliográficas

- Almeida-Filho, R.; Miranda, F.P. Mega capture of the Rio Negro and formation of the Anavilhanas archipelago, Central Amazônia, Brazil: evidences in an SRTM digital elevation model. **Remote Sensing of Environment**, v. 110, n. 3, p. 387-392, 2007.
- Assumpção, M.; Suárez, G. Source mechanisms of moderate-size earthquakes and stress orientation in mid-plate South America. **Geophysical Journal International**, v. 92, n. 2, p. 253-267, 1988.
- Costa, J.B.S.; Bemerguy, R.L.; Hasui, Y.; Borges, M.S. Tectonics and paleogeography along the Amazon River. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, n. 4, p. 335-347, 2001.
- Cox, R.T. Analysis of drainage and basin symmetry as a rapid technique to identify areas of possible Quaternary tilt-block tectonics: an example from the Mississippi Embayment. **GSA Bulletin**, v. 106, n. 5, p. 571-581, 1994.
- Cox, R.T.; Van Arsdale, R.B.; Harris, J.B. Identification of possible Quaternary deformation in the northeastern Mississippi Embayment using quantitative geomorphic analysis of drainage-basin asymmetry. **GSA Bulletin**, v. 113, n. 5, p. 615-624, 2001.
- Cunha, P.R.C.; Melo, J.H.G.; Silva, O.B. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 227-251, 2007.
- Curry, J.R. Analysis of two-dimensional orientation data. **Journal of Geology**, v. 64, n. 2, p. 117-131, 1956.
- Davis, J.C. **Statistics and data analysis in Geology**. New York: Wiley and Sons, 2002. 638 p.
- 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, n. 1, p. 130-144, 2008.
- Käbner, A.; Gloaguen, R. Neotectonic information from drainage basin geometry in the Tajik Depression. In.: IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS), 9., 2009, Cape Town, Africa do Sul. **Proceedings...** Cape Town: IEEE, 2009, p. 353-356.
- Miranda, F.P.; Bentz, C.M.; Fonseca, L.E.N.; Lima, C.; Costa, A.R.A.; Nunes, K.C.; Felgueiras, C.A.; Almeida Filho, R. Integração de dados de sensoriamento remoto, aeromagnetometria e topografia na definição do arcabouço estrutural da região do Rio Uatumã (Bacia do Amazonas). Rio de Janeiro, PETROBRAS. 61 p. 1994.
- Neves, C.A.O. Prospectos potenciais e áreas prioritárias para exploração na Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 4, n. 1, p. 95-103, 1990.
- Oliveira, C.G. Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais óptico (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM): um estudo para a região da Serra do Carajás (PA). 2005. 184 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.
- Riccomini, C.; Soares, E.A.A. Sismitos holocênicos em baixos terraços do Rio Solimões, Amazonas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 42., 2004, Araxá. **Anais...** Araxá: SBG, 1 CD-ROM. 2004.
- Salvany, J.M. Tilting neotectonics of the guadamar drainage basin, SW Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 29, n. 2, p. 145-160, 2004.
- Santos, P.R.A.; Garboardi, C.; Oliveira, L.C. Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 58, n. 1, p. 101-107, 2006.
- Schumm, S.A. River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. **Journal of Geology**, v. 101, n. 2, p. 279-294, 1993.
- Soares, E.A.A. Depósitos pleistocenos da região de confluência dos rios Negro e Solimões, Amazonas. 2007. 205 p. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.
- Sternberg, H.O'R. Vales tectônicos na planície amazônica? **Revista Brasileira de Geografia**, v. 12, n. 4, p. 3-26, 1950.
- Tsodolos, I.M.; Koukouvelas, I.K.; Pavlides, S. Tectonic geomorphology of the easternmost extension of the Gulf of Corinth (Beotia, Central Greece). **Geomorphology**, v. 453, n. 1-4, p. 211-232, 2008.
- Veloso, J.A.V.; Carvalho, J.M.; Fernandes, E.P.; Blum, M.L.B.; Araújo, D.P. Microearthquakes and the Balbina Lake, a possible case of induced seismicity in the Amazon Area. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 2., 1989, Salvador. **Resumos Expandidos...** Salvador: SBGf, v. 2, p. 508-512.
- Yilmaz, H.M. The effect of interpolation methods in surface definition: an experimental study. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, n. 9, p. 1346-1361, 2007.