



**Atividade Neotectônica na Região de Porto Trombetas, Pará, Brasil:  
Evidências, Cinemática e Influências na Hidrogeologia**  
Neotectonic Activity in the Porto Trombetas region, Pará, Brazil:  
Evidence, Kinematics and Influences in Hydrogeology

Júlio Henrichs de Azevedo<sup>1,2</sup>; Flávio Henrique Freitas-Silva<sup>1</sup> & José Eloi Guimarães Campos<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro - Asa Norte, 70910-900, Brasília, DF, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, SCEN

Trecho 2 - Edifício Sede, 70818-900, Brasília, DF, Brasil

E-mails: julio.henrichs@gmail.com; fhfsilva@unb.br; eloi@unb.br

Recebido em: 20/03/2020 Aprovado em: 20/07/2020

DOI: [http://doi.org/10.11137/2020\\_3\\_47\\_62](http://doi.org/10.11137/2020_3_47_62)

## Resumo

O presente trabalho visa apresentar e discutir os principais registros de atividade neotectônica na região de Porto Trombetas, estado do Pará, incluindo: a presença de falhas normais sobre crostas bauxíticas (cenozoicas), escalonamento em platôs de bauxita, assimetria nos perfis de vales de drenagens e linearidade da rede de drenagem superficial. Os processos neotectônicos são evidenciados pela dinâmica geomorfológica e pedológica. Tais estruturas são consideradas neste trabalho como evidências de reativações de anisotropias preexistentes formadas na história geológica passada desde a estabilização do embasamento e formação da bacia do Amazonas. A análise estatística das direções dos lineamentos observadas em imagens de satélite (modelo digital do terreno) e em afloramentos rochosos, incluindo exposições em cavas de mineração mostra que as principais famílias de estruturas neotectônicas são N30-40°W e N45°E. A atividade neotectônica atual na região é atribuída a um campo de tensões compressivas com orientação aproximada E-W devido à evolução da margem ativa andina e ao espalhamento meso-oceano Atlântico, resultando em um novo ambiente tectônico desde o limite Paleógeno / Neógeno. As tensões intraplaca compressivas resultam em tendência de reativação para abrir e transcorrer alternadamente as anisotropias NW-SE e NE-SW, para fechar as estruturas N-S e desenvolver movimento de transcorrência nos planos preexistentes de direção próxima a E-W. Nas compartimentações geomorfológicas representadas pelos platôs lateríticos as estruturas neotectônicas têm efeitos importantes sobre a hidrogeologia local, uma vez que produzem rupturas nas crostas ferro-aluminosas, nas camadas de bauxita e no próprio aquítarde, contribuindo para o aumento da condutividade hidráulica média e da capacidade de drenança da camada semiconfinante para o aquífero regional.

**Palavras-chave:** *Atividade neotectônica; crostas bauxíticas; Sistema Aquífero Alter do Chão*

## Abstract

This paper aims to present and discuss the main records of neotectonic activity in the Porto Trombetas region, Pará State, Brazil, including: the presence of normal faults on bauxite crusts, staggering on bauxite plateaus, asymmetry on streams valleys profiles and linearity of the streams traces, once the neotectonic processes control the geomorphological and pedological dynamics. All the structures are considered as reactivations evidences of anisotropies evolved in the past geological history since the basement and the Amazonas basin stabilization. Lineaments statistic directions shows the main families of neotectonic structures are: N30-40°W and N45°E and these directions can be observed in satellite images (digital terrain modeling) and in rocky outcrops, including expositions related to mining operation activity. The neotectonic activity in the region is attributed to a compressive strain field oriented east-west due to the recent Andean active margin evolution and to the Mean Ocean Atlantic spreading, resulting in a new tectonic environment since the Paleogene / Neogene limit. The compressive intra plate strain results to opening reactivation tendency of the NW-SE and NE-SW anisotropies (alternating sharing and opening tendencies), to closing the north-south structures and to make shear movement in the east-west. These neotectonic structures result in the breakage of the aquitard causing increasing in the average hydraulic conductivity of the confining layer and enlarging the leakage towards the regional confined aquifer.

**Keywords:** *Neotectonic activity; bauxite crusts; Alter do Chão Aquifer System*

## 1 Introdução

Registros da atividade neotectônica são bem documentados na literatura sobre a região amazônica, incluindo trabalhos clássicos de síntese e artigos que abordam regiões específicas, como pode ser exemplificado por Franzinelli & Piuci (1988), Travassos & Barbosa-Filho (1990), Saadi (1993), Sena-Costa *et al.* (1996), Souza-Filho *et al.* (1999), Fernandes-Filho (1997), Costa (2002), Silva (2005), Souza & Nogueira (2009) e Ramos *et al.* (2011), dentre outros. Na ampla bibliografia disponível sobre a neotectônica amazônica existem trabalhos que se preocupam em detalhar as evidências e registros das estruturas (Igreja & Franzinelli, 1990), em destacar os aspectos cinemáticos da deformação (Felipe & Morales, 2012), em enfatizar questões sobre a sedimentação miocênica e sua relação com a neotectônica (Saadi, 1993; Sena-Costa *et al.*, 1996), e por fim, diversos outros que atentam para aspectos gerais da atividade neotectônica.

Muitos autores empregam diferentes ferramentas para se evidenciar as questões neotectônicas, incluindo dados sismogênicos (Hasui & Mioto, 1988), aspectos geomorfológicos (Amaral *et al.*, 2009), descrição de afloramentos e levantamentos de dados litológicos, estruturais e cinemáticos (Souza & Nogueira, 2009), uso de imagens orbitais e geoprocessamento (Silva *et al.*, 2007; Ramos *et al.*, 2011) e até o emprego de técnicas de *knickpoints* (Val *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2011). Entretanto, especificamente para a região de Porto Trombetas nenhuma pesquisa se preocupou com questões relativas à neotectônica.

Assim o presente trabalho tem como objetivo principal apresentar dados relativos aos registros de atividade neotectônica na Região de Porto Trombetas. Como objetivos específicos pretende-se contribuir com o conhecimento sobre a cinemática dessa deformação recente e seus efeitos sobre a erosão diferencial dos platôs lateríticos e o comportamento hidrogeológico do Sistema Aquífero Alter do Chão na região.

Para fins da pesquisa considera-se o conceito de neotectônica aplicado para o território brasileiro e proposto por Hasui (1990), o qual pondera que a neotectônica inclui os movimentos ressurgentes a partir do Mesoterciário, o que pode ser atualmente entendido como a tectônica que se desenvolve a partir do limite Paleógeno / Neógeno ou mais especificamente mais jovem que 23 Ma. Este conceito se contrapõe a outros aplicados a terrenos que foram submetidos a orogênese ou tafrogênese em tempo geológico mais recente, pois nestes casos a neotectônica considera apenas os movimentos tectônicos do Quaternário (Mörner, 1993).

A área alvo da pesquisa é a região de Porto Trombetas (Figura 1), no estado do Pará, porém os resultados podem ser estendidos às áreas adjacentes, que

se dispõem entre o baixo rio Trombetas, na porção norte, e a região de Juruti, na porção sul e às margens do rio Amazonas. Neste polígono, o contexto geológico, o tipo de compartimentação geomorfológica, os solos, a hipsometria e os demais aspectos fisiográficos são similares.

## 2 Materiais e Métodos

Este trabalho tem como fundamento a integração de dados e informações sobre a neotectônica na região do baixo Amazonas e, para tanto, incluiu as seguintes ações:

- Observações de campo de estrias de falhas, estruturas planares abertas em áreas de lavras de bauxita, com destaque para aquelas preparadas para a retirada do minério após decapeamento das coberturas de solos e estéreis;
- Medições de atitudes de juntas e falhas de pequeno rejeito em taludes e fundos de cavas de mineração e em cortes de estradas, além de observação de estrias de falhas;
- Extração de lineamentos estruturais sobre imagens orbitais do sensor Landsat (*Thematic Mapper*) sobreposta ao modelo digital de elevação obtido por meio de dados topográficos da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) a partir de digitalização em tela. O conjunto de dados foi tratado estatisticamente e qualitativamente (com auxílio do software Stereo32 de forma a se evidenciar aspectos da tectônica ressurgente e suas implicações com relação à hidrogeologia local);
- Produção de Modelo Digital de Elevação - MDE, incluindo relevo sombreado, a partir de imagens de radar (ALOS PALSAR e SRTM), com a confecção dos perfis topográficos, a determinação das redes de drenagem das áreas de estudos, a extração de lineamentos estruturais (diretamente em tela) e a verificação dos padrões dos vales fluviais que dissecam os platôs lateríticos; e
- Avaliação da cinemática da deformação com base na avaliação das direções dos indicadores como estrias em planos de falhas observados em crostas e sua correlação com o arranjo de tensores ao qual a região é atualmente submetida.

## 3 Contexto Geológico, Pedológico e Geomorfológico

O substrato geológico da região é exclusivamente representado pela Formação Alter do Chão, caracterizada por depósitos fluvio-lacustres de origem cretácea a cenozoica (Cunha *et al.*, 1994; Caputo, 2011), compostas por arenitos, argilitos, siltitos e, subordinadamente, por

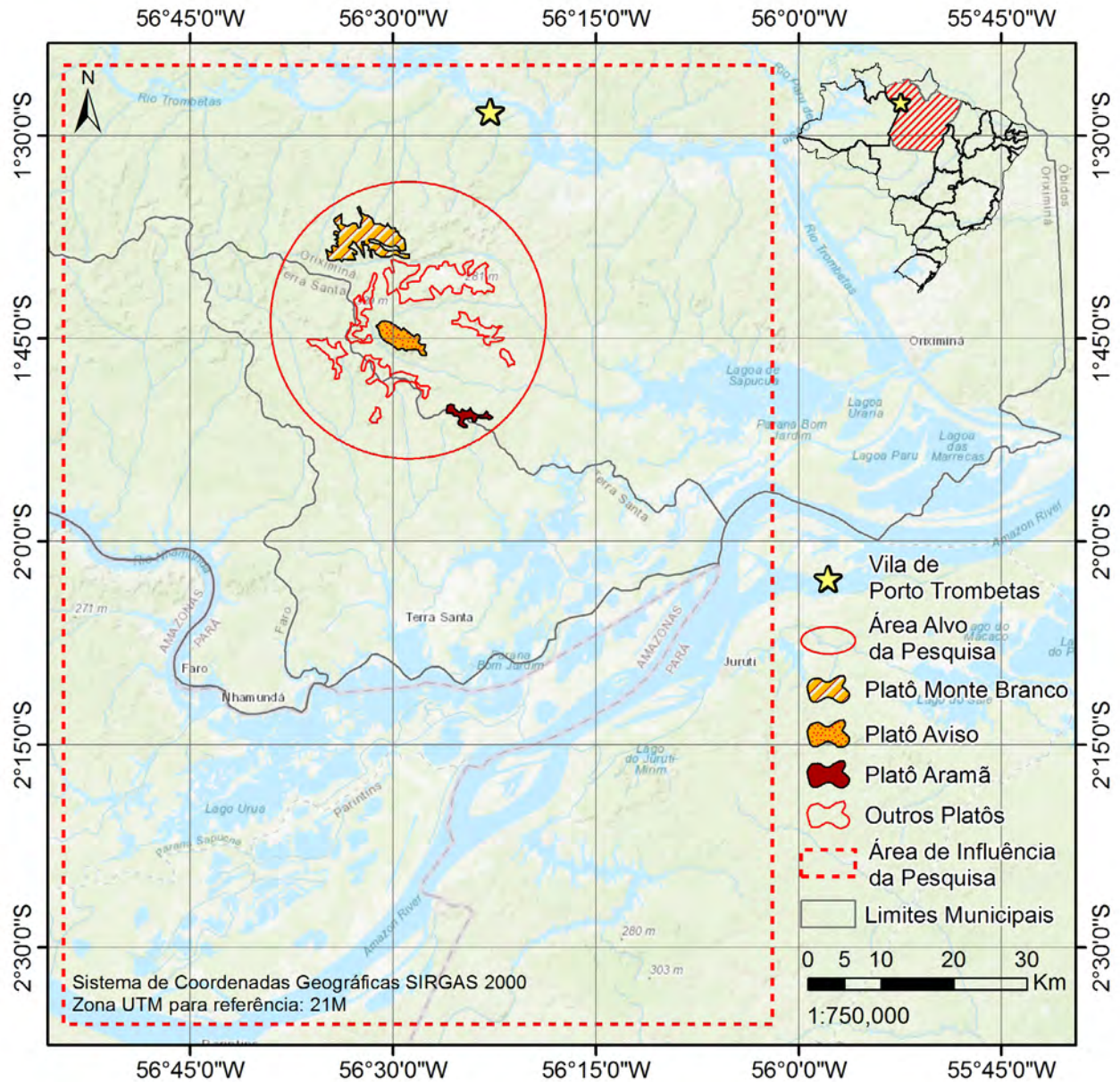


Figura 1 Localização das áreas de pesquisa (Base cartográfica: Bing World Imagery, 2019).

conglomerados, recobrando em centenas de metros os sedimentos paleozoicos da Bacia do Amazonas, além do seu embasamento (Caputo *et al.*, 1971, 1972; Caputo, 1984, 2011; Cunha *et al.*, 1994; Tassinari & Macambira, 2004; Caputo & Soares, 2016; Soares *et al.*, 2016, 2017).

Uma particularidade da Formação Alter do Chão é o fato dessa unidade abrigar o mais importante aquífero da Província Hidrogeológica Amazonas, principalmente onde ocorrem afloramentos como nos municípios de Faro, Oriximiná, Óbidos, Juruti, Terra Santa, Santarém, Alenquer,

Aveiro, Prainha, Brasil Novo, Vitória do Xingu, Senador José Porfírio e Porto de Moz no estado do Pará (Imbiriba-Junior & Melo-Junior, 2012; CPRM, 2012).

A evolução tectônica dos terrenos proterozoicos da Amazônia, embora ainda alvo de controvérsias, pode ser entendida como formada pela amalgamação de diferentes blocos no paleoproterozoico (Tassinari & Macambira, 1999, 2004; Tassinari *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2000). No caso específico da região em estudo o embasamento é formado pela acresção dos blocos Tapajós-Pirama e

Tapajós-Ventuari ao Bloco Amazônia Central (Santos, 2003). Os blocos que se aglutinavam para compor o Cráton Amazônico corresponderiam a faixas aproximadamente N-S (com direção ~ S70/80W - N70/80E), isto é, gerado por compressões aproximadamente leste-oeste. Este fato é inclusive corroborado por reconstruções paleogeográficas do paleoproterozoico (Santos, 2003).

Posteriormente a região foi submetida a diferentes esforços tafrogenéticos que culminaram com a formação das bacias do Solimões, Amazonas e Marajó, com alinhamento geral E-W, aproveitando anisotropias impressas no substrato proterozoico. A subsidência flexural em resposta à carga sedimentar gerada por toda a seção Paleozoica da Sinéclise Amazonas teve importante participação no controle das bacias e conseqüentemente na deposição da Formação Alter do Chão (Wanderley Filho & Costa, 1991). A partir da reversão transcontinental do rio Amazonas, cujos processos de evolução são admitidos desde o mioceno até o início do pleistoceno (Sacek, 2014; Caputo & Soares, 2016), a neotectônica se destaca como importante aspecto do desenvolvimento fluvial da região, definindo novos formatos para as calhas dos rios a partir do pleistoceno superior (Sacek, 2014; Soares *et al.*, 2017).

Com relação à história geológica cenozoica, paleoceno ao pleistoceno, o intenso processo de intemperismo químico e de lateritização dos sedimentos, com lixiviação de sílica e precipitação de oxi-hidróxidos, culminaram com a formação de perfis lateríticos autóctones maduros, que compreendem, do topo para a base, argila caulinitica (Argila de Belterra), nódulos de bauxita e ferruginosos em matriz de argilosa, Fe-laterita, bauxita maciça, horizonte de argila mosqueada com porções silto-argilosas e a rocha matriz (Costa, 1991; Horbe *et al.*, 2001; Montes *et al.*, 2007; Costa *et al.*, 2014).

O perfil laterítico desenvolvido durante o Paleoceno-Eoceno experimentou nova fase durante o Mioceno (Truckenbrodt & Kotschoubey, 1981; Truckenbrodt *et al.*, 1991; Costa 1991; Costa *et al.*, 2005). O regolito das regiões de Trombetas e Juruti envolve um perfil laterítico completo e evoluído que desenvolveu durante o Eoceno, quando foi exposto a um ambiente de floresta tropical que induziu sua transformação parcial em caulinita e Al-goethita. Este material experimentou uma nova fase de desenvolvimento de bauxita nodular durante o Mioceno quando ocorreu o estabelecimento de um planalto.

Em razão dos processos de erosão diferencial, o relevo regional pode ser segmentado em quatro compartimentos: Topo de Platôs, Encostas de Platôs, Terras Baixas e Planícies Aluviais (RADAMBRASIL, 1976; Brandt, 2007). Os Topos de Platôs, sustentados pelas crostas ferro aluminosas e pela bauxita, apresentam padrão de relevo suave ondulado, com baixa densidade de drenagem, altitudes variáveis entre pouco mais de 200

metros até 130 metros, cobertos por Latossolos Amarelos aluminicos, onde a pedogênese supera a erosão amplamente no balanço morfodinâmico. Nas Encostas o padrão de relevo varia de ondulado a forte ondulado, com moderada densidade de drenagem, com diminuição da espessura dos latossolos seguido do domínio de Neossolos Quartzarênicos. Nas terras baixas e planícies aluviais o padrão de relevo é suave ondulado, com altimetria variando entre 20 e 80 metros, em que os solos são essencialmente representados por Neossolos Flúvicos e Gleissolos Háplicos, sendo que a acumulação predomina sobre a pedogênese e erosão no balanço morfodinâmico.

Essa compartimentação tem efeitos sobre a hidrogeologia do Aquífero Alter do Chão, que ocorre tanto de forma livre, quando nas Encostas, Terras Baixas ou Planícies, quanto em condições de semiconfinamento por aquitarde, quando nos Platôs, onde as anisotropias para condutividade hidráulica caracterizam um comportamento hidrogeológico diferenciado frente às demais condições (Azevedo, 2019).

## 4 Resultados e Discussões

### 4.1 Registro das Estruturas e Feições Neotectônicas

As estruturas que registram a atividade neotectônica na região são: 1) juntas e falhas em crostas bauxíticas e Fe-lateríticas, 2) escalonamento dos platôs bauxíticos, 3) assimetria dos vales fluviais e 4) linearidade da rede de drenagem.

A neotectônica apresenta-se atualmente na região como de baixa intensidade, pois não são observadas zonas sismogênicas de alta magnitude. Em geral os eventos regionais são menores que 4,0 na escala Richter ou mesmo ausentes, como observado no mapa da sismicidade brasileira (IAG, 2019).

#### 4.1.1 Juntas e Falhas em Crostas Bauxíticas

Observações de campo em áreas de lavras de bauxita evidenciaram algumas feições que são associadas a estruturas extensionais, que correspondem a juntas e falhas de pequeno rejeito.

Essas feições são mais facilmente reconhecíveis nas áreas decapeadas para extração da camada de bauxita. Com a remoção dos solos de cobertura e dos materiais estéreis, a camada rígida de bauxita fica exposta e permite avaliação de estruturas abertas, alinhadas em direções preferenciais NE-SW e NW-SE interpretadas como juntas abertas que quebram o material de aspecto maciço a cimentado. Nos planos destas falhas são comumente observadas superfícies polidas, originadas pelo atrito entre os blocos falhados, estrias de falha ou de deslizamento (*slickensides*), em geral ressaltadas pela orientação e/ou cristalização de filossilicatos ou mais comumente filmes

de hematita orientados em lineação mineral (Figura 2). Ao longo dos planos de falhas são observados ressaltos que correspondem a estruturas de rompimento, as quais se formam perpendiculares ao deslocamento, que em conjunto com as estruturas lineares (*slickensides* e lineação mineral) correspondem a excelentes indicadores cinemáticos do sentido de deslocamento entre os blocos falhados. Tais feições observadas tanto nos lateritos ferruginosos como amplamente desenvolvidas nos minérios bauxíticos colocam em evidência uma predominância de movimentos normais entre blocos, em falhas com direções NW-SE e NE-SW, com blocos da capa rebaixados em sua maioria correspondendo, respectivamente, àqueles situados a NE e SE.

Falhas/juntas com direção NNE-SSW, NE-SW e ENE-WSW embora em geral apresentem também movimentação normal, comumente registram rejeitos oblíquos e/ou direcionais. Descontinuidades com direção N-S correspondem em sua maioria a juntas fechadas. Tais feições afetam as próprias camadas de bauxita e as crostas ferruginosas, que são materiais considerados mais jovens que o Paleógeno, e dessa forma a reativação necessariamente deve ser associada à atividade neotectônica. Feições neotectônicas similares àquelas aqui descritas são apresentadas por Souza & Nogueira (2009) na região de Manaus.

#### 4.1.2 Escalonamento dos Platôs Bauxíticos

O escalonamento dos platôs em direção ao sul é outra feição meso regional considerada por este trabalho como atribuída à atividade neotectônica na região. Neste sentido, os platôs diminuem suas dimensões em área de norte para sul e as cotas se abatem progressivamente em direção à calha do rio Amazonas. Na Figura 3, em uma seção NW-SE que corta três dos principais platôs da região de Porto Trombetas observa-se que a cota máxima no Platô Monte Branco é de 180 metros; no Platô Aviso a altitude máxima é de 160 metros e no Platô Aramã alcança um pouco mais de 140 metros de elevação.

Este comportamento do relevo é interpretado como condicionado pela atividade de basculamento de blocos ao longo da calha principal do rio Amazonas, sugerindo movimentação direcional, que em função do ajuste dos tensores E-W atuantes na região resulta em abatimento dos blocos adjacentes a sul e a norte. Abordagem similar é apresentada por Sena-Costa *et al.* (1996) que mostram que a calha do baixo curso do rio Tapajós e o vale do rio Amazonas a montante da confluência com o Tapajós representam grábens neotectônicos (Figura 4). O abatimento dos blocos em direção ao rio Amazonas, que representa o nível de base erosivo regional, indica que os processos de desintegração dos platôs ampliam o grau de dissecação associado aos antigos platôs causando a diminuição progressiva do tamanho dos platôs para sul.

#### 4.1.3 Linearidade da Rede de Drenagem

Em função da densa cobertura vegetal e do padrão de relevo relativamente aplainado e pouco dissecado, a determinação da forma da rede de drenagem é dificultada na região amazônica. Em análise direta sobre imagens de satélite sobre áreas específicas de ocorrência de rochas do embasamento o padrão dendrítico se destaca. Contudo, a partir do Modelo Digital de Elevação sobre imagens de radar de grande resolução espacial é possível destacar a rede de drenagem e assim definir sua forma e padrão geral.

Como é possível observar nas Figuras 3 e 5, a drenagem apresenta forma predominantemente linear com cursos retilíneos e padrão reticulado em que os principais tributários são perpendiculares aos cursos maiores. A drenagem alinhada é um dos principais critérios para a extração de lineamentos estruturais sobre imagens de satélite e outros produtos cartográficos e são comumente interpretadas como juntas ou falhas. Este mesmo tipo de abordagem é apresentado por Silva & Rossetti (2009) para outras regiões da Amazônia, sendo as conclusões similares, isto é, vinculando a linearidade dos cursos d'água a falhas geológicas de história recente.

#### 4.1.4 Assimetria dos Vales Fluviais

Para determinação se um lineamento ou curso de drenagem linear é uma junta ou uma falha, pode-se considerar a forma do vale fluvial, mais especificamente a assimetria entre as duas vertentes do vale. Falhas recentes podem ser identificadas quando o vale apresenta forte assimetria, sendo uma das vertentes íngreme e a outra mais suave. Este arranjo indica que a porção mais íngreme do vale representa o bloco alto de uma falha normal e que a encosta mais suave o bloco rebaixado em direção ao qual o plano da anisotropia mergulha.

Esta assinatura do vale foi utilizada por Campos *et al.* (2016) para determinar estruturas neotectônicas associadas a drenagens retilíneas na bacia do rio jardim no Distrito Federal.

Na região em estudo os vales apresentam forte assimetria o que pode ser verificado no mapa e respectivos perfis da Figura 5. Os perfis mostram que os platôs em geral representam horsts e os vales são os respectivos grábens. No Platô Monte Branco é possível avaliar que o próprio relevo tabular do platô está recortado por estruturas mais jovens de forma que este platô seja escalonado em um corte NE-SW. Os Platôs Aviso e Bela Cruz apresentam menor grau de escalonamento. O Platô Aramã, situado no extremo sul da seção analisada, apresenta-se mais rebaixado em comparação com os demais.

A questão de se vincular a assimetria dos vales a falhas recentes é devido ao fato de que se fossem estruturas antigas os processos denudacionais tenderiam a tornar os vales simétricos, uma vez que não há amplo contraste de

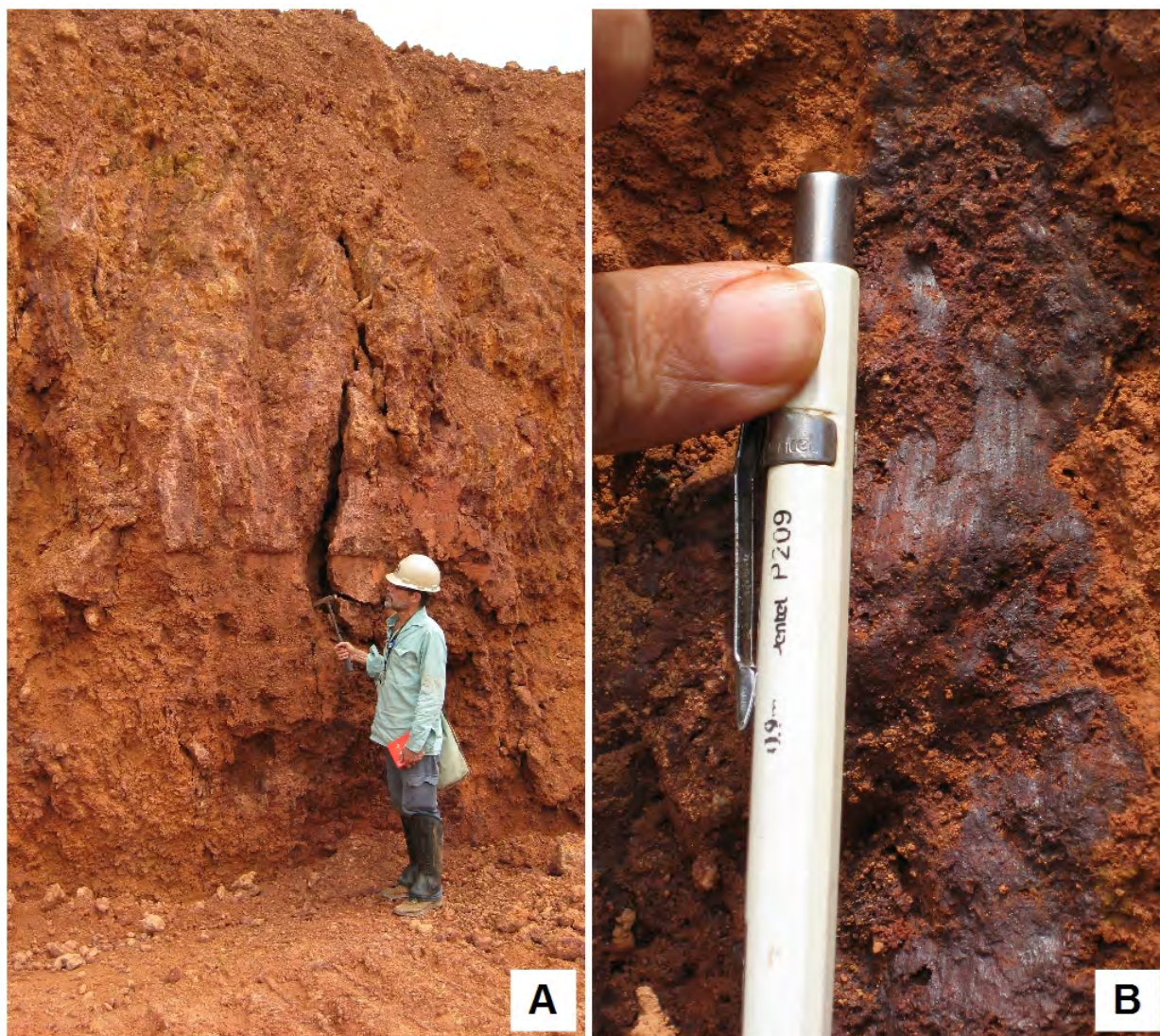


Figura 2 A. Detalhe de uma estrutura aberta ao longo de um plano de falha preservado em minério de bauxita; B. *Slickenside* interpretado como estrias de deslizamento em falha normal (N40W/subvertical) de pequeno rejeito em crosta ferruginosa (notar os *steps* no plano de falha indicando bloco de SW rebaixado).

tipos de rochas nas duas vertentes (Campos *et al.* 2016). Como a assimetria é evidente e de forma recorrente tais feições são interpretadas como estruturas neotectônicas e resultantes do campo de tensões que afetaram a região.

#### 4.2 Discussões sobre a Cinemática da Neotectônica

A neotectônica na região amazônica, principalmente central e oriental, se desenvolve sob um campo de tensão relativamente brando, quando comparado aos padrões orogênicos e tafrogênicos. E por isto, a atividade neotectônica na região estudada não gera novas estruturas no embasamento (fraturas, juntas e falhas), mas apenas propaga as anisotropias preexistentes para as camadas mais jovens sobrepostas. Esta observação fica evidente quando

se avalia os lineamentos retilíneos presentes em rochas de exposição do embasamento e em rochas paleozoicas, os quais mantêm os mesmos *trends* daquelas observadas em platôs cenozoicos. Assim, para o melhor entendimento da ação neotectônica é necessário verificar a origem da estruturação desde o embasamento, uma vez que são estas feições que são sucessivamente reativadas durante a história geológica da região.

O substrato geológico da região foi formado por processos de acreção crustal no paleoproterozoico, culminando com a amalgamação por arcos magmáticos em que os diferentes blocos se combinavam por sistemas aproximadamente N-S, a partir de tensões compressivas próximas a E-W. Sob este campo de tensão há a formação

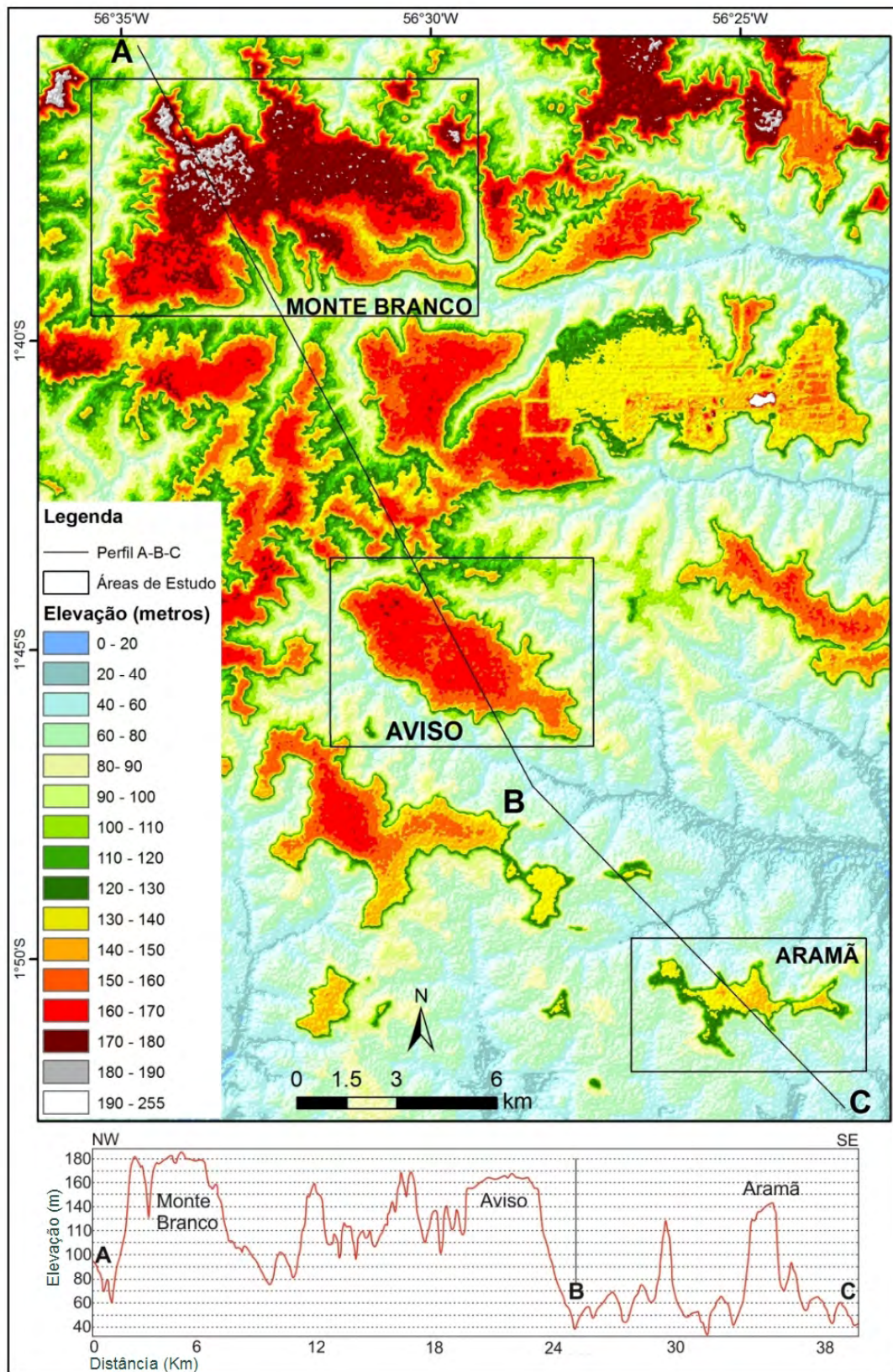


Figura 3 Modelo digital de elevação (MDE) e perfil topográfico de platôs na área de estudo. Exagero vertical de 50 vezes.

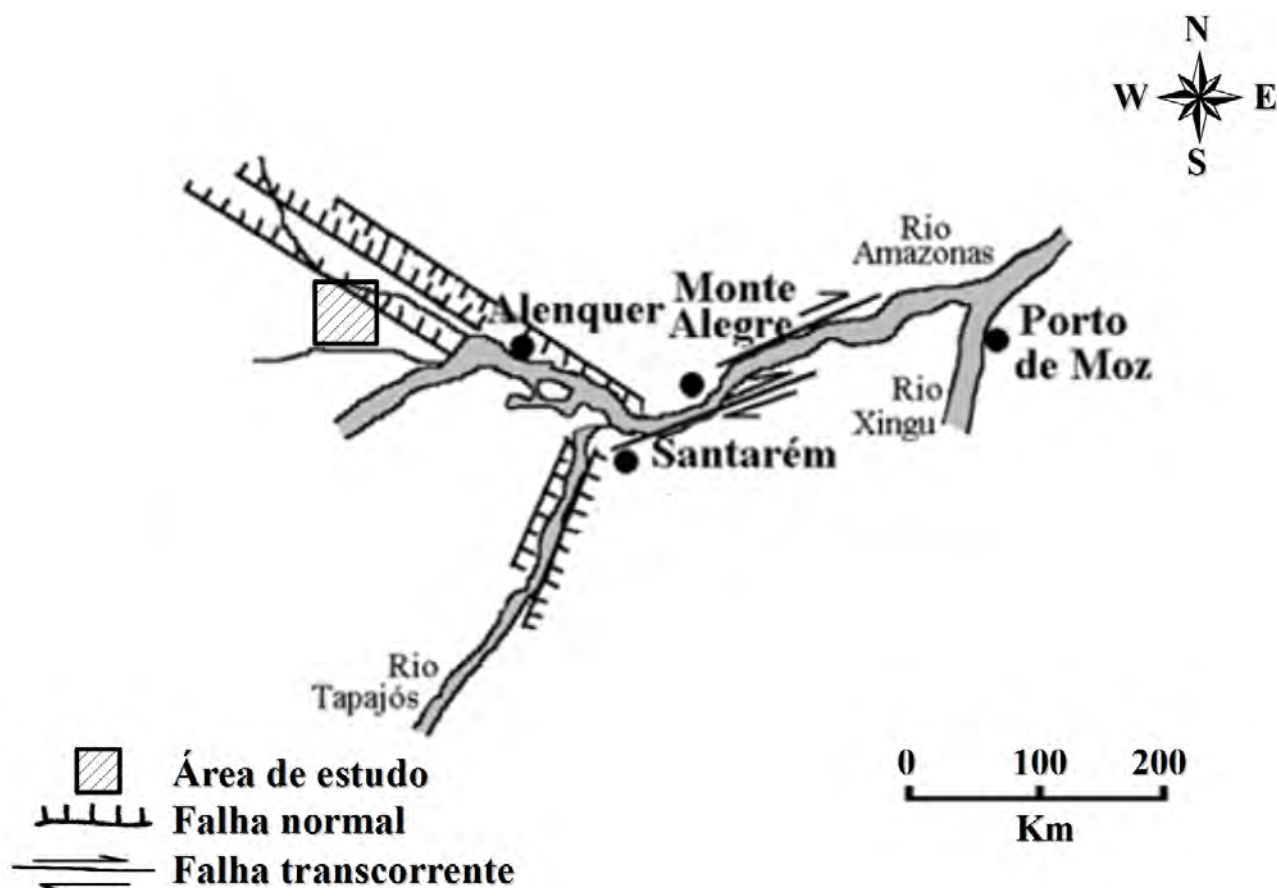


Figura 4 Disposição de estruturas neotectônicas macrorregionais no baixo Tapajós e confluência com o rio Amazonas (modificada de Sena-Costa *et al.* 1996).

de anisotropias com as seguintes direções: E-W na forma de juntas de extensão (paralelas à compressão máxima); N-S na forma de juntas de dilatação (perpendiculares à compressão máxima); e N45E - N45W na forma de juntas do par conjugado de cisalhamento (a 45° da compressão máxima). Essa estruturação foi reativada afetando as rochas da bacia do Amazonas em diferentes estágios da história geológica da região.

Entre 120 e 60 Ma, incluindo todo o período que culminou com a separação sul atlântica (desde a fase pré-rifte até o estágio drifte das bacias da margem leste brasileira) toda a placa sul-americana estava sob tensões extensivas com máximo estiramento aproximadamente leste-oeste. Esta extensão é decorrente da atuação da pluma Tristan da Cunha por sob as placas sul-americana e africana no final do Mesozoico. Nesta condição ocorria forte tendência de aberturas das anisotropias norte-sul, NW e NE enquanto as estruturas com direção próxima a EW tendem a transcorrer (Figura 6).

A partir da fase de deriva continental, na etapa final da separação sul atlântica e com a elevação da cadeia Andina a oeste, todo o interior da placa sul-americana fica

submetida a uma compressão com eixo aproximado leste-oeste (com pequenas variações locais devido a anisotropias preexistentes; Zoback *et al.*, 1989). Este arranjo resulta das forças em direção a leste, devido à subducção da placa pacífica por sobre a sul-americana e forças em direção a oeste devida à abertura meso-atlântica com espalhamento da litosfera oceânica.

É sob este arranjo de tensões compressivas que os processos neotectônicos são desenvolvidos. Neste caso, deverão ser observadas as seguintes tendências: fechamento das estruturas norte-sul; transcorrência das estruturas próximas a EW e abertura / transcorrência alternadas nas estruturas do par conjugado com direções NW e NE (Figura 6).

No caso das estruturas que são reativadas por transcorrências, devem-se levar em consideração os efeitos que este movimento pode causar, principalmente nas grandes estruturas. A decomposição das forças neste ambiente pode causar grabens ou elevações crustais devido às pequenas inflexões dos planos submetidos ao movimento lateral entre os blocos.



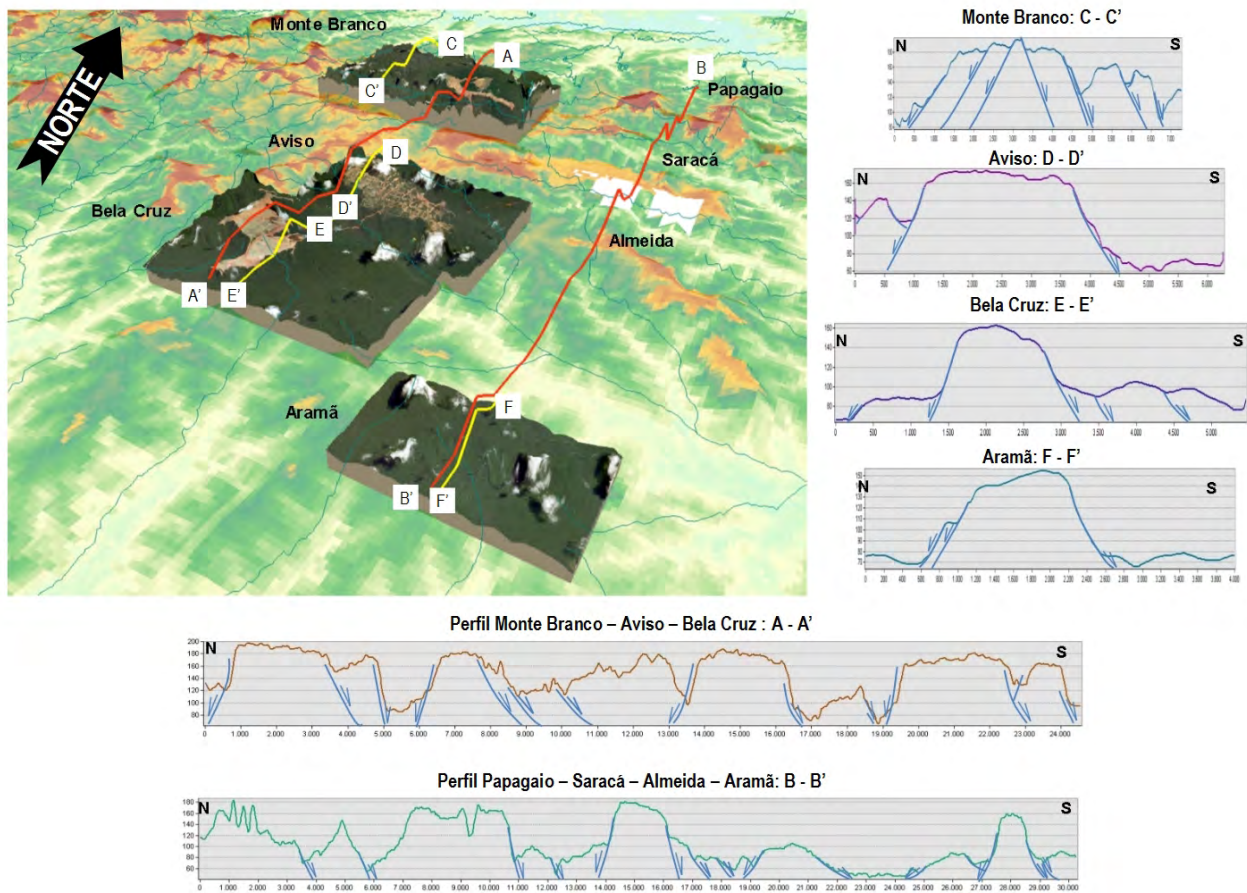


Figura 5 Blocos diagrama esquemáticos com a localização dos perfis de vales em encostas de platôs bauxíticos. Notar o padrão assimétrico dos vales com encosta íngreme em uma das margens e encosta mais suave na margem oposta.

No caso das estruturas com direções NE e NW, originalmente formadas no paleoproterozoico como pares conjugados de cisalhamento, deverá ocorrer uma alternância de efeitos, sendo que para um mesmo par, quando um conjunto de estruturas apresentar movimento transcorrente o outro tenderá a se abrir e vice-versa (Figura 6). O deslizamento entre os blocos de uma das estruturas do par causa a abertura da outra estrutura uma vez que o conjunto funciona como um bloco único. Transcorrência em estruturas EW não resulta em aberturas nas estruturas NS, pois estas são independentes por terem sido formadas em momentos distintos durante a tectônica proterozoica. A atividade neotectônica deve ser ampliada em direção a oeste da região em estudo, uma vez que os efeitos da orogênese andina devem ficar mais evidentes, o que é corroborado pela a sismicidade crescente em direção ao estado do Acre, onde são comuns eventos com magnitude maior que 4 (IAG, 2019).

Uma análise mais detalhada das relações entre os sigmoides de deformação em diferentes escalas de observação indica que a neotectônica regional se enquadra

em um sistema rúptil dextral de Riedel, com as estruturas de primeira ordem (NE-SW) correspondendo a falhas/juntas do tipo Y T (Figura 7), que condicionam o traçado geral do médio-baixo curso do Rio Amazonas. Falhas/juntas com direções NW-SE, WNW-ESSE e EW, correspondem respectivamente às descontinuidades antitéticas R' e X ou P', enquanto as últimas (EW) correspondem a juntas de extensão do tipo T (Figura 7). As falhas/juntas com direções em torno de ENE-WSW e NNE-SSW correspondem a descontinuidades sintéticas respectivamente do tipo R e P T (Figura 7). O padrão em *zig-zague* característico do traçado do rio Amazonas corresponde a este controle estrutural de acordo com o elipsoide de tensão com compressão E-W com pequena rotação dextral. As feições rúpteis observadas nos perfis lateríticos dos depósitos bauxíticos do Rio Trombetas, promovem um progressivo rebaixamento da superfície regional de aplainamento, em direção a direção Sul-Sudeste. Outra feição peculiar observada ao longo dos planos de reativações neotectônicas é a criação, para a acomodação da deformação, de espaços vazios, incluindo

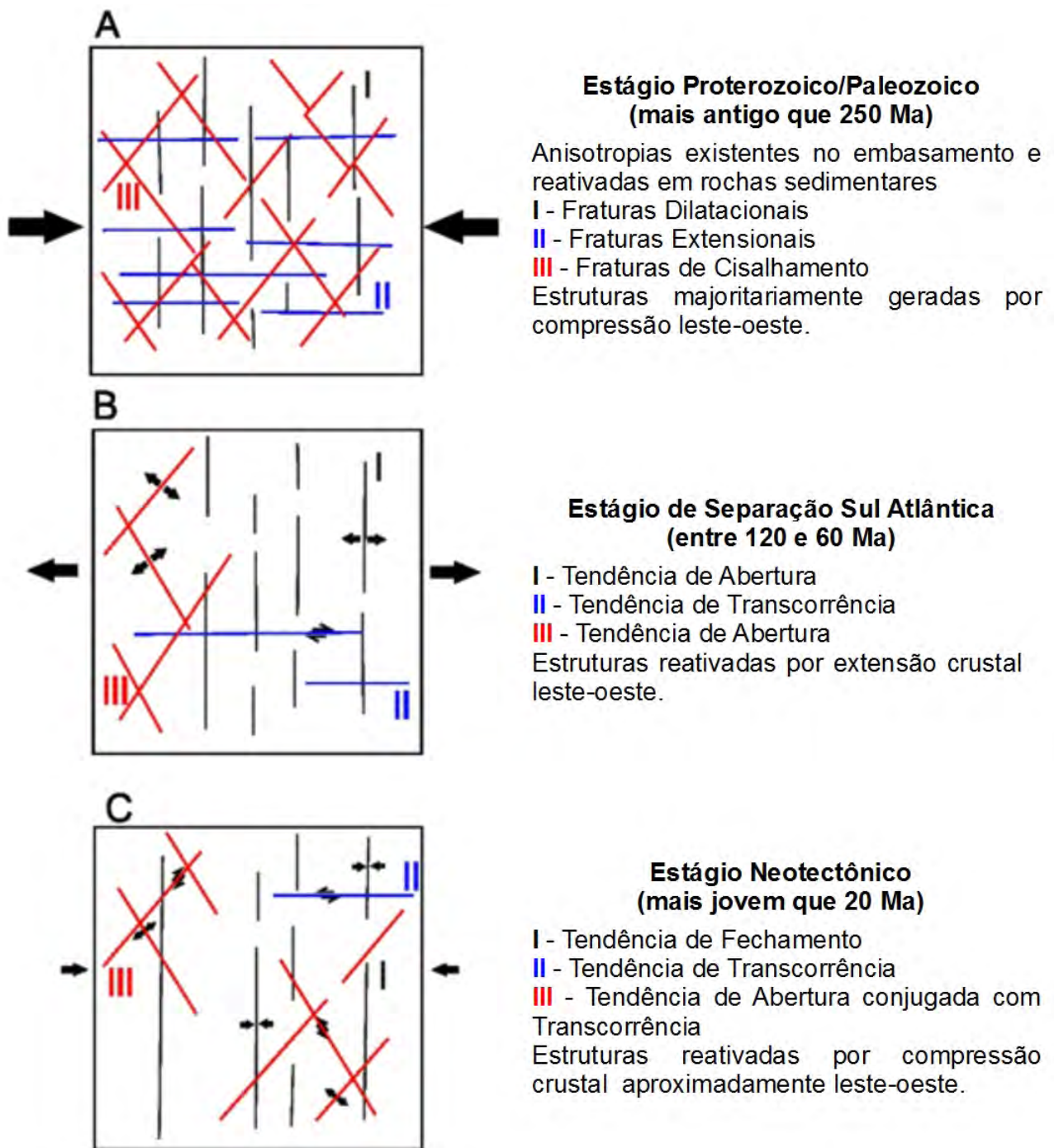


Figura 6 Evolução da cinemática da deformação desde o substrato, passando pela reativação que culminou com a separação sul atlântica até o estágio tectônico atual caracterizado pela reativação neotectônica de anisotropias preexistentes. O tamanho das setas é proporcional a intensidade da deformação (representação em planta).

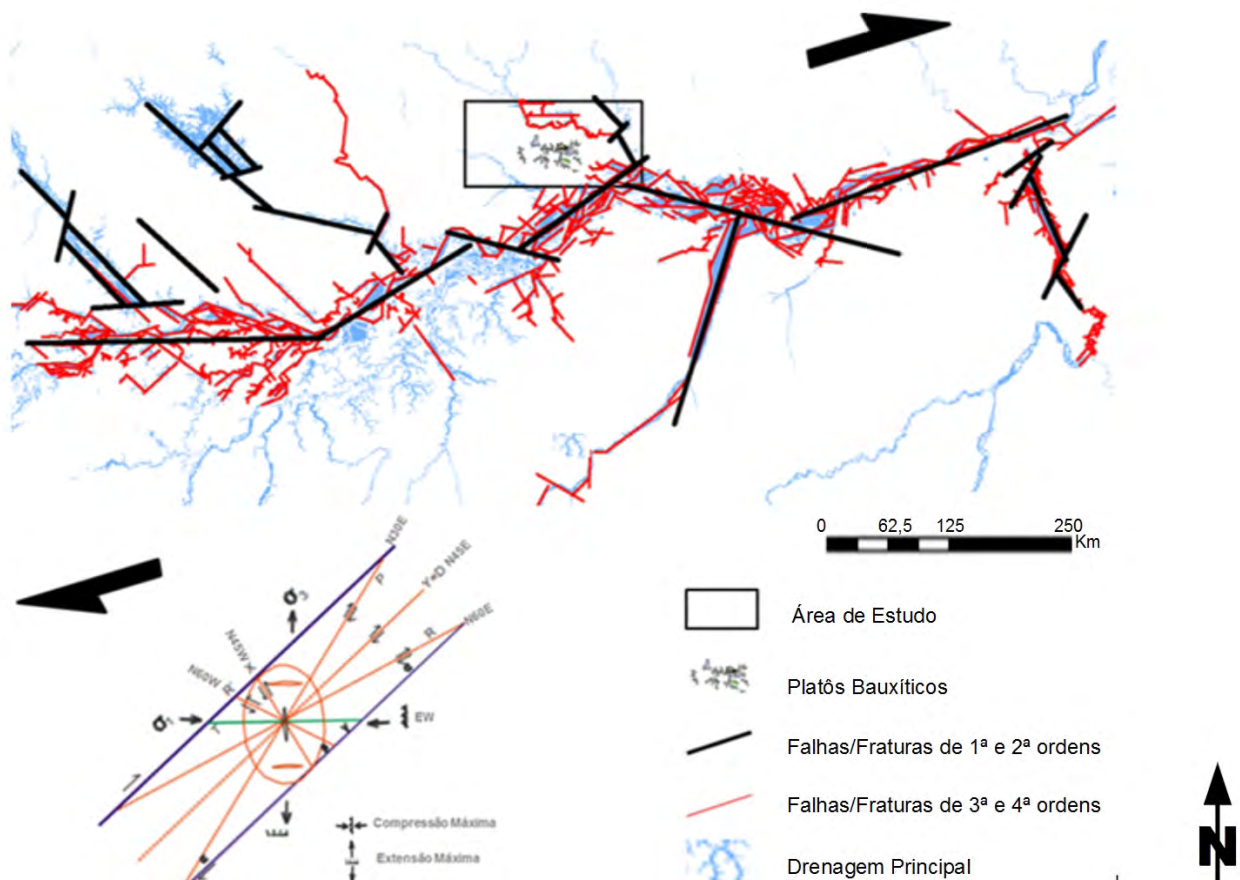


Figura 7 Avaliação macrorregional da reativação neotectônica da região de confluência dos rios Trombetas, Tapajós e Amazonas na perspectiva de um sistema rúptil destal de Riedel, com discriminação das diferentes estruturas de reativação.

macro porosidade secundária, observada em superfície e em subsuperfície.

A análise estatística dos lineamentos da região de Porto Trombetas (Figura 8), em conjunto com as observações de campo, revelam 4 direções principais de falhamentos e fraturamentos NW-SE, NE-SW, E-W e N-S, os dois primeiros conjuntos sendo as direções predominantes enquanto os sistemas E-W e N-S correspondem a sistemas subordinados (Figura 8A). Em detalhe os conjuntos NW-SE, NE-SW se desdobram, de fato em quatro sistemas: N30-50E, N50-70E, N30-50EW e N50-70W, compondo, em conjunto com os sistemas E-W e N-S, três pares ortogonais de fraturamentos, definindo um padrão de simetria ortorrômbico (Figura 8C). Este tipo de simetria, compondo sistemas ortogonais de fraturas de extensão em ambas as direções, se formam em situações onde o *stress* decresce suficientemente para que a compressão máxima ( $\sigma_1$ ) se torne vertical e os eixos de *stress*, intermediário e mínimo ( $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ ) sejam ambos extensionais e de intensidades semelhantes em um regime de deformação onde a componente de cisalhamento puro é

a componente dominante (Reches 1978, 1983; Reches & Dietrich 1983; Dunne & North 1990; Hancock *et al.* 1987, 1991; Reches & Lockner 1994; Heffer 2012).

Na Figura 8B a análise estatística das direções dos lineamentos foi realizada ponderando cada lineamento por sua extensão, este artifício permite destacar claramente quatro direções mais importantes, a direção principal corresponde a lineamentos N40-50W, correspondendo aos lineamentos mais longos e persistentes da região cujo exemplo mais expressivo é o Grabén do Rio Trombetas; em seguida destacam-se os lineamentos com direção N50-60E exemplificados pelo Grabén do Rio Tapajós; enquanto a direção N70-80E corresponde à direção geral do próprio Rio Amazonas. Por fim destacam-se os lineamentos N80-90W que correspondem originalmente à falhas e fraturas do tipo T. Estas direções ajustam-se satisfatoriamente às direções estabelecidas pelo modelo cinemático acima descrito (Figura 7), sendo estas as orientações das principais estruturas reativadas na região em estudo. Resultados similares aos aqui descritos foram apresentados por Palha

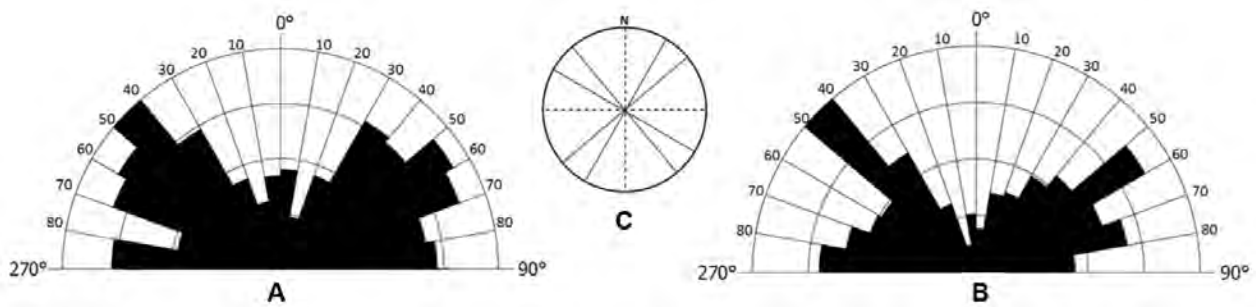


Figura 8 Diagramas de rosetas de lineamentos da região de Porto Trombetas extraídos de imagens de satélite Landsat sobreposta ao modelo digital de elevação SRTM; A. Frequência relativa das direções dos lineamentos; B. Frequência relativa das direções dos lineamentos ponderados pelo comprimento (Extensão total dos lineamentos = 16292 km, Máximo = 889 km); C. Estereograma (hemisfério inferior, igual área) mostrando as atitudes dos planos principais (traços contínuos) e subordinados (traços pontilhados) de falhamento/faturamento da região de Porto Trombetas apresentando padrão de simetria ortorrômbico.

& Carvalho (2005) para a região de Manaus - Presidente Figueiredo, indicando que o modelo cinemático apresentado pode ser regionalizado ao menos para a região do médio rio Amazonas.

#### 4.3 Estágios da Reativação Neotectônica

A reativação que é observada nas camadas mais rígidas da cobertura certamente afeta a camada de Argila de Belterra e o *top soil*, entretanto, por serem representadas por materiais plásticos sua preservação nos perfis e taludes não é materializada. Contudo, o abatimento de blocos (tanto local como regionalmente) da “Superfície de Aplainamento Sul Americana Modificada” (Platôs Bauxíticos), capeados pela Argila de Belterra/*top soil*, atesta atuação da neotectônica nos materiais mais jovens que as crostas ferruginosas e aluminosas. Tendo em consideração as idades obtidas, em torno de 14 Ma (pelo método de defeitos induzidos por radiação) para a formação de caulinita de perfis lateríticos desenvolvidos sobre unidades da Formação Alter do Chão (Balan *et al.*, 2005) é possível sugerir a atuação de processos neotectônicos significativos ao menos em quatro períodos:

- Relacionado com o primeiro grande evento de lateritização, desenvolvido no paleoceno-eoceno (35 - 55 Ma) responsável pela formação, na região do médio Rio Amazonas e dos grandes depósitos bauxíticos de Porto Trombetas e Juruti (Horbe *et al.*, 2001);
- Recorrência dos processos neotectônicos durante o mioceno por volta de 14 Ma;
- Retomada das atividades neotectônicas provavelmente relacionada com a elevação da Cadeia Andina e reversão transcontinental do Rio Amazonas, em torno de 6 a 10 Ma, com abatimentos e soerguimentos locais, promovendo a degradação e ou pedogenização de perfis lateríticos previamente formados nas

áreas mais elevadas e sedimentação em planícies aluvionares e lagos formados nas áreas abatidas; e

- Exumação regional lenta e progressiva resultando no panorama de dissecação atual do relevo.

Esta proposta de reativação neotectônica em diferentes estágios se baseia nos resultados apresentados por: Lemos & Villas (1983), Kotschoubey & Lemos (1985), Costa *et al.* (1991, 1996), Vasconcelos *et al.* (1994), Truckenbrodt (1994), Maurity & Kotschoubey (1995), Ruffet *et al.* (1996), Angélica (1996), Kotschoubey *et al.* (2005a, 2005b), Costa *et al.* (2005).

#### 4.4 Neotectônica e Hidrogeologia

O quadro neotectônico apresentado também afeta as condições hidrogeológicas da região, em que o Sistema Aquífero Alter do Chão apresenta variação lateral do seu comportamento hidráulico e de fluxo, com a presença de aquíferos livres (nos vales e terras baixas) e semiconfinados (sob platôs lateríticos). A influência das estruturas neotectônicas no condicionamento das águas subterrâneas foi abordada por Igreja (2012) para a região de Manaus. Este autor conclui que após o encontro dos rios Negro e Solimões há inversão de fluxo do rio Amazonas em direção ao sistema Aquífero Alter do Chão em função da presença de camada de arenito silicificado que funciona como barreira ao fluxo.

No caso da região de Porto Trombetas as estruturas neotectônicas resultam na maior interação entre o aquífero representado por todo o pacote que preserva os platôs com o aquífero regional sotoposto. A camada confinante é composta por um pacote heterogêneo representado majoritariamente pelos sedimentos pelíticos representados por argilitos e folhelhos situados abaixo da bauxita e Argila de Belterra. Do ponto de vista exclusivamente descritivo a camada confinante deveria se comportar como um aquífugo e assim

o aquífero regional deveria funcionar hidráulicamente como um aquífero totalmente confinado. Contudo estudos hidrogeológicos conduzidos por Azevedo (2019) mostram que o reservatório subterrâneo regional se comporta como um aquífero semiconfinado com contribuição de água armazenada no aquífero (segundo Fetter, 2001). A maior conexão hidráulica entre a camada confinante e o aquífero sotoposto é vinculada à atividade neotectônica da região

que resulta na criação de planos preferenciais de fluxo que ampliam a drenança da água do aquífero para o aquífero confinado (Figura 9). A conexão hidráulica entre aquífero e aquífero semiconfinado ainda é favorecida pela estrutura esponjosa da camada de crostas (ferruginosa e aluminosa) e pela bioturbação das raízes que podem ser observadas a profundidades maiores que 15 metros.

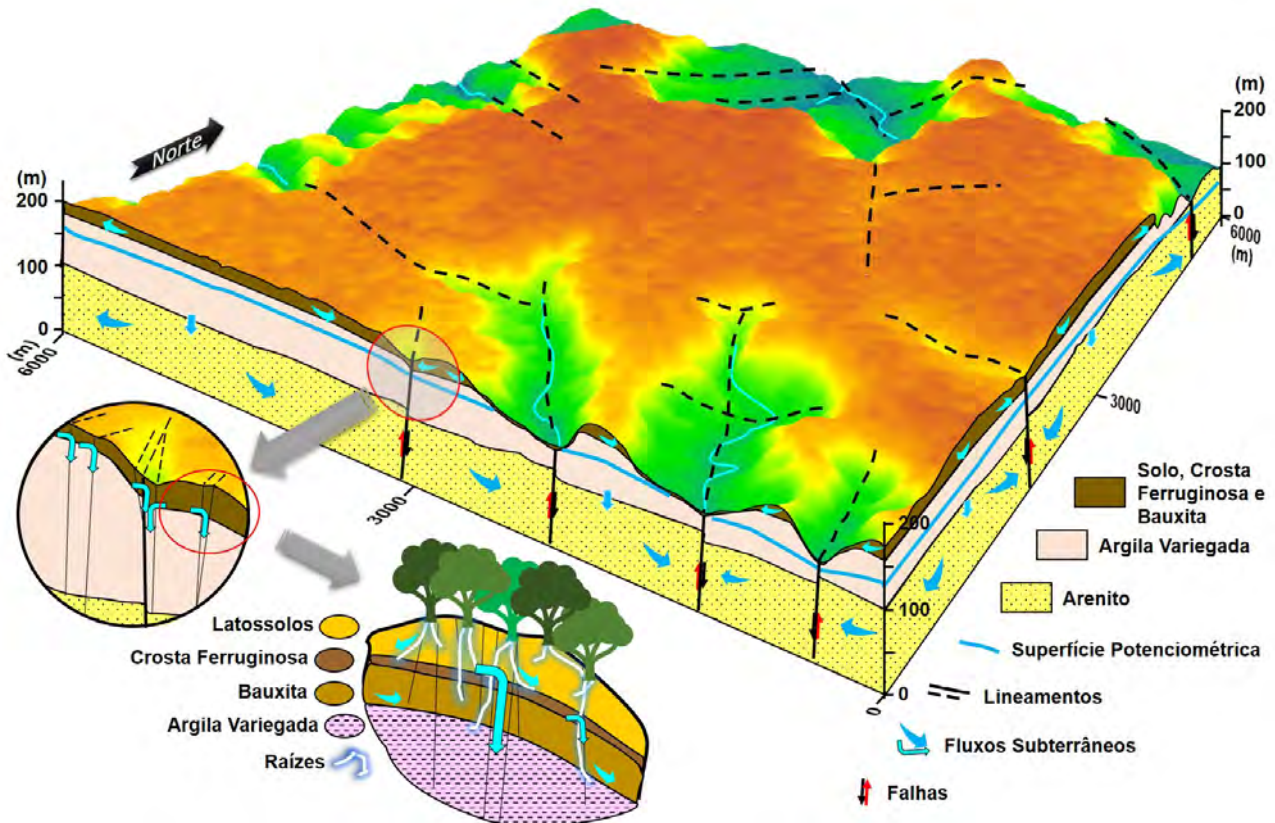


Figura 9 Bloco diagrama esquemático mostrando os diferentes padrões de fluxo e conexão hidráulica entre a camada confinante e o aquífero semiconfinado sotoposto.

## 5 Conclusões

A região de Porto Trombetas, como nas demais áreas da Amazônia brasileira, apresenta fortes evidências e registros da atividade neotectônica. Os principais argumentos que mostram a atuação de esforços recentes e desenvolvimento de estruturas neotectônicas são: linearidade dos cursos d'água superficiais, assimetria dos vales fluviais, presença de estruturas tipo *slickensides* em crostas ferruginosas, juntas em crostas bauxíticas e escalonamento dos platôs em direção à calha principal do rio Amazonas.

A atividade neotectônica na região se desenvolve em um contexto compressivo causando reativação principalmente de estruturas E-W, NW-SE e NE-SW. As estruturas com direção próxima a N-S tendem a se fechar e a presença de lineamentos nesta direção deve ser herdada do período em que se deu a separação sul atlântica. A avaliação da neotectônica como um sistema destal de Riedel possibilita a explicação do desenvolvimento da maior parte das direções de lineamentos regionais da região. O ambiente neotectônico compressivo é resultante da dinâmica a que a placa sul-americana está submetida, com migração

para leste (a partir da cadeia Andina) e para oeste (a partir da cadeia Meso-oceânica).

As principais implicações da estruturação neotectônica na região incluem: *i*) o desmantelamento dos platôs, resultando no retrabalhamento com erosão e eliminação de depósitos de bauxita; *ii*) a ampliação da conexão hidráulica entre o aquítarde e o aquífero sotoposto, em função do aumento da drenança de água do aquítarde para o aquífero; *iii*) a configuração da compartimentação geomorfológica regional em platôs, encostas, terras baixas e planícies aluviais; *iv*) determinação da forma reticulada da rede de drenagem.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Geociências da Universidade de Brasília - IG/UnB e ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA pelo apoio à pesquisa. Reconhecimento especial ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio por autorizar o acesso nas áreas de estudo e à Mineração Rio do Norte - MRN por fornecer o auxílio logístico.

## 7 Referências

- Amaral, F.R.; Silva, C.L.; Maia, T.A.; Val, P.F.A.; Ribeiro, O.L. & Morales, N. 2009. Controle neotectônico no paleocanal do Tarumã-Mirim, noroeste de Manaus (AM). *In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS*, 12, Ouro Preto, UFOP, Anais, SBG, p. 56.
- Angélica, R.S. 1996. *Mineralogia e geoquímica de gossans e lateritos auríferos na região de Carajás: depósitos de Igarapé Bahia e Águas Claras*. Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Pará, Tese de Doutorado, 138p.
- Azevedo, J.H. 2019. *Fluxos subterrâneos e recarga do Sistema Aquífero Alter do Chão em lateritos amazônicos: estudo de caso em Porto Trombetas, Pará*. Programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Universidade de Brasília, Tese de Doutorado, 139p.
- Balan, E.; Allard, T.; Fritsch, E.; Selo, M.; Falguères, C.; Chabaux, F.; Pierret, M-C. & Cala, G. 2005. Formation and evolution of lateritic profiles in the middle Amazon basin: Insights from radiation-induced defects in kaolinite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(9):2193–2204.
- Brandt Meio Ambiente. 2007. Estudo de Impacto Ambiental - EIA: Mineração de bauxita nos platôs Bela Cruz, Aramã, Greig, Teófilo, Cipó e Monte Branco. BRANDT, Oriximiná, 301p.
- Campos, J.E.G.; Xavier, T.O. & Freitas-Silva, F.H.F. 2016. Registros de atividade neotectônica no Distrito Federal. *Geociências*, 35(2): 203-219.
- Caputo, M.V. & Soares, E.A.A. 2016. Eustatic and tectonic change effects in the reversion of the transcontinental Amazon River drainage system. *Brazilian Journal of Geology*, 46(2):301-328.
- Caputo, M.V. 1984. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil*. Programa de Doutorado em Geologia, Universidade da Califórnia, Tese de Doutorado, 583p.
- Caputo, M.V. 2011. Discussão sobre a Formação Alter do Chão e o Alto de Monte Alegre. *In: NASCIMENTO, R.S.C.; HORBE, A.M.C. & ALMEIDA, C.M. (Org.). Contribuição à Geologia da Amazônia*. Manaus: SBG/Núcleo Norte, v. 7, p.7-23.
- Caputo, M.V.; Rodrigues R. & Vasconcelos, D.N.N. 1972. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 26. Belém, Anais, SBG v.3, p.35-46.
- Caputo, M.V.; Rodrigues, R. & Vasconcelos, D.N.N. 1971. Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas. Belem, PETROBRAS, Relatório Interno 641-A.
- Costa, M.L.; Fernandes, O.J.C. & Requelme, M.E.R. 2005. O depósito de manganês do Azul, Carajás: estratigrafia, mineralogia, geoquímica e evolução geológica. *In: MARINI, O.J.; QUEIROZ, E.T. & RAMOS, B.V. (eds.). Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília, DNPM-CT/Mineral-ADIMB, p. 227-333.
- Costa, A.R.A. 2002. *Tectônica cenozoica e movimentação salífera na Bacia do Amazonas e suas relações com a Geodinâmica das placas da América do Sul, Caribe, Cocos e Nazca*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Pará, Dissertação de Mestrado, 237p.
- Costa, L.M.; Cruz, G.S.; Almeida, E.D.F. & Poellmann, H. 2014. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: Evidence of genetic relationships. *Journal of Geochemical Exploration*, 146:58-74.
- Costa, M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, 21(2):146-160.
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil. 2012. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico Aquífero Alter do Chão no Estado do Pará, Bacia Sedimentar do Amazonas. Belo Horizonte, CPRM, 47p.
- Cunha, P.R.C.; Gonzaga, F.G.; Coutinho, L.F.C. & Feijó, F.J. 1994. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8:47-55.
- Dunne, W.M. & North, C.P. 1990. Orthogonal fracture systems at the limits of thrusting: an example from southwestern Wales. *Journal of Structural Geology*, 12(2):207-215.
- Felipe, L.B. & Morales, N. 2012. Influência neotectônica na evolução geomorfológica e geológica da região de Marabá-PA. *Contribuições à Geologia da Amazônia*, 10:145-160.
- Fernandes-Filho, L.A.; Costa, M.L. & Costa, J.B.S. 1997. Registros neotectônicos nos lateritos de Manaus - Amazonas. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1):9-33.
- Fetter, C.W. 2001. *Applied Hydrogeology*. 4th ed. Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, New Jersey, 598p.

- Franzinelli, E. & Piuci, J. 1988. Evidências de neotectonismo na Bacia Amazônica. *In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GEOLOGIA*, 7, Belém. Anais, SBG. p. 80-90.
- Hancock, P.L. 1991. Determining contemporary stress directions from neotectonic joint systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 337:29-40.
- Hancock, P.L.; Al-Kadhi, A.; Barka, A.A. & Bevan, T.G. 1987. Aspects of analysing brittle structures. *Annales Tectonicae*, 1:5-19.
- Hasui, Y. 1990. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. *In: WORKSHOP SOBRE NEOTECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO CENOZOICA CONTINENTAL NO SUDESTE BRASILEIRO*, Belo Horizonte, Anais, SBG, p. 1-31.
- Hasui, Y. & Mioto, J.A. 1988. A zona sismogênica de Porangatu. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 35, Belém, Anais, SBG, v. 5 p. 2173-2186.
- Heffer, K. J. 2012. Geomechanical mechanisms involving faults and fractures for observed correlations between fluctuations in flowrates at wells in North Sea oilfield. *In: SPENCE, G.H; REDFERN, J; AGUILERA, R.; BEVAN, T.G.; COSGROVE, J.W.; COUPPLES, G.D.; DANIEL, J.M.* (eds). *Advances in study of fractured reservoirs*. London: Geological Society, Special Publication, 374:173-185.
- Horbe, A.M.C.; Nogueira, A.C.R.; Horbe, M.A.; Costa, M.L. & Suguio, K. 2001. A lateritização na gênese das superfícies de aplainamento da região de Presidente Figueiredo-Balbina, nordeste do Amazonas. *In: COSTA, M.L. & ANGELICA, R.S.* (org.). *Contribuições a Geologia da Amazônia Vol 2*. Belém, SBG/Núcleo Norte, p. 148-176.
- IAG. 2019. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. <http://moho.iag.usp.br/>. Acesso em novembro de 2019.
- Igreja, H.L.S. & Franzinelli, E. 1990. Estudos neotectônicos na região do baixo rio Negro - centro-nordeste do Estado do Amazonas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 36, Manaus, Anais, SBG/Núcleo Norte, v. 5, p.2099-2108.
- Igreja, H.L.S. 2012. A neotectônica e as mudanças hidrogeológicas do sistema fluvial Solimões-Amazonas: "Encontro das águas de Manaus", Amazonas, Brasil. *Revista Geonorte*, 2(4):20-33.
- Kotschoubey, B. & Lemos, V.P. 1985. Considerações sobre a origem e a gênese das bauxitas da Serra dos Carajás. *In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA*, 2, Belém, SBG/Núcleo Norte, Anais, v. 3, p. 48-61.
- Kotschoubey, B.; Calaf, J.M.C.; Lobato, A.C.C.; Leite, A.S. & Azevedo, C.H.D. 2005a. Caracterização e gênese dos depósitos de bauxita da Província Bauxitífera da Região de Paragominas, noroeste da Bacia do Grajaú, nordeste do Pará/oeste do Maranhão. *In: MARINI, O.M.; QUEIROZ, E.T.; RAMOS, B.W.* (Eds.). 2005. *Caracterização de Depósitos Minerais em Distritos Mineiros da Amazônia*. Brasília, DNPM - CT/Mineral - ADIMB. p. 687-782.
- Kotschoubey, B.; Truckenbrodt, W. & Calaf, J.M.C. 2005b. Evolução geológica da porção meridional da Província Bauxitífera de Paragominas durante o Neógeno/Pleistoceno (noroeste da BACIA DO GRAJAÚ, nordeste do Pará e extremo oeste do Maranhão). *Revista Brasileira de Geociências*, 35(2):263-272.
- Lemos, V.P. & Villas, R.N.N. 1983. Alteração supergênica das rochas básicas do Grupo Grão Pará - Implicações sobre a gênese do depósito de bauxita de N-5, Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 13(3):165-177.
- Maurity, C. & Kotschoubey, B. 1995. Evolução recente da cobertura de alteração no Platô N1 - Serra dos Carajás-PA. Degradação, pseudocarstificação, espeleotemas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi (série Ciências da Terra)*, 7:331-362.
- Montes, C.R.; Lucas, Y.; Melfi, A.J. & Ishida, D.B. 2007. Systèmes sols ferrallitiques-podzols et genèse des kaolins. *Geoscience*, 339: 50-56.
- Mörner, N.A. 1993. Neotectonics, the new global tectonic regime during the last 3 Ma and the initiation of ice ages. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65(2): 295-301.
- Palha, W.S.M. & Carvalho, A.S. 2005. Extração automática de lineamentos e análise neotectônica preliminar da região hidrográfica centro amazônica utilizando dados de interferometria de radar. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 12, Goiânia, INPE, Anais, p. 1839-1846.
- RADAMBRASIL. 1976. Folha SA-21-Santarém: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra (Levantamento de Recursos Naturais). Rio de Janeiro: PROJETO RADAMBRASIL, 522p.
- Ramos, F.L.G.; Miranda, F.P.; Landau, L. & Silva, C.L. 2011. Detecção de movimentação crustal recente em Manaus (AM) utilizando informações de sensoriamento remoto por radar (interferometria RADARSAT-1 e modelo digital de elevação da SRTM). *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR*, 15, Curitiba, INPE. p. 8162-8169.
- Reches, Z. 1978. Analysis of faulting in three-dimensional strain field. *Tectonophysics*, 47:109-129.
- Reches, Z. & Dieterich, J. 1983. Faulting of rocks in three-dimensional strain field. I Failure of rocks in poliaxial, servo-control experiments. *Tectonophysics*, 95: 111-132.
- Reches, Z. & Lockner, D.A. 1994. Nucleation and growth of faults in brittle rocks. *Journal of Geophysical Research*, 99:18159-18173.
- Reches, Z. 1983. Faulting of rocks in three-dimensional strain field. II Theoretical analysis. *Tectonophysics*, 95:133-156.
- Ruffet, G. ; Innocent, C. ; Michard, A. ; Féraud, G. ; Beauvais, A.; Nahon, D. & Hamelin, B. 1996. A geochronological <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar and <sup>87</sup>Rb/<sup>87</sup>Sr study of K-Mn oxides from weathering sequence of Azul, Brazil. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(12): 2219-2232.
- Saadi, A. 1993. Neotectônica da Plataforma Brasileira: Esboço de Interpretação preliminar. *Geonomos*, 1(1):1-15.
- Sacek, V. 2014. Drainage reversal of the Amazon River due to the coupling of surface and lithospheric processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 401: 301-312.

- Santos J.O.S. 2003. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil-Central. In: BIZZLI, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M. & GONÇALVES, J.H. (eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Brasília, SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, p. 169-226.
- Santos, J.O.S.; Hartmann, L.A.; Gaudette, H.E.; Groves, D.I.; McNaughton, N.J. & Fletcher I.R. 2000. A New understand of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, 3(4):453-488.
- Santos, J.M.; Val, P.F.A.; Silva, C.L. & Silva, M.L. 2011. Análise de perfis de knickpoints das bacias hidrográficas da região de Manaus (Am) e associação com modelo neotectônico. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 12, Boa vista, Anais, SBG/Núcleo Norte, p.129-130.
- Sena-Costa, J.B.; Bemerguy, R.L.; Hasui, Y.; Borges, M.S.; Ferreira, C.R.P.; Bezerra, P.E.L.; Costa, M.L. & Fernandes, J.M. 1996. Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos*, 4(2):23-44.
- Silva, C.L.; Morales, N.; Crósta, A.P.; Costa, S.S. & Jimenez-Rueda, J.R. 2007. Analysis of tectonic-controlled fluvial morphology and sedimentary processes of the western amazon basin: an approach using satellite images and digital elevation model. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 79(4): 693-711.
- Silva, C.L. & Rossetti, D.F. 2009. História geológica dos rios na Amazônia. *Ciência e Cultura*, 61(3):24-26.
- Silva, C.L. 2005. *Análise da tectônica cenozoica da região de Manaus e adjacências*. Programa de Pós-graduação e Geociências, Universidade Estadual Paulista, Tese de Doutorado, 282p.
- Soares, E.A.A.; D'Apolito, C.; Jaramillo, C.; Harrington, G.; Caputo, M.V.; Barbosa, R.O.; Santo, E.B.; Dino, R. & Gonçalves, A.D. 2017. Sedimentology and Palynostratigraphy of a Pliocene-Pleistocene (Piacenzian to Gelasian) deposit in the lower Negro River: Implications for the establishment of large rivers in Central Amazonia. *Journal of South American Earth Science*, 79: 215-229.
- Soares, E.A.A.; Wahnfried, I. & Dino, R. 2016. Estratigrafia de subsuperfície da sequência sedimentar cretácea-neógena das regiões de Manaus e Itacoatiara, Amazônia Central. *Geologia USP* 16(1):23-41.
- Souza-Filho, P.W.M.; Quadros, M.L.E.S.; Scandola, J.E. & Silva-Filho, E.P. 1999. Compartimentação morfoestrutural e neotectônica do sistema fluvial Guaporé-Mamoré-Alto Madeira, Rondônia Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 29(4): 469-476.
- Souza, V.S. & Nogueira, A.C.R. 2009. Seção geológica Manaus - Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(1):16-29.
- Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. 1999. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. *Episodes*, 22(3):174-182.
- Tassinari, C.C.G. & Macambira, M.J.B. 2004. A evolução tectônica do Cráton Amazônico. In: MANTESSONETO, V.; BARTORELLI, A.; DAL RÉ CARNEIRO, C.; BRITO-NEVES, B.B. (eds.). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida, São Paulo, Ed. Beca, p.471-485.
- Tassinari, C.C.G.; Bettencourt, J.S.; Gerales, M.C.; Macambira, M.J.B. & Lafon, J.M. 2000. The Amazonian Craton. In: CORDNI, U.G.; MILANI, E.J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D.A. (eds.) In: INTER. GEOL. CONGR TECTONIC EVOLUTION OF SOUTH AMERICA, 31, Rio de Janeiro, 41- 95p.
- Travassos, W.A.S. & Barbosa Filho C.M. 1990. Tectonismo Terciário na área do Rio Tapajós, Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 4(3): 299-314.
- Truckenbrodt, W. & Kotschoubey, B. 1982. Considerações a respeito das bauxitas na parte leste da região amazônica. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1, Belém, SBG/Núcleo Norte, Anais, p. 201-209.
- Truckenbrodt, W., Kotschoubey, B. & Schellmann, W. 1991. Composition and origin of the clay cover on north Brazilian laterites. *Geologische Rundschau*, 80(3):591-610.
- Truckenbrodt, W. & Kotschoubey, B. 1981. Argila de Belterra - Cobertura terciária das bauxitas amazônicas. *Revista Brasileira de Geociências*, 11(3): 203-208.
- Val, P.F.A.; Silva, C.L.; Maia, T.F.A. & Morales, N. 2010. Identificação de zonas de falhas na Amazônia a partir de análise de knickpoints: estudo do caso da Zona de Falha do Baependi (AM). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 45, Belém, Anais, SBG, CD Rom.
- Vasconcelos, P.M.; Renne, P.R.; Brimhall, G.H. & Becker, T.A. 1994. Direct dating of weathering phenomena by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and K-Ar analysis of supergene K-Mn oxides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58:1635-1665.
- Zoback, M.L.; Zoback, M.D.; Adams, J.; Assumpção, M.; Bell, S.; Gergman, E.A.; Blumling, P.; Brereton, N.R.; Denham, D.; Ding, J.; Fichs, K.; Gay, N.; Gregersen, S.; Gupta, H.K. Gvishiani, A.; Jacob, K.; Klein, R.; Knoll, P.; Magee, M.; Mercier, J.L.; Muller, B.C.; Paquin, C.; Rajendran, K.; Stephansson, O.; Suarez, G.; Suter, M.; Udias, A.; Xu, Z.H. & Zhizhin, M. 1989. Global patterns of tectonic stress. *Nature*, 341:291-298.