UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

# CONTEXTO TECTONO-SEDIMENTAR DAS DEPRESSÕES TECTÔNICAS NA ZONA DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS NEGRO E SOLIMÕES, AMAZÔNIA CENTRAL

.

STÉFANO DE MELLO ANTONACCIO SANTOS

MANAUS
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

STÉFANO DE MELLO ANTONACCIO SANTOS

# PREENCHIMENTO SEDIMENTAR DE *GRABENS* NA ZONA DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS NEGRO E SOLIMÕES, AMAZÔNIA CENTRAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geociências.

| | |
|---|---|
| Orientador: | Prof. Dr. Emílio Alberto Amaral Soares |
| Colaboradores: | Profa. Dra. Jamile Dehaini (UEA) |
| | Prof. Dr. Luís Antônio Castillo López (UFAM) |
| | Prof. Dr. Stélio Soares Tavares Júnior (UFRR) |

MANAUS
2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, Stéfano de Mello Antonaccio
S237c Contexto tectono-sedimentar das depressões tectônicas na zona de confluência dos rios Negro e Solimões, Amazônia Central / Stéfano de Mello Antonaccio Santos . 2024
78 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Emílio Alberto Amaral Soares
Dissertação (Mestrado em Geociências - Geologia Regional) -Universidade Federal do Amazonas.

1. Depressões Tectônicas. 2. Luminescência Opticamente Estimulada. 3. Terraços Fluviais. 4. Amazônia Central e Ocidental. I. Soares, Emílio Alberto Amaral. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

STÉFANO DE MELLO ANTONACCIO SANTOS

# CONTEXTO TECTONO-SEDIMENTAR DAS DEPRESSÕES TECTÔNICAS NA ZONA DE CONFLUÊNCIA DOS RIOS NEGRO E SOLIMÕES, AMAZÔNIA CENTRAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Aprovado em 10 de abril de 2023.

BANCA EXAMINADORA

gov.br Documento assinado digitalmente
EMILIO ALBERTO AMARAL SOARES
Data: 23/01/2024 08:43:06-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Emílio Alberto Amaral Soares, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
RAPHAEL DI CARLO SILVA DOS SANTOS
Data: 16/01/2024 15:59:36-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Raphael Di Carlo Silva dos Santos, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

gov.br Documento assinado digitalmente
FABIO LUIZ WANKLER
Data: 16/01/2024 10:50:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Fábio Luiz Wankler, Membro.
Universidade Federal de Roraima

Aos meus pais Sérgio e Ester, a minha esposa Sthefane.
Vocês são meus pilares.

# AGRADECIMENTOS

Quando olhamos ao nosso redor e vemos alguém que está sempre presente e que nunca nos deixa desanimar, só podemos ser gratos. Amigo, conselheiro, companheiro, Pai e Criador. Agradeço a Deus pelo dom da vida, pelas dificuldades que passamos juntos e pelas que ainda vamos passar.

Agradeço também a toda minha família, irmãos, tios, primos, sobrinhos, enteada e especialmente meus pais Sérgio e Ester que sempre me orientaram e apoiaram em todas minhas decisões, estiveram juntos comigo desde a fase de aprendizado até o desenvolvimento pessoal, agradeço também a minha esposa Sthefane que me acompanha desde o tempo de graduação e está sempre ao meu lado, aconselhando e apoiando durante as batalhas diárias, sendo um porto seguro nas horas de dificuldades.

Um eterno agradecimento ao meu amigo e orientador Emílio Soares que me acompanha desde o tempo de PIBIC,na graduação, e que teve uma enorme paciência me orientando durante o desenvolvimento deste trabalho.

Muito obrigado aos pesquisadores Dra. Sônia Hatsue Tatumi. (UNIFESP), Rodolfo Dino (UERJ), Dr. Stélio Soares Tavares Júnior (UFRR), Dra. Jamile Dehaini (UEA), Dr. Luís Antônio Castillo López (UFAM), Carlos D'Apolito Júnior (UFMT) e Cleber Eduardo Neri Rabelo (UFAM) que tiveram uma participação impar para o desenvolvimento e obtenção dos resultados de Luminescência, palinologia, estrutural e geofísica.

Muito obrigado aos professores do DEGEO, Naziano, Ivaldo, Ingo, Keila, Valquíria e Cassia pelas disciplinas ministradas e conhecimento compartilhado durante o decorrer do curso.

À FAPEAM pela bolsa de estudo disponibilizada pela RESOLUÇÃO N. 006/2020 - POSGRAD UFAM - Edição 2020, além dos custeios das atividades de campo, das análises para o trabalho, através do projeto “Estudo estratigráfico, sedimentológico, mineralógico e geoquímico dos depósitos argilosos do polo oleiro Iranduba-Manacapuru, AM (EDITAL N. 002/2018 - UNIVERSAL FAPEAM)

A UFAM pelo local de estudo e disponibilidade dos laboratórios com equipamentos que propiciaram o desenvolvimento do trabalho.

*“Quando você tiver finalizado uma meta, não olhe para ela como a linha de chegada; olhe para ela como o ponto de partida para sua próxima conquista. A vida é uma maratona sem fim. Não fique ocioso por muito tempo; em vez disso, concentre-se no próximo ponto do marcador.” (Autor desconhecido)*

RESUMO

Grande parte da sedimentação quaternária da zona de confluência dos rios Negro e Solimões mostra-se confinada em 04 depressões tectônicas, de direção geral NW-SE. Esses depósitos guardam registros dos principais processos sedimentares e tectônicos que influenciaram a dinâmica desses rios no Pleistoceno-Holoceno. O uso de imagens SRTM permitiu a delimitação das depressões e entendimento dos processos deposicionais associados, com a definição da morfologia deposicional de barras de acresção com sentido de migração para N-NE. A integração dessa informação com dados de datação absoluta obtidos por Luminescência de Cristais, permitiu definir um intervalo de deposição entre 303.900 a 1.340 anos, influenciada pela dinâmica dos rios Negro, Solimões e Ariaú neste período. Na última década esse método geocronológico tem contribuído para o entendimento tectono-sedimentar de trechos dos rios Negro e Solimões, que inclui os processos de deposição nas depressões em estudo. A definição interna da espessura dos depósitos e sua relação de contato com o substrato sotoposto, utilizou dados de superfície (afloramentos) e, principalmente, dados inéditos de subsuperfície (sondagem rotativa e levantamentos geofísicos). A comprovada inclinação dos substratos das depressões para N-NE, que atinge até 60 metros de profundidade, dá suporte para a definição de *hemigráben*, cuja origem está associada à reativação de falhas tectônicas e ação de esforços distensionais de direção geral NE-SW, que ocorreram no Neomioceno-Plioceno.

**Palavra-chave**: Depressões Tectônicas; Luminescência Opticamente Estimulada; Terraços Fluviais, Amazônia Central e Ocidental.

ABSTRACT

Great part of the Quaternary sedimentation of the confluence zone of the Negro and Solimões rivers is confined in 04 tectonic depressions, general direction NW-SE. These deposits hold records of the main sedimentary and tectonic processes that influenced the dynamics of these rivers in the Pleistocene-Holocene. The use of SRTM images allowed the delimitation of the depressions and the understanding of the associated depositional processes, with the definition of the depositional morphology of accretion bars with migration direction towards N-NE. The integration of this information with absolute data obtained by Luminescence of Crystals, allowed to define a deposition interval between 303,900 to 1,340 years, influenced by the dynamics of the Negro, Solimões and Ariaú rivers in this period. In the last decade, this geochronological method has contributed to the tectono-sedimentary understanding of stretches of the Negro and Solimões rivers, which includes the deposition processes in the depressions under study. The internal definition of the thickness of the deposits and their relationship of contact with the underlying substratum used surface data (outcrops) and, mainly, unpublished subsurface data (rotary sounding and geophysical surveys). The proven N-NE inclination of the substrates of the depressions, which reaches up to 60 meters in depth, supports the definition of hemigraben, whose origin is associated with the reactivation of tectonic faults and the action of extensional efforts in a general NE-SW direction, which occurred in the Neomiocene-Pliocene.

Keyword: Tectonic Depressions; Optically Stimulated Luminescence; River Terraces, Central and Western Amazon.

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

N- Norte
S- Sul
E- Leste
W- Oeste
NE- Nordeste
NW- Noroeste
SE- Sudeste
SW- Sudoeste
GPA- *Graben* do Paraná do Ariaú
GCP- *Graben* do Cacau Pireira
GCC- *Graben* da Cachoeira do Castanho
GLM- *Graben* do Lago do Miritíí
GDC- *Graben* do Careiro
GDM- *Graben* de Manaus
GIP- *Graben* Ilha da Paciência
AP- Antes do presente
SAR- Sensor de radar de abertura sintética
Sipam- Sistema de proteção da Amazônia
MDE- Modelo digital de elevação
SEV- Sondagem elétrica vertical
Degeo- Departamento de Geociências
De- Doses equivalentes
CAM- Modelo de idade central
FMM- Modelo de mistura finita de idade
MAM - Modelo de idade mínima
OD- Dispersão
Fapeam- Fundação de amparo à pesquisa do Estado do Amazonas
Ufam- Universidade Federal do Amazonas
Unifesp- Universidade Federal de São Paulo.
UFRR-Universidade Federal de Roraima.
UEA- Universidade do Estado do Amazonas.
LOE- Luminescência opticamente estimulada
Siagas- Sistema de informa es de águas subterrâneas
CPRM-Companhia de pesquisa de recursos minerais
SNTD- Sistema neotectônico transcorrente dextral
INAA - Instrumental NeutronActivationAnalysis

LISTA DE FIGURAS DA DISSERTAÇÃO

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo destacando os limites e falhas das quatro depressões tectônicas (GLM, GPA, GCC e GCP), definido por Soares (2007), com as vias de acesso por rodovias (AM 070 e AM 452) e os principais rios da região. ..... 11

Figura 2. Levantamentos de campo ao longo das estradas e ramais secundários da região (Detalhes A e B), bem como descrição de afloramentos com coleta de amostras (Detalhes C e D). ..... 18

Figura 3. Furo de sondagem 1, na porção leste do GPA (sonda motorizada), com destaque para a coloração cinza dos sedimentos nas porções mais profundas (Detalhes A e B). Furo de sondagem 2 na porção central do GPA, destacando a coloração avermelhada dos sedimentos nas porções mais superficiais (Detalhes C e D). ..... 19

Figura 4. Modelo esquemático de disposição dos eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) para execução da SEV na área de estudo. Fonte: modificado de Orellana, 1982. ..... 20

Figura 5. Execução de sondagens elétrica vertical ao longo da AM-070 nos limites internos do GPA, na borda oeste (Detalhes A e D), na borda leste (Detalhes B e C) e na porção central (Detalhe E)..... 20

Figura 6. Blocos diagramas esquemáticos preliminares (3D) da depressão tectônica GPA elaborado a partir de informações litológicas de furos de sondagens, logs de perfurações e SEV's nos softwares Opendtect e Petrel, com indicação dos poços estudados (Poços 1 a 19) (A- imagem do programa Opendtect sem modificação e B- imagem trabalhada). ..... 21

Figura 7. (A) Peneiramento por meio do agitador de peneiras BERTEL em intervalos granulométricos (menor que 0,0062 mm, 0,0062 a 0,125 mm; 0,125 a 0,250 mm e maior que 0,250mm). (B) Solução de NaOH utilizado na preparação das amostras. (C) Granulômetro a laser modelo MALVERN. ..... 22

Figura 8. Coleta de amostras (Detalhes A, B e C) nas camadas arenosas, com auxílio de martelo, marreta, ferro de cova e tubo de alumínio. O detalhe D mostra o armazenamento em tubo de alumínio com as extremidades lacradas com papel alumínio e fita adesiva..... 24

Figura 9. Mapa de localização da zona de confluência dos rios Negro e Solimões, com os limites externos das depressões tectônicas GPA, GCP, GCC e GLM (linha branca)e indicação dos locais estudados (89 pontos, Siglas ST). Acesso a região por rodovia e rios ..... 25

Figura 10. Localização das SEV's (pontos amarelos, sigla SEV 01 a 09), furos de sondagem (pontos verdes, furos 1 a 4) e poços com Logs de perfuração (pontos vermelhos, sigla SA 01 a 06, disponíveis no http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_coordenada.php) nos limites do GPA. ..... 53

Figura 11. Seção panorâmica na margem do Rio Igarapé Tarumã Mirim mostrando o relevo de morros da unidade sedimentar neógena, limitada por depósitos arenosos quaternários. Ponto estudado (ST40) localizado no mapa da Figura 9. ..... 54

Figura 12. Seção panorâmica da unidade sedimentar neógena na margem do Rio Tarumã Mirim, com destaque para o aspecto avermelhado e mosqueado, com desenvolvimento de latossolo amarelo no topo. O Detalhe A mostra a relação de contato brusco entre as unidades cretácea e neógena. Ponto estudado (ST43) localizado no mapa daFigura 9. ..... 54

Figura 13 Seção panorâmica da unidade neógena mostrando o desenvolvimento de crosta lateritica (linha pontilhada branca) e latosolo amarelo no topo. Ponto estudado (ST01) localizado no mapa da Figura 9. ..... 54

Figura 14. Mapa mostrando diferentes padrões de drenagem desenvolvido sobre a unidade sedimentar neogena e depósitos quaternários da zona de confluência dos rios Negro e Solimões, com enfoque para os limites estruturais das depressões tectônicas GPA, GCP, GCC e GLM (linha tracejada verde). Na área aflorante do substrato Neógeno predomina o padrão de drenagem tipo dendrítico (Detalhe A) com detalhe de anomalia de quebra em cotovelo (Detalhe B), enquanto particularmente nos depósitos quaternários do GPA, predomina os padrões de drenagem tipo sub-dendrítico (Detalhe C) e festonado (Detalhe D), com detalhes de anomalia de drenagem com quebra em cotovelo (Detalhe E). ..... 55

Figura 15. Seção panorâmica no limite leste do GPA, com destaque para a quebra negativa do relevo (linha tracejada branca), entre a unidade neógena e o preenchimento sedimentar Quaternário (Terraço Inferior), com desnível de aproximadamente 25m. Ponto estudado (ST15) localizado no mapa da Figura 9. ..... 57

Figura 16.Seção panorâmica mostrando lajedos e blocos de crosta laterítica no topo da unidade neógena aflorante, sustentando o relevo elevado da borda leste do GPA. Ponto estudado (ST01) localizado no mapa da Figura 9. ..... 57

Figura 17. Seção panorâmica mostrando o relevo plano no limite oeste do GPA, sem quebra negativa evidente. Ponto estudado (ST24) localizado no mapa da Figura 9. ..... 57

Figura 18. Seção geologica B- A confeccionada a partir das seções colunares de 09 SEV's (SEV 01 a SEV 09), 04 furos de sondagem rotativa (Furos 1 a 4) e 06 logs de perfuração de poços (SA - 01 a SA - 06) (Fonte: CPRM/SIAGAS - http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_coordenada.php). Ênfase é dada a inclinação do substrato da depressão para E-NE (linha tracejada preta) e a individualização de duas unidades deposicionais Superior e Inferior (linha pontilhada preta). Seção identificada naFigura 10. ..... 59

Figura 19. Seção colunar dos furos de sondagem 1, 2 3 e 4 no GPA, com a definição da granulometria e estruturas sedimentares dos depósitos quaternários. Particularmente, no furo 3 foi possível definir a relação de contato dos depósitos quaternários com a unidade neógena,

marcado por nível de crosta laterítica. Os pontos vermelhos representam os locais de coleta para análise palinológica. Seções identificadas nas Figuras 10 e 18. ..... 60

Figura 20. Seção colunar dos logs de sondagem (siglas SA 1, 2, 3, 4, 5 e 6) no GPA, com a individualização de 02 litofácies sedimentares quaternárias, definidas como “argilo-síltico-arenoso” e “areno-siltico-argiloso” limitados na base (tracejado preto) pela unidade neógena e crosta laterítica. Fonte: Logs de poços (CPRM/SIAGAS - http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_coordenada.php). Seções identificadas nas Figuras 10 e 18. ..... 61

Figura 21. Seções colunares com dados de eletrorresistividade das camadas obtidas por SEV’s (01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08 e 09) no GPA, com destaque para os níveis métricos de crosta laterítica. Seções identificadas nas Figuras 10 e 18..... 62

Figura 22. Curvas de resistividade aparente obtidas por meio dos valores calculados para as profundidades e resistências das camadas geoeléticas das SEV’s. ..... 63

Figura 23. Pólen e esporos selecionados de: 1-2) Camarozonosporitestrilobactus D’Apolito et al., 2021; 3-4) CyatheaciditesannulatusCookson 1967; 5-6) FoveotriletesornatusRegali et al., 1974; 7) KuylisporiteswaterbolkiiPotonié 1956; 8-9) Polypodiaceoisporitespseudopsilatus Lorente 1986; 10-11) Polypodiaceoisporites? amazonensis Silva-Caminha et al., 2010; 12) PsilatrileteslobatusHoorn 1994b; 13) Podocarpidites sp.; 14) Alnipollenitesverus (Potonié 1931) exPotonié 1934; 15) Bombacaciditesciriloensis Muller et al., 1987; 16-17) Byttneripollisrugulatus D’Apolito et al., 2021; 18) Cichoreaciditeslongispinosus (Lorente 1986) Silva-Caminha et al., 2010; 19-20) Cichoreacidites? igapoensis D’Apolito et al., 2019; 21) Clavainaperturitesmicroclavatus Hoorn 1994b; 22) Cyperaceaepollenites “rotundus” (informal from Gomes et al., 2021); 23) Echitricolporitesspinosus Van der Hammen 1956; 24-25) Fenestritesspinosus Van der Hammen 1956; 26) Loranthacites "oryctanthusis" (informal from Jaramillo et al., 2014); 27) PachydermitesdiederixiGermeraad et al., 1968; 28) Paleosantalaceaepitescingulatus Jaramillo et al., 2010; 29) Rhoipites manausensis D’Apolito et al., 2019. ..... 64

Figura 24. Controle estrutural do curso inferior do Rio Negro, com destaque para as delimitações das depressões tectônicas (GPA, GCC, GCP e GLM) seguindo o padrão estrutural do estudo de Soares (2007). A seção A-B, obtida por imagem SRTM, mostra os aspectos topográficos e limites da depressão GPA. ..... 67

Figura 25. Feições de paleocanais do Rio Negro, entre os rios Jaú e Manacapuru (coloração marron) e no GPA (círculo) (Detalhe A, modificado de Rossetti et. al., 2023). Feições de paleocanal na região dos rios Jaú e Manacapuru, em imagem SRTM (Detalhe B, segundo Almeida-Filho et al., 2005). Indicação do paleocanal do Rio Negro no mapa da CPRM (2010) (círculo no Detalhe C). ..... 67

Figura 26. Análise química comparativa entre os sedimentos superficiais das depressões GPA (Depression 1), GCP (Depression 2), GCC (Depression 3), GLM (Depression 4). O detalhe A apresenta uma comparação entre os sedimentos do GPA (TS e TI), do GCP e GCC, o detalhe B compara os sedimentos do GPA (TS e TI) e do GLM e o detalhe Ccompara os sedimentos das 04 depressões. Fonte: Santos et al. (2015) ..... 68

Figura 27. Bloco diagrama esquemático ilustrando as etapas de desenvolvimento tectono-sedimentar do GPA, na zona de confluência dos rios Negro e Solimões..... 69

LISTA DE FIGURAS DO ARTIGO

Figure 1.Main structural lineaments and faults (inferred) with general direction NE-SW, NW-SE, and W-E that delimit the 04 tectonic depressions (GPA, GCC, GCP, and GLM) in the Negro and Solimões riversconfluence zone (Central Amazonia) ), with access by rivers and highways. The primary structural limits and nomenclature of depressions followed the pattern defined in the study by Soares (2007). …….……30

Figure 2.Geological map of the confluence zone of the Negro and Solimões rivers, highlighting Quaternary sedimentation associated with tectonic depressions (GPA, GCP, GCC, and GLM) and fluvial bars of the Solimões River, indicating the locations of the geochronological data (LOE), obtained in the present study, and data from papers by Soares et al. (2010), CPRM (2016), Ribas (2011) and Gonçalves Junior et al. (2016). The area delimitation of the quaternary units was based on the geological map of the studies by Soares (2007) and Soares et al. (2010). ……..31

Figure 3.Frequency histograms (A and C) and De graphs (B and D) of the age results obtained from the analyzes of collections carried out in the field. A) Age values of ST34A samples using the CAM model SAR protocol yielded an age value of 115,300 ± 5,300 years. B) Equivalent doses of sample ST34A. The line shows the De = 134.00 ± 5.44Gy and O.D. = 20% determined using the Central Age Model (CAM) C) age values of the ST12A sample using the MAM model SAR protocol which yields an age value of 102,200 ±9,700 years. D) Equivalent doses of the ST12A sample. The line shows the De = 84.17± 7.69Gy and O.D. = 40% determined using the Minimum Age Model (MAM). ……32

Figure 4.The panoramic section of the TS outcrop on the bank of the Igarapé Grande highlights the crest and depression morphology. Internally, the terrace comprises interbedded mud and sand (white dashed line) that define the bar-to-point EHI pairs. Details B and C indicate the sample collection sites (ST31A1 and ST31B1) in aluminum tubes for LOE dating. The location of the studied point (ST31) is on the map in figure 2. ……33

Figure 5.The panoramic section of the TS outcrop of the Igarapé Acajitubabank highlights the crest and depression morphology of the river bar, composed of successive intercalations of layers of sand and mud that form pairs of the EHI (black dashed line). Details A and B show the intercalations of sand and mud layers with the indication of the sample collection site (ST36A) for LOE dating. Detail D shows a flat-parallel lamination and fossilized leaf impression in the muddy layers. The location of the studied point (ST36) is on the map in Figure 2. ……..34

Figure 6.Panoramic section of the delta highlighting the lateral (Details A, B) and frontal (Detail C) parts at the Ariaú and Negro riversconfluence, indicating sampling collection sites for LOE (Details B, E). Internally, the unit is beige. It exhibits a massive muddy appearance (Detail B) and/or is stratified, with interspersed layers of sand and mud (Detail E). The studied points' locations (ST18 and ST19) are on the map in Figure 2. ……..35

Figure 7.Phases of the delta development on the lower terrace of the GPA. Changes in the area were measured over 19 years (2001 to 2020), considering a quota of 17 meters. ……...36

Figure 8.Panoramic section of a stretch of the GCP showing the rough and slightlyundulating contact between the quaternary deposits and silicified sandstones of the Neogene substrate. The surface exhibits a northward slope. The locationof the studied point (ST 82) is on the map in figure 2 ……37

Figure 9.Panoramic section of a stretch of the GCC showing the sudden and undulating contact between the Quaternary deposit and the Neogene unit, with the inclination of the substratum to NE. The locationof the studied point (ST 12) is on the map in figure 2. ……..37

Figure 10.Panoramic section of the GPC outcrop highlighting the EHI defined by intercalations of mud and sand layers (dashed black line), with thin and yellowish soil on top. Detail A shows the stratification between mud (top) and sand (bottom). Detail B shows the sampling location of sample collection for LOE dating. The locationof the studied point (ST 48) is on the map in Figure 2. …….38

Figure 11.Panoramic section of the outcrop, highlighting the slightly inclined plane of the EHI (Detail A). Details B and C show sampling locations for LOE dating in the sand layers. Details D and E show reddish paleosol with bioturbations (root marks-R, contraction cracks-C). The locationof the studied point (ST 07) is on the map in Figure 2. …… 39

Figure 12.Panoramic section of the GCC outcrop showing interbedded mud and sand layers (dashed black line). Detail A shows the boundaries of the bedding planes between sand and mud. Detail B shows crack planes (black dotted line) of metric length filled with mud. Detail C shows the sampling location of sample collection for LOE dating. The locationof the studied point(ST 12) is on the map in Figure 2. ……40

Figure 13.Panoramic section of the GCC outcrop shows the rhythmic intercalation of layers of mud and sand. Detail A shows the stratification defined by the intercalation of a layer of mud and sand with a thinning feature. Detail B indicates the location of sample collection for LOE dating. The locationof the sampled point (ST 13) is on the map in Figure 2. ……..41

Figure 14.Panoramic section through the GLM depression, showing the Quaternary deposits overlying ferruginous sandstones of the Neogene substrate. Detail A shows a thin intercalation of a layer of sand (dashed black line), yellowish in color, with an indication of the sampling collection site for LOE dating in the project by Ribas (2011). The locationof the sampled point (ST 81) is on the map in Figure 2. ……..43

Figure 15. Panoramic section of the branch of the Solimões River. Details A, B, and C show the predominance of muddy sediments indicating the location of sampling for LOE dating in a thin sand layer. Detail D shows elongated bioturbation tubes inserted into the muddy layer. The locations of the Points (ST 26, ST 27, and ST 29) are on the map in Figure 2. ……...44

Figure 16. Schematic block diagram illustrating the stages (1 to 3) of tectonic-sedimentary development of the GPA, GCC, and GCP in the confluence zone of the Negro and Solimões rivers. …….47

## LISTA DE TABELA DA DISSERTAÇÃO

Tabela 1 Tabela simplificada com dados interpretados das sondagens elétricas, em função da profundidade em metro (Pn) e resistividade elétrica em ohm.m (rn) das camadas geoelétricas (n=1, 2, 3, 4, 5 e 6). .....62

## LISTA DE TABELA DO ARTIGO

Table 1.Table of sample points dated by LOE, amount of aliquots used (N), sample scatter (O.D.), radioisotope concentration (Th, U, K), equivalent doses (De), annual dose rate (A.D.) and ages of GPA, GCP, GCC, and terrace of Rio Solimões (S.R.). …….32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO ..... 10
2. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO ..... 11
3. OBJETIVOS ..... 12
3.1. OBJETIVO GERAL ..... 12
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 12
4 GEOLOGIA REGIONAL ..... 13
4.1 FORMAÇÕES ALTER DO CHÃO E NOVO REMANSO ..... 13
4.2 DEPÓSITOS FLUVIAIS QUATERNÁRIOS ..... 14
4.3 CONTEXTO MORFO-TECTÔNICO. ..... 15
5 MATERIAS E MÉTODOS ..... 17
5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA. ..... 17
5.2 ANÁLISE DE PRODUTOS DE SENSORES REMOTOS ..... 17
5.3 LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO. ..... 18
5.4 COLETA E DESCRIÇÃO DE DADOS DE SUBSUPERFÍCIE ..... 18
5.5 COLETA DE DADOS GEOFÍSICOS E MODELAGEM 3D. ..... 19
5.6 ANÁLISES SEDIMENTOLÓGICAS, E ESTRATIGRÁFICAS ..... 21
5.7 ANALISE PALINOLÓGICA DE FUROS DE SONDAGEM ROTATIVA. ..... 22
5.8 DETERMINAÇÃO DA IDADE ABSOLUTA POR LOE ..... 23
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 25
6.1 CONTEXTO TECTÔNO-SEDIMENTAR SUPERFICIAL DAS DEPRESSÕES TECTÔNICAS DA ZONA DE CONFLUÊNCIA ENTRE OS RIOS NEGRO E SOLIMÕES (ARTIGO SUBMETIDO) ..... 25
6.2 CONTEXTOTECTÔNO-SEDIMENTAR DE SUB-SUPERFÍCIE DA DEPRESSÃO TECTÔNICA GPA ..... 52
6.2.1 EMBASAMENTO SEDIMENTAR NEÓGENO. ..... 53

6.2.2 PALINOLÓGIA DE FUROS DE SONDAGEM. 63
6.3 CONTEXTO ESTRUTURAL DAS DEPRESSÕES TECTÔNICAS 65
6.4 MODELO DEPOSICIONAL DO GPA, 68
7. CONCLUSÕES 70
8. REFERÊNCIAS 72

# 1. INTRODUÇÃO

A distribuição em área e caracterização estratigráfica-geocronológica das unidades sedimentares quaternárias da zona confluência dos rios Negro e Solimões tem sido discutida nos estudos de Soares et al. (2010); Gonçalves Júnior et al. (2017); Passos et al. (2020) e Tatumi et al. (2020). Nesta região, parte dos depósitos está confinada em quatro depressões tectônicas, de direção geral NW-SE, cuja origem está associada à ação de esforços distensionais de direção geral NE-SW, que ocorreram durante o Neomioceno-Plioceno (Soares, 2007; Soares et al., 2010). As depressões se desenvolveram sobre o embasamento sedimentar neógeno (Formação Novo Remanso) e foram denominadas informalmente de *hemigrábens* do Paraná do Ariaú (GPA), do Cacau do Pereira (GCP), da Cachoeira do Castanho (GCC) e do Lago do Miriti (GLM). A origem do preenchimento sedimentar das depressões sempre foi motivo para controvérsias, já que as interpretações prévias tinham como base os mapeamentos geológicos de superfície e dados localizados de sondagem a trado (CPRM, 2006; Soares, 2007; Soares et al., 2010). Portanto, nesse estudo, novos dados geocronológicos, geofísicos e sedimentológicos de furos de sondagem permitiram montar um arcabouço tecto-sedimentar para as depressões, em particular para o Graben do Paraná do Ariaú (GPA), considerado mais expressivo da região, com 34 km de comprimento e 18 km de largura. Internamente, O GPA apresenta dois níveis de terraços fluviais (Superior e Inferior) compostos de areia e lama (silte e argila) desenvolvidos em função da dinâmica meandrante do Rio Ariaú. Depósitos com a mesma constituição preenchem também as depressões GCC (aproximadamente 5 km de comprimento e 4 km de largura), GCP (aproximadamente 15 km de comprimento e 5 km de largura) e GLM (aproximadamente 4 km de comprimento e 2,5 km de largura). Na análise em subsuperfície do GPA, esse estudo utilizou dados geológicos e geofísicos inéditos, obtidos por meio de sondagens rotativa e levantamentos de eletrorresistividade. Os dados juntamente com dados de datação por LOE permitiram definir a evolução do preenchimento sedimentar, as fases de sedimentação e configuração do substrato da depressão, que exibe inclinação para E-NE, fundamentais para a elaboração do arcabouço tectono-sedimentar. O espessamento sedimentar e inclinação do substrato nessa direção mostram-se concordantes com as interpretações preliminares dos estudos regionais (Soares et al., 2010, Cesar, 2015; Cesar & Soares, 2015) e ratificam a interpretação de *hemigrábens*, proposta por Franzinelli & Igreja (2002), para a origem das depressões desta região. A integração das análises geocronológicas obtidas para os depósitos, particularmente do GPA,

abre perspectivas para o entendimento da dinâmica fluvial e sedimentação na zona de confluência dos rios Negro e Solimões, do Pleistoceno Superior ao Holoceno.

## 2. LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo está localizada na região de confluência entre os rios Negro e Solimões, Amazônia Central, abrangendo parte dos municípios de Manaus, Iranduba e Manacapuru. O acesso à área pode ser realizado por meio da rodovia AM-070 (Manaus/Manacapuru), AM-452 (Manaus/Iranduba) e por via fluvial, nos rios da região (Figura 1).

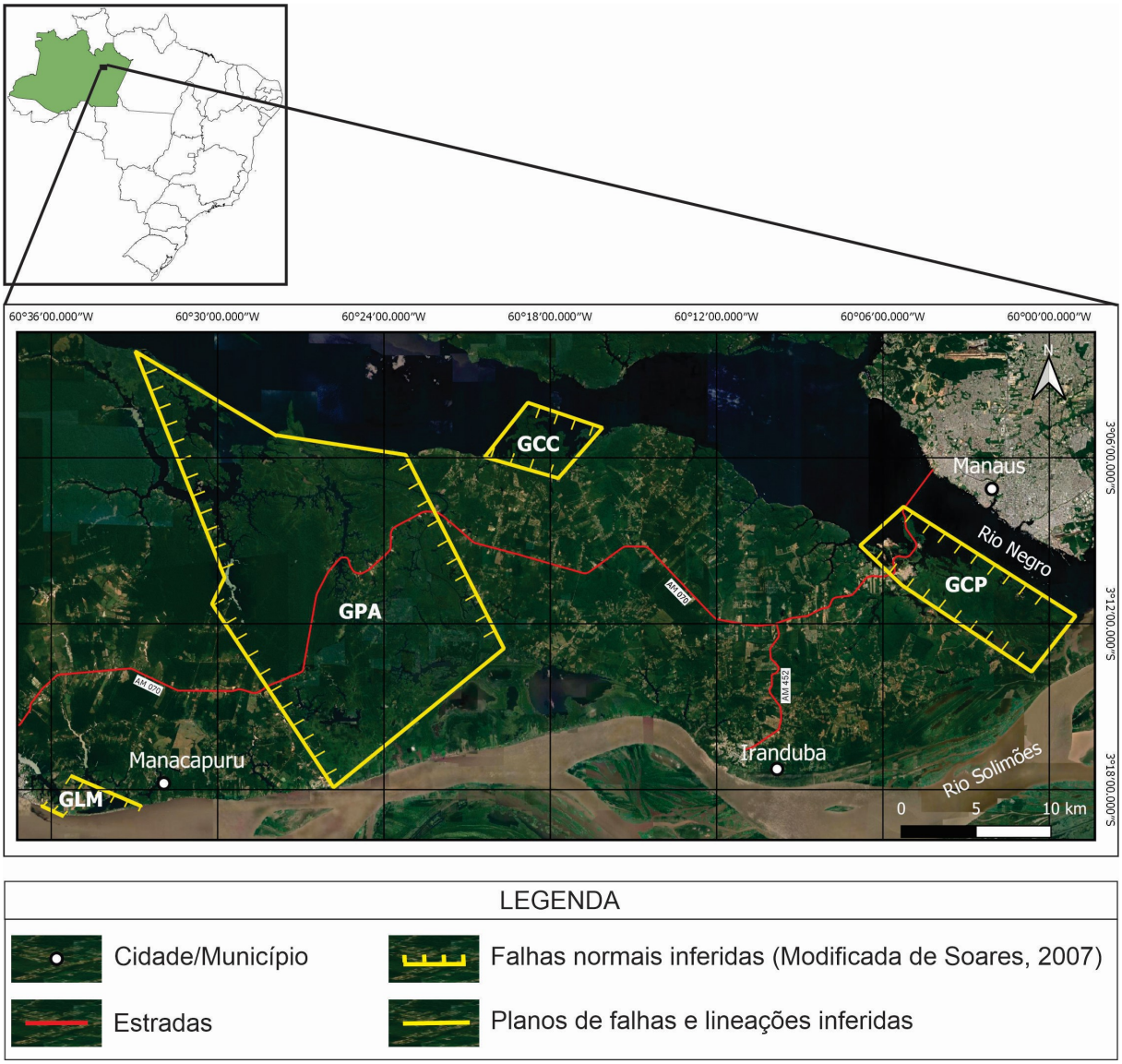



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo destacando os limites e falhas das quatro depressões tectônicas (GLM, GPA, GCC e GCP), definido por Soares (2007), com as vias de acesso por rodovias (AM 070 e AM 452) e os principais rios da região.

# 3. OBJETIVOS

## 3.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar de forma geomorfológica, geocronológica, sedimentológica e estratigráfica os depósitos sedimentares quaternários das depressões tectônicas da zona de confluência dos rios Negro e Solimões, Amazônia Central.

## 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

a) Mapear as unidades sedimentares quaternárias com base em critérios morfológicos, litoestratigráficos e geocronológicos;

b) Caracterizar sedimentológica e estratigraficamente os depósitos sedimentares das depressões tectônicas com base em dados de superfície (afloramentos) e sub-superficie (furos de sondagem rotativa, perfis litológicos de poços e levantamentos de Sondagem Elétrica Vertical);

c) Estabelecer a correlação espaço temporal dos depósitos sedimentares quaternários por meio de critérios sedimentológicos e estratigráficos (incluindo as superfícies limitantes), geocronológicos e palinológicos. Analise tectono-sedimentar das depressões tectônicas.

# 4 GEOLOGIA REGIONAL

A geologia regional da área de estudo é composta pelo embasamento geológico compostos pelas formações Alter do Chão e Novo Remanso, que apresentam evidências de processos neotectônicos e estão recobertos por sedimentos fluviais quaternários que foram depositados ao longo do tempo de acordo com a migração dos rios.

## 4.1 FORMAÇÕES ALTER DO CHÃO E NOVO REMANSO

O relevo da zona de confluência dos rios Negro e Solimões é sustentado por rochas silisiclásticas das formações Alter do Chão (Cretáceo) e Novo Remanso (Neógeno), recobertas por depósitos quaternários nos canais fluviais, áreas marginais e depressões tectônicas (Rossetti et al., 2005; CPRM, 2006 e 2016; Soares, 2007; Soares et al., 2010 e 2015).

A Formação Alter do Chão foi definida inicialmente por Kistler (1954), apresenta coloração avermelhada, amarelada e branca (CAPUTO, 1984), sendo constituída principalmente de depósitos de arenitos finos a médios, com níveis argilosos, cauliníticos, inconsolidados, contendo grânulos de seixos de quartzo esparsos, com estratificação cruzada e plano-paralela (SILVA et al., 2007). Internamente a formação exibe fácies de arenito silicificado, informalmente denominados de “Arenito Manaus” (ALBUQUERQUE, 1922). O desenvolvimento desta formação tem sido associado a um sistema fluvio-lacustre-deltaico (Kistler, 1954; Caputo et al., 1972; Dino et al., 1999 e 2000; Nogueira et al., 1999; Cunha et al., 2007), apesar de dados sedimentológicos e palinológicos (icnofósseis) de afloramentos nas proximidades de Manaus, indicarem paleoambiente deltaico de influência marinha dominado por ondas (Rossetti & Neto, 2006). Daemon& Contreiras (1971), baseado em dados palinológicos, posicionaram a Formação Alter do Chão no Meso-Albiano/Turoniano. Dino et al. (2000) subdividiu em duas sequências distintas: Inferior (Aptiano Superior-Albiano) e Superior, (Cenomaniano Superior).

Por décadas os depósitos arenosos avermelhados e mosqueados aflorantes na Bacia do Amazonas foram associados a parte superior da Formação Alter do Chão (Daemon & Contreiras, 1971; Caputo et al., 1972; Caputo, 1984; Cunha et al., 1994; Dino et al., 1999), até o reconhecimento de depósitos sedimentares pós-cretáceos na região entre Manaus e Itacoatiara, denominados informalmente de Formação Novo Remanso (Rozo et al., 2005). Somente com os estudos palinoestratigráficos de Dino et al. (2012) e Soares et al. (2015) essa

unidade pode ser posicionada no Mioceno Médio, sendo delimitada por paleossolos lateríticos. É constituída principalmente por arenitos, com pelitos e conglomerados subordinados, que representam fácies de canal, barra em pontal, planície de inundação e *crevasse splay* característicos de um paleosistema fluvial meandrante.

## 4.2 DEPÓSITOS FLUVIAIS QUATERNÁRIOS

Grande parte dos depósitos fluviais quaternários da zona de confluência dos rios Negro e Solimões ocorrem dispostos principalmente ao longo dos canais e áreas marginais, além de depressões tectônicas. O trecho do sistema fluvial Solimões-Amazonas, entre os tributários Purus e Madeira, apresenta o maior número de dados geocronológicos disponíveis, com a definição de três níveis de terraços fluviais quaternários (Superior, Intermediário e Inferior) (Latrubessi & Franzinelli, 2002; Rossetti et al., 2005; Soares et al., 2010; Gonçalves Júnior et al., 2017; Passos et al., 2020; Tatumi et al., 2020). Os terraços ocorrem discordantemente sobre o embasamento Neógeno, apresentam distribuição assimétrica em determinados trechos, dispostos em faixas alongadas, contínuas e subparalelas ao sistema de canais, sendo compostos principalmente por intercalações de camadas de lama (silte e argila) e areia, que definem pares da estratificação heterolítica inclinada (EHI). Os terraços exibem feições características da morfologia deposicional. O Superior, mais antigo, apresenta relevo dissecado com morros e colinas, o Intermediário e Inferior apresentam em geral relevo plano, com linhas de acresção de tamanhos e direções variadas, bem marcadas com suaves cristas e depressões e correspondem a maior parte da planície de inundação ativa desse sistema fluvial. As idades atribuídas aos terraços variam entre 240.000 a 51.000 anos para o Terraço Superior, de 37.000 a 19.000 anos para o Terraço Intermediário e 18.000 a 700 anos para o Terraço Inferior (Latrubesse & Franzinelli, 2002; Soares et al., 2010; Teixeira & Riker, 2010; Horbe et al., 2011; Fiore et al., 2014 e Gonçalves Jr et al., 2017).

Comparativamente, estudos geológicos-geocronológico relacionados a sedimentação quaternária do Rio Negro ainda são escassos, com destaque para os trabalhos de Soares et al. (2010), Barbosa (2015) e CPRM (2016) no trecho inferior desse rio. Soares et al. (2010) definiram as depressões tectônicas (GPA, GCP, GCC e GLM) que ocorrem na zona de confluência dos rios Negro e Solimões, com dados sobre os limites estruturais, falhas, fases de sedimentação e geocronologia. No GPA foram identificados dois níveis de terraços, denominados informalmente de Superior (TA1) e Inferior (TA2). O TA1 ocupa a porção

central e oeste do GPA, apresenta-se densamente vegetado, exibe relevo dissecado de cristas e depressões, com morfologia deposicional de linhas de acresção lateral, orientadas preferencialmente nas direções NW-SE e N-S (Soares, 2007). É constituído por intercalações de camadas de lama (silte e argila) e areia, os sedimentos lamosos são constituídos de sedimentos finos, argilo-siltosos, com coloração cinza, apresentando material orgânico em alguns níveis, com laminação plano-paralela e aspecto maciço, os sedimentos arenosos são compostos de camadas de areia fina de aspecto maciço com estratificação cruzada acanalada e compõe os pares da EHI. As idades obtidas nesta unidade variam entre 120.000±17.000 e 52.900±7.200 anos (Soares et al., 2010 e CPRM, 2016). O TA2 localiza-se na borda leste do GPA, confinado por rochas cretáceas-neógenas, acompanhando o atual curso do Paraná do Ariaú. Apresenta relevo plano, com suaves cristas e depressões, com feições morfológicas de linhas de acresção lateral. É constituído por sedimentos finos de planície de inundação associados a barras em pontal, apresenta intercalação de camadas de lama e areia associados a EHI. As camadas de areia são maciças e as camadas lamosa apresentam em partes laminação plano paralela e aspectos maciço. As idades obtidas nesta unidade variam entre 13.000 e 8.900 anos (Soares et al., 2010).

Barbosa (2015) e CPRM (2016) estudaram a sedimentação no Arquipélago de Anavilhanas, com a individualização de dois níveis de terraços fluviais, Superior (TFS) e Inferior (TFI). O TFS localiza-se na margem esquerda do Rio Negro, apresenta relevo ondulado com suaves cristas e depressões, sendo constituído por intercalações de camadas de areia (fina a média) e lama (silte e argila), que definem pares da EHI com idades entre 211.394 ± 29.300 anos a 69.988 ± 8.860 anos. O TFI é representado por cerca de 400 ilhas do arquipélago, sendo constituído principalmente de lama (silte e argila) com delgadas intercalações centimétricas de areia (muito fina a fina), com idade variando entre 2.558 ± 87 anos a 368 ±145 anos.

### 4.3 CONTEXTO MORFO-TECTÔNICO.

Processos de mudanças de curso, retilinização, gênese e extinção de canais fluviais na bacia amazônica, têm sido frequentemente estudados sob a ótica da neotectônica (Costa et al., 1996; Franzinelli & Igreja, 2002 e 2011a; Rossetti & Valeriano, 2007; Ibanez et al., 2014). Nesse contexto, Almeida Filho et al. (2005) sugerem que a zona de confluência entre os rios Negro e Solimões localizava-se a cerca de 70 km a oeste de Manaus, na atual confluência dos

rios Manacapuru e Solimões e a mudança do paleocurso do Rio Negro é associada a processos neotectônicos. Diversos estudos de contexto estrutural (Franzinelli & Igreja, 1990 e 2011a; Fernandes Filho et al., 1995; Franzinelli et al., 1999; Igreja et al., 1999; Silva et al., 2007; Igreja, 2012) definem a atuação de forças distensivas vinculada à movimentação das placas de Nazca e Caribeana ao longo dos últimos 24 milhões de anos, configurando o 'Sistema Neotectônico Transcorrente Dextral' (SNTD) na Amazônia. Associado a esse sistema, Costa et al. (1996) relatam a ocorrência dos padrões de drenagem retangular e angulado, desde a Colômbia até a zona de confluência entre os rios Negro e Solimões, associados a lineamentos NE-SW (compatíveis com as estruturas descritas para o SNTD) que são interligados entre si por falhas reversas NE-SW.

Na "atual" zona de confluência entre os rios Negro e Solimões, o SNTD possibilitou o desenvolvimento de *hemigrábens*, cuja conjugação de falhas normais e transcorrentes em ambas as margens do baixo curso do Rio Negro evidenciam uma estruturação distensiva oblíqua para NE (Costa et al., 1996). Em decorrência desta estruturação, Franzinelli et al. (1999) e Igreja et al. (1999) classificaram que os principais *trends* estruturais neotectônicos do sistema transcorrente amazônico podem ser sumarizados em cinco direções: Rio Solimões-N60W; Rio Negro-N45E; Rio Madeira-N50E; Rio Amazonas-WSW-ENE e Rio Tarumã-N10E.

Estudos mais específicos na região de ponta das lajes (Manaus), apresentados por Franzinelli et al. (1999), Igreja et al. (1999) e Franzinelli & Igreja (2011), os lineamentos tectônicos do SNTD foram correlacionados a origem das bacias romboédricas (g*raben*s) do Careiro (GDC), de Manaus (GDM) e da Ilha da Paciência (GIP), que registram a sedimentação quaternária da planície Amazônica, definem as direções dos últimos trechos dos rios, bem como a posição e amplitude do ângulo da união do encontro das águas dos rios Negro e Solimões.

# 5 MATERIAS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos deste estudo foram desenvolvidas as seguintes atividades:

## 5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.

Esta etapa compreende à análise de acervo bibliográfico em livros, periódicos, artigos e revistas sobre os assuntos de sedimentologia, estratigrafia, tectônica, estilos fluviais e geocronologia, permitindo a comparação com outras regiões sobre aspectos básicos, tais como: sedimentação fluvial quaternária, neotectônica, desenvolvimento de bacias, sedimentação quaternária e cenozoica na Amazônia, entre outros.

## 5.2 ANÁLISE DE PRODUTOS DE SENSORES REMOTOS

As técnicas e produtos de sensores remotos utilizados neste estudo visaram ressaltar os aspectos geomorfológicos, principalmente com base na textura, relevo e padrão de drenagem, fundamentais para a definição das unidades morfoestratigráficas quaternárias, bem como na elaboração do mapa geológico da área de estudo por meio de produtos digitais de sensores remotos, que são:

a) imagens Landsat (5,7 e 8), sensor OLI (*Operational Land Imager*) adquiridas gratuitamente no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S. GeologicalSurvey-USGS) a partir do mecanismo de pesquisa GLOVIS (http://glovis.usgs.gov/) na escala de 1:25.000;

b) imagens SRTM obtidas da EMBRAPA, com resolução de 1:250.000 (http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/download/am/am.htm);

c) imagens ALOS, sensor PALSAR (*PhasedArraytype L-band SyntheticAperture Radar*) adquiridas do IBGE, na escala de 1:25.000 (ftp://geoftp.ibge.gov.br/imagens_orbitais/ortoimagens/alos_palsar).

Com as imagens foram montados mosaicos gerando uma área única nos programas Global Mapper 10.1 e Qgis3, fazendo a manipulação da composição de cores com as bandas 654 e 543, que visa ressaltar a morfologia e topografia, conforme a metodologia aplicada por Rossetti & Valeriano (2007), Mantelli et al. (2009) e Hayakawa et al. (2010), sendo fundamentais na diferenciação das unidades sedimentares quaternárias.

## 5.3 LEVANTAMENTO DE DADOS EM CAMPO.

Foram realizados 07 trabalhos de campo entre setembro e dezembro de 2020 ao longo das rodovias e rios da região, durante o período de vazante, que permitiu a visualização e mapeamento das unidades geológicas por meio do levantamento de dados descritivos de 89 pontos com a confecção de seções (colunares e panorâmicas) e coleta sistemática de amostras para análises geocronológicas e granulométricas (Figura 2). Os trabalhos de campo desta dissertação foram financiados pelos projetos "Estudo Estratigráfico, sedimentológico, mineralógico e geoquímico dos depósitos argilosos do Pólo Oleiro Iranduba-Manacapuru, AM" (EDITAL Nº 002/2018-UNIVERSAL FAPEAM) e "Relação entre a dinâmica fluvial do Baixo Rio Negro com a diversidade de peixes" (EDITAL Nº 004/2017-PPP)




Figura 2. Levantamentos de campo ao longo das estradas e ramais secundários da região (Detalhes A e B), bem como descrição de afloramentos com coleta de amostras (Detalhes C e D).

## 5.4 COLETA E DESCRIÇÃO DE DADOS DE SUBSUPERFÍCIE

Foram realizados 04 furos de sondagem rotativa (motorizada) em locais pré-definidos dentro do GPA pela empresa "Amazon Angulus Serviços Geológicos" (Figura 3). Os furos apresentam profundidades de 6 m, 28 m, 46 m e 54m e os testemunhos, com diâmetro de aproximadamente 5 cm, foram armazenados em caixas de madeira no Laboratório de Sedimentologia do DEGEO-UFAM. A coleta e descrição geral seguiram a metodologia de Mendes & Borghi (2006), que considera diversos parâmetros litológicos, como a coloração, tipo de sedimento/rocha, granulometria, estruturas sedimentares, conteúdo fossilífero e feições biogênicas. Na definição da coloração foi utilizada a Carta de Cores (Munsell 1975), padronizada para análise de solos.




Figura 3. Furo de sondagem 1, na porção leste do GPA (sonda motorizada), com destaque para a coloração cinza dos sedimentos nas porções mais profundas (Detalhes A e B). Furo de sondagem 2 na porção central do GPA, destacando a coloração avermelhada dos sedimentos nas porções mais superficiais (Detalhes C e D).

## 5.5 COLETA DE DADOS GEOFÍSICOS E MODELAGEM 3D.

Na análise de subsuperfície foi também utilizada a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (arranjo Schlumberger) que consiste em introduzir uma corrente elétrica no subsolo determinando as resistividades a várias profundidades. O equipamento utilizado foi o TECTROL- Equipamentos Elétricos e Eletrônicos Ltda, modelo TDC 1000/12R2A, constituído de conjunto de resistivímetro/milivoltímetro e acessórios (incluindo eletrodos). Dois eletrodos (AB ou eletrodos de corrente) introduzem corrente elétrica no subsolo, enquanto outros dois (MN ou eletrodos de potencial) medem a diferença de potencial devido ao fluxo de corrente elétrica gerada, seguindo a disposição do equipamento proposta por Orellana (1982) (Figura 4). Foram realizadas 09 sondagens elétricas (SEV-1 a SEV-9) sob a coordenação da Prof. Dra. Jamile Dehaini (Universidade do Estado do Amazonas-UEA) (Figura 5), cujos dados foram trabalhados a partir dos modelos do software de domínio público IPI2 win (Universidade de Moscou/URSS), que permitiu a definição dos valores de resistividade elétrica entre as camadas geoelétricas de cada sondagem.

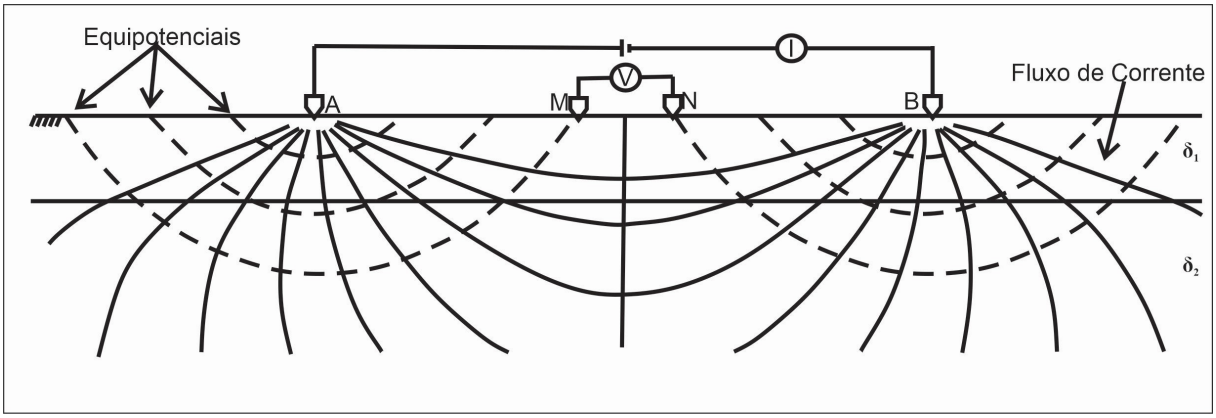



Figura 4. Modelo esquemático de disposição dos eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) para execução da SEV na área de estudo. Fonte: modificado de Orellana, 1982.




Figura 5. Execução de sondagens elétrica vertical ao longo da AM-070 nos limites internos do GPA, na borda oeste (Detalhes A e D), na borda leste (Detalhes B e C) e na porção central (Detalhe E).

Na elaboração do bloco diagrama tridimensional do GPA foram utilizados principalmente os dados de sondagem e de perfilagem elétrica obtidos neste projeto, bem como dados litológicos gerais de perfis litológicos de perfuração para água subterrânea, disponíveis no site do SIAGAS-CPRM (http://siagasweb.cprm.gov.br/). Foi necessário

elaborar o design de um modelo estrutural preliminar para incorporar todas as feições estruturais e estratigráficas dentro do volume. O procedimento foi realizado com a supervisão do prof. Dr. Luís Antônio Castillo López (UFAM) e envolveu a delimitação do modelo estrutural, delimitação de superfícies limitantes e planos de falhas, geração do *grid* estrutural e preenchimento das zonas. Foram utilizados os módulos empregados que correspondem aos softwares Opendtect e Petrel (Figura 6).

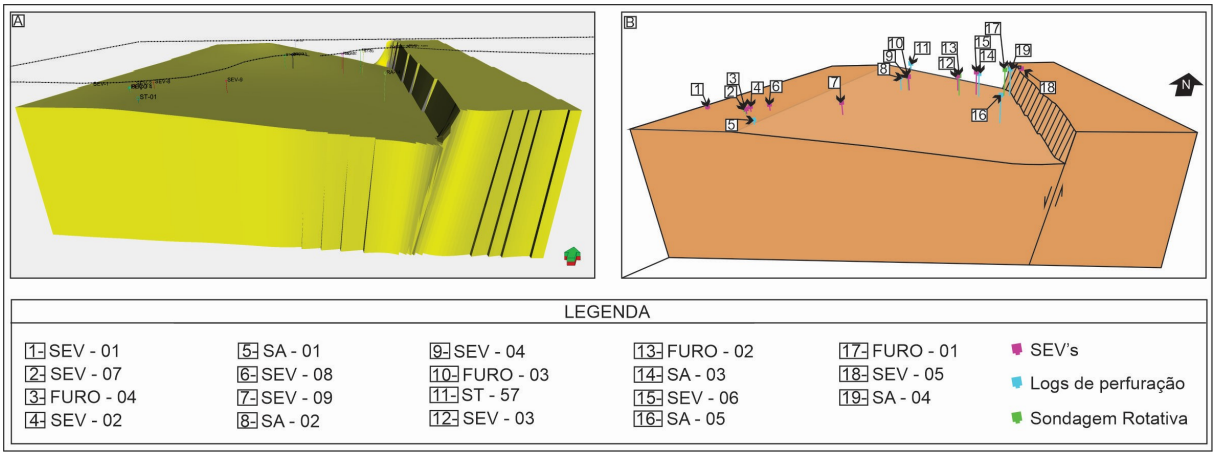



Figura 6. Blocos diagramas esquemáticos preliminares (3D) da depressão tectônica GPA elaborado a partir de informações litológicas de furos de sondagens, perfis litológicos de perfurações de poços e SEV's nos softwares Opendtect e Petrel, com indicação dos poços estudados (Poços 1 a 19) (A- imagem do programa Opendtect sem modificação e B- imagem trabalhada).

## 5.6 ANÁLISES SEDIMENTOLÓGICAS, E ESTRATIGRÁFICAS

Foram confeccionadas 30 seções panorâmicas e 4 seções colunares dos afloramentos analisados, com a identificação da granulometria, estruturas sedimentares, conteúdo fossilíferos e relações de contato, fornecendo dados para a elaboração do arcabouço estratigráfico da área de estudo.

As analises granulométricas foram realizadas pelo método convencional (peneiramento) e pelo granulômetro a laser. A primeira foi realizada no Laboratório de Sedimentologia do DEGEO/UFAM, nas frações: menor que 0,0062 mm, 0,0062-0,125 mm; 0,125-0,250 mm e maior que 0,250 mm (Figura 7, A). Os resultados da granulometria a laser foram obtidos por meio do PIBIC (PIB-E/0146/2015), cujo processo consistiu na desagregação e quarteamento prévio das amostras, onde 20 gramas de cada amostra foi imersas em 50 ml de hidróxido de Sódio (NaOH) (Figura 7, B) ficando em repouso por 12h para a dispersão do material. Posteriormente, as amostras foram peneiradas no intervalo de 0,125 mm e usadas no equipamento MALVERN (Figura 7, C) do Laboratório de Análises Granulométricas da CPRM (Serviço geológico do Brasil – AM). Posteriormente, as amostras

foram processadas no equipamento MALVERN que determina o volume das partículas a partir da emissão de foto emissões, deduzindo o seu raio, processando essas informações no banco de dados.

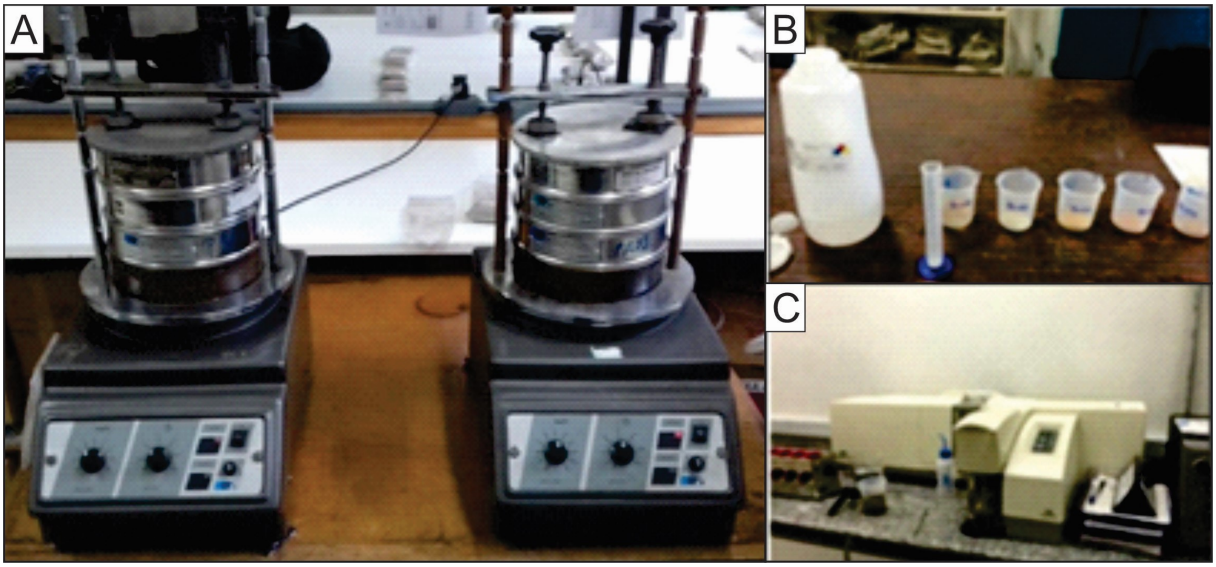



Figura 7. (A) Peneiramento por meio do agitador de peneiras BERTEL em intervalos granulométricos (menor que 0,0062 mm, 0,0062 a 0,125 mm; 0,125 a 0,250 mm e maior que 0,250mm). (B) Solução de NaOH utilizado na preparação das amostras. (C) Granulômetro a laser modelo MALVERN.

## 5.7 ANALISE PALINOLÓGICA DE FUROS DE SONDAGEM ROTATIVA.

Os poços Furo 1 e Furo 3 foram amostrados para análises palinológicas. Do Furo 1, três profundidades perto do topo foram amostradas, e do Furo 3 outras três amostras próximas da profundidade 33m. Foram escolhidos sedimentos de granulometria fina, com evidência de matéria orgânica. O processamento de laboratório foi feito com técnicas padrão de dissolução ácida, bateamento e peneiramento (Riding, 2021). Usou-se Fluoclor em substituição ao ácido fluorídrico (Antonioli et al., 2020). Os resíduos orgânicos foram montados em lâminas de vidro para microscopia óptica usando Entellan® e analisados em um Leica DM300; fotomicrografias foram feitas com uma câmera Canon EOS Rebel t5 em um microscópio Zeiss AxioPlan 2. Os palinomorfos foram contados com o objetivo de atingir um mínimo de 300 pólen e esporos. As identificações seguiram trabalhos palinológicos regionais (Silva-Caminha et al., 2010; Leite et al., 2021; D'Apolito et al., 2021; Jaramillo and Rueda 2021). As lâminas produzidas sob a responsabilidade do palinólogo Carlos D'Apolito Júnior (Universidade Federal do Acre- UFAC), posteriormente foram tombadas na coleção de palinologia do Laboratório de Paleontologia e Palinologia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá-MT, Brasil.

## 5.8 DETERMINAÇÃO DA IDADE ABSOLUTA POR LOE

A luminescência é umas das propriedades físicas de materiais cristalinos ou vítreos de emitir luz em resposta a algum tipo de estímulo externo, nesse caso estímulo óptico, quando submetidos no passado por radiações ionizantes (Sallun et al., 2007). Este método é embasado no fato de que as idades dos materiais podem ser calculadas pelas medidas da concentração de efeitos induzidos nos materiais por radiação, incluindo também a taxa de dose de radiação no ambiente de deposição e o nível e sensibilidade de saturação do sinal de luminescência (Shelkoplyas & Morozov, 1965; Prescott & Robertson, 1997; Murray & Wintle, 2000; Wintle & Murray, 2006). Alguns materiais geológicos e arqueológicos que apresentam minerais como quartzo, feldspato, fluorita e calcita, assim como também fragmentos de cerâmica, recebem radiações do sol e de isótopos radioativos providos dos solos circunvizinhos, cuja atuação provoca ionização que é armazenada no retículo cristalino destes minerais. Quando um cristal iônico é submetido à radiação ionizante parte da energia gera defeitos pontuais, resultando na apreensão de elétrons e lacunas localizadas no interior da sua rede cristalina, originando estados metaestáveis criados por defeitos e impurezas. Após o estímulo óptico dos elétrons aprisionados, eles são liberados podendo ser recombinado com defeitos da rede cristalina, gerando a luminescência, que permite determinar a última fase de cristalização de um mineral ou etapa final de sedimentação, que indica a última exposição dos grãos à luz solar (Moska & Murray, 2006; Sallun et al., 2007; Pietsch et al., 2008; Rittenour, 2008). Este método tem uma abrangência temporal de até 1,5 Ma (Sallun et al., 2007).

As amostras foram coletadas nas camadas mais arenosas, em tubos de alumínio com aproximadamente 30 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro, sendo que as extremidades dos tubos foram lacradas com papel alumínio e fita adesiva sendo devidamente identificadas (Figura 8). As amostras foram tratadas no Laboratório de Datação e Dosimetria na Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), sob a responsabilidade da Dra. Sônia HatsueTatumi. Na datação foi utilizado doses equivalentes (De) determinadas pelo protocolo de dose regenerativa de alíquota única (SAR), e foram usados 3 modelos (CAM, FMM e MAM). Os modelos de idade central (CAM) e de mistura finita de idade (FMM), foram utilizados para amostras cuja dispersão (OD) foi menor que 30%, para as amostras cuja OD foi maior que 30%, o modelo utilizado foi o de Idade Mínima (MAM).

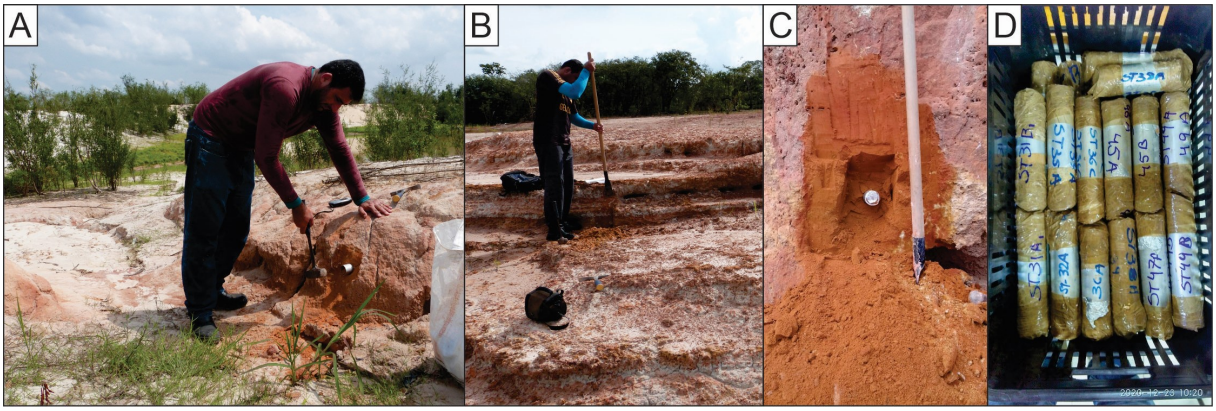



Figura 8. Coleta de amostras (Detalhes A, B e C) nas camadas arenosas, com auxílio de martelo, marreta, ferro de cova e tubo de alumínio. O detalhe D mostra o armazenamento em tubo de alumínio com as extremidades lacradas com papel alumínio e fita adesiva.

# 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Novos dados geológicos-geocronológicos-geofísicos da zona de confluência dos rios Negro e Solimões permitiram definir um contexto tectono-sedimentar de superfície e subsuperfície para as depressões tectônicas da área de estudo (Figura 9). Essas depressões foram definidas primeiramente nos estudos de Soares (2007) e Soares et al. (2010) e se destacam como importantes feições estruturais regionais, cuja evolução tem sido associada a eventos neotectônicos que influenciaram a dinâmica fluvial e a última fase de sedimentação da Bacia do Amazonas. No contexto geológico local, as depressões se desenvolveram sobre o embasamento sedimentar Neógeno e exibem formas e tamanhos variados, sendo denominadas informalmente de GPA, GCP, GCC e GLM (Figura 9).

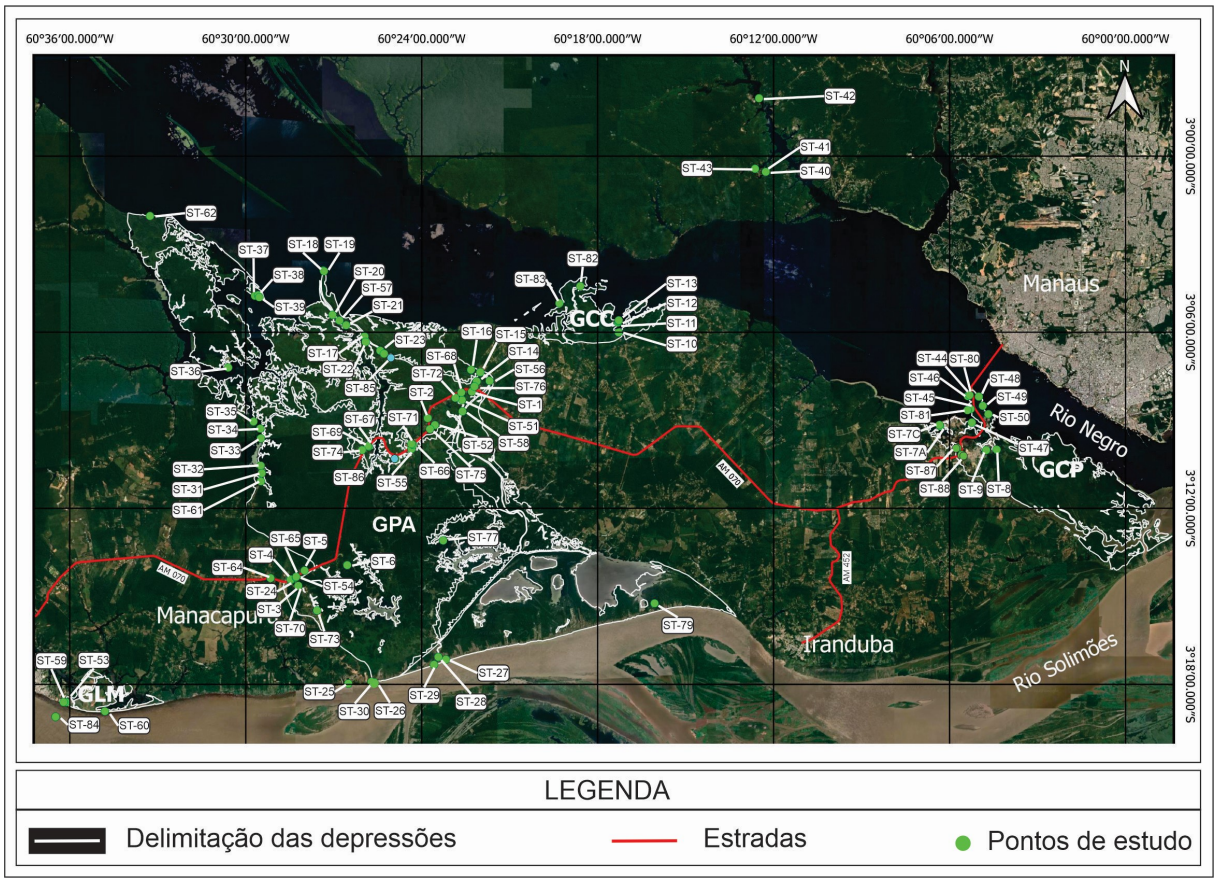
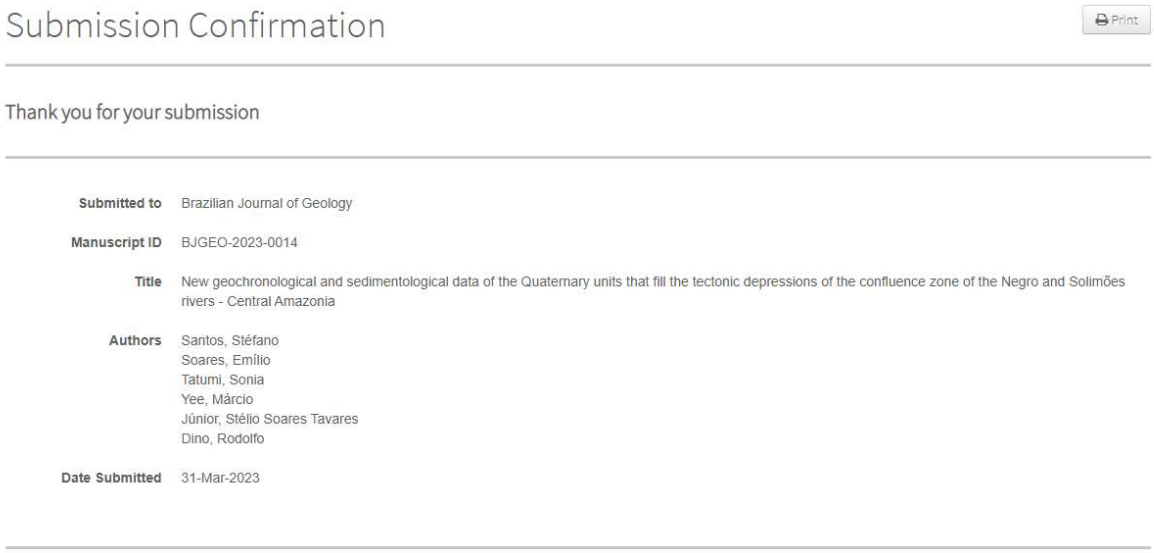



Figura 9. Mapa de localização da zona de confluência dos rios Negro e Solimões, com os limites externos das depressões tectônicas GPA, GCP, GCC e GLM (linha branca)e indicação dos locais estudados (89 pontos, Siglas ST). Acesso a região por rodovia e rios

## 6.1 CONTEXTO TECTÔNO-SEDIMENTAR SUPERFICIAL DAS DEPRESSÕES TECTÔNICAS DA ZONA DE CONFLUÊNCIA ENTRE OS RIOS NEGRO E SOLIMÕES (ARTIGO SUBMETIDO)



Submission Confirmation

Print

Thank you for your submission

| | |
|---|---|
| Submitted to | Brazilian Journal of Geology |
| Manuscript ID | BJGEO-2023-0014 |
| Title | New geochronological and sedimentological data of the Quaternary units that fill the tectonic depressions of the confluence zone of the Negro and Solimões rivers - Central Amazonia |
| Authors | Santos, Stéfano<br>Soares, Emílio<br>Tatumi, Sonia<br>Yee, Márcio<br>Júnior, Stélio Soares Tavares<br>Dino, Rodolfo |
| Date Submitted | 31-Mar-2023 |

New geochronological and sedimentological data of the Quaternary units that fill the tectonic depressions of the confluence zone of the Negro and Solimões rivers - Central Amazonia

Stefano de Mello Antonaccio Santos[1], Emílio Alberto Amaral Soares[1], Sonia Hatsue Tatumi[2], Márcio Yee[2], Stélio Soares Tavares Júnior [3], Rodolfo Dino[4]

[1] Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, Brasil.

[2] Universidade Federal de São Paulo, Santos, SP, Brasil.

[3] Universidade Federal de Roraima, Roraima, RR, Brasil.

[4] Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Correspondingauthor*.

E-mail addresses: antonaccioss@hotmail.com (S. M. A. Santos) * easoares@ufam.edu.br (E.A.A. Soares), sonia.tatumi@unifesp.br (S.H. Tatumi), márcio.yee@unifesp.com (M. Yee), stelio.tavares@ufrr.br (S. S. T. Júnior), dinouerj@gmail.com (R. Dino)

Summary

In the confluence zone of the Negro and Solimões rivers, Central Amazonia, Quaternary fluvial terrace deposits fill 04 tectonic depressions that preserve information about the tectonic-sedimentary evolution of this portion of the Amazon. The depressions, informally designatedgrabens of Paraná do Ariaú (GPA), Cacau do Pereira (GCP), Cachoeira do

Castanho (GCC), and Lago do Miriti (GLM), developed on the Neogene sedimentary substratumand have the genesis associated with neotectonic movements that occurred in Central Amazonia in the Late Miocene-Pliocene. Structural lineaments and faults with a general NW-SE and NE-SW direction control stretched the Negro and Solimões rivers, as well as delimited the tectonic depressions and conditioned the sedimentation of the river terraces. The general correlation of the studied terrace units was mainly based on 27 geochronological dates using the Optically Stimulated Luminescence (OEL) method since the units present similar lithology, being constituted mainly by mud (silt and clay) and sand, in different proportions, which sometimes make up pairs of inclined heterolytic bedding (EHI). In the GPA, the most expressive depression in the area, two units of river terraces were identified, inactive (upper) and active (lower), deposited between 261,800 - 52,900 years and 13,000 - 1,340 years, respectively. The terraces present an asymmetrical distribution, evidenced by the difference in height and dissection of the relief and the depositional morphology of accretionary bars migrating to E-NE deposited by the Ariaú River, which characterize the half-graben feature. In the less expressive depressions, GCP, GCC, and GLM, only one inactive fluvial terrace unit was identified, deposited by smaller river systems, in the time interval from 303,000 to 25,732 years, therefore being temporally equivalent to the initial development of the GPA.
Keywords: Graben; Continental Quaternary Sedimentation; Amazon Basin; Optically Stimulated Luminescence; Neotectonics.

## 1. Introduction

In recent decades, more extensive sedimentological, stratigraphic, and geochronological studies have been carried out in the Solimões-Amazonas fluvial system, especially between the Purus and Madeira tributaries, defining continuous levels of fluvial terraces. In the Negro and Solimões rivers confluence zone, data are particularly sparse and restricted to the Pleistocene-Holocene terraces that fill tectonic depressions and can maintain records of Quaternary tectonic-sedimentary evolution and fluvial dynamics (Soares et al., 2010; CPRM, 2016; Gonçalves Jr. et al., 2017; Passos et al., 2020 and Tatumi et al., 2020). Informally called grabens of Paraná do Ariaú (GPA), Cacau do Pereira (GCP), Cachoeira do Castanho (GCC), and Lago do Miriti (GLM) by Soares (2007), the depressions analyzed have their genesis associated with the reactivation of tectonic faults, and action of tensional efforts (NW-

SE and NE-SW) that occurred during the Late Miocene-Pliocene on siliciclastic rocks of the Alter do Chão and Novo Remanso formations (Fernandes Filho et al., 1995; Franzinelli&Igreja, 2002; Soares et al., 2010).

In the present study, radar data (SRTM and AlosPalsar) and satellite imagery (Sentinel and Landsat) allowed inferences to be made about the significant structural lineaments and faults that bound such depressions, defining phases of sediment recharge and correlation by integrating sedimentologic, stratigraphic, and geochronologic (LOE) data. The initial opening of depressions was associated with neotectonic events that occurred in Central Amazonia about 427,000 years ago (Soares et al., 2010). Internally, based on geochronological data (LOE) from this study and regional works (Ribas, 2011; Soares et al., 2010 and CPRM, 2016), the sedimentary fill of the ancient terrace unit was placed in the time interval of 303,900 and 25,732 years. Currently, these terraces are inactive and subject to degradation and erosion because they are cut off from the current bars of the Solimões River, dated between 36,000 and 1,540 years ago. Only on the lower terrace of the GPA is sedimentation still active, characterized by the deposition of bars and deltaic degradation that began about 13,000 years ago and continues until recent times.

## 2. Regional geology

The origin of the tectonic depressions of the Negro and Solimões rivers in the confluence area is related to the reactivation of ancient faults with general directions NW-SE and NE-SW, which were subjected to extensional movements during the Late Miocene-Pliocene(Fernandes Filho et al., 1995; Franzinelli&Igreja, 2002; Soares et al., 2010). Temporal geochronological data (LOE) allowed to position the main opening event at about 427,000 years, leading to the formation of 04 depressions informally called the Paraná do Ariaú (GPA), Cacau do Pereira (GCP), Cachoeira do Castanho (GCC) and Lago do Miriti (GLM) rifts, aligned in the general direction NW-SE (Soares, 2007; Soares et al., 2010). However, Franzinelli&Igreja (2002) defined these depressions as hemi-grabens derived from normal northeast dipping faults. The sedimentary fill in the depressions is relatively homogeneous. It consists mainly of muddy deposits (silt and clay) with intercalations of sand layers (fine) in varying proportions, sometimes forming pairs of oblique heterolytic intercalations (EHI). The GPA is more expressive, with a length of about 30 km, a width of 18 km, and a thickness of 10 to 20 m, and includes 02 levels of fluvial terraces on the Ariaú River (Soares, 2007). The Upper

Terrace (TS) occupies the western part of the GPA, is located at 28 to 40 m, and is between 120,000 and 65,000 years old. In contrast, the Lower Terrace (TI) is located in the eastern part, is arranged at 24 to 28 m, and is between 13,000 and 8,900 years old (Soares et al., 2010; CPRM, 2016; Tatumi et al., 2020). The GCP (15 km long and 4 km wide), GCC (5 km long and 4 km wide), and GLM (reduced extent) have sediment thicknesses that vary between 4 and 15 m, with surface levels between 26 and 29mand ages between 69,700 and 44,700 years. Fluvial terrace deposits have also been defined downstream of the depressions in the Anavilhanas Archipelago, consisting of muddy (silt and clay) with sandy interbeds of Pleistocene-Holocene age (Barbosa, 2015; CPRM, 2016). Despite the relative stability of the Rio Negro channel embedded in the structural alignments of NW-SE, neotectonic paleochannel features have been defined in the lower path of this river, which includes the boundaries of the GPA (Almeida Filho et al., 2005; Almeida Filho & Miranda, 2007; Rossetti et al., 2023).

In the plain of the Solimões River, between the Purus and Madeira tributaries, three elongated and continuous strips of river terraces were defined (Upper - TS, Intermediate - TI, and Lower-TInf), subparallel to the primary channel system of this river (Soares, 2007; Soares et al., 2010; Gonçalves Jr. et al., 2016; Passos et al., 2020 and Tatumi et al., 2020). In general, the terraces present a depositional morphology with lateral accretionary lines. They are composed of sand and mud (silt and clay) in different proportions that define EHI pairs characteristic of the meandering fluvial style. The TS has an age between 240,000 and 51,000 years, the TI between 37,200 and 19,100 years, and the TInf between 18,300 and 730 years.

## 3. Materials and methods

The study area's main geomorphological and structural features were determined using radar imagery (SRTM and AlosPalsar) and satellite images (Sentinel and Landsat 5, 7, and 8) with spatial resolution up to 12 m and combined with on-site geological mapping. The images were processed in 654 and 543 color compositions in QGIS software employing the methods of Crósta (1993), Quartaroli&Batistella (2005), and Rosa (2009) to highlight geological features and facilitate visual identification between soil, vegetation, and water. The mapping was carried out between September and December 2020. It consisted of describing outcrops, focusing on lithological and structural aspects, and a systematic collection of 27 samples for dating by LOE. Samples were collected in aluminum tubes 30 to 50 cm long and 5 cm in

diameter and then analyzed at the Laboratory of Dating and Dosimetry (LDD, UNIFESP). The protocol SAR (Single Aliquot Regeneration, Murray and Wintle, 2000) was used for the analysis with 07 to 27 aliquots (~3mg) for each sample. The final determination of equivalent dose (De) was made using the central age model (CAM) and the minimum age model (MAM) and using the "radial plot" when the scatter (OD) of De was less than 30%. CAM and MAM were applied for OD greater than 30%. Prior to the LOE measurements, the samples were sieved into a fraction of about 100 μm, then treated with hydrogen peroxide ($H_2O_2$) and hydrochloric acid (HCl) and treated with hydrofluoric acid (HF) to remove organic matter and carbonates, to eliminate the thin film around the grains, and to eliminate ionization by α-radiation and fluorides that may have grown with the HCl bath. Subsequently, the quartz and feldspar grains were separated by density by immersing them in sodium polytungstate (SPT) liquid, following the methodology of Lomax et al. (2007) and Soares et al. (2010). This study included 05 unpublished geochronological data obtained by the LOE method in the Gamma and Luminescence Spectrometry Laboratory (LEGAL, USP) and funded by the CNPq-014/2011 Universal Project (Ribas, 2011).

## 4. Results

### 4.1. Morphostratigraphic Units

The geomorphological analysis used the color composition (654 and 543) of the radar and satellite images based on the depositional morphology of the river terraces and relief features, integrated with geochronological data from LOE and geological mapping in the confluence area of the Negro rivers and Solimões. 04 tectonic depressions were analyzed, which represent the largest outcropping structural features in the region, which exhibit rectilinear limits and are parallel to the main photo-interpreted structural lineaments and fault planes individualized in the field, preferably oriented in NE-SW, NW-SE, and W-E directions (Fig. 1). The depressions were laid out on the Neogene sedimentary basement and were informally called grabens of Paraná do Ariaú (GPA), Cacau do Pereira (GCP), Cachoeira do Castanho (GCC) and Lago do Miriti (GLM) by Soares ( 2007) and Soares et al. (2010). This informal structural designation is also utilized in this study.

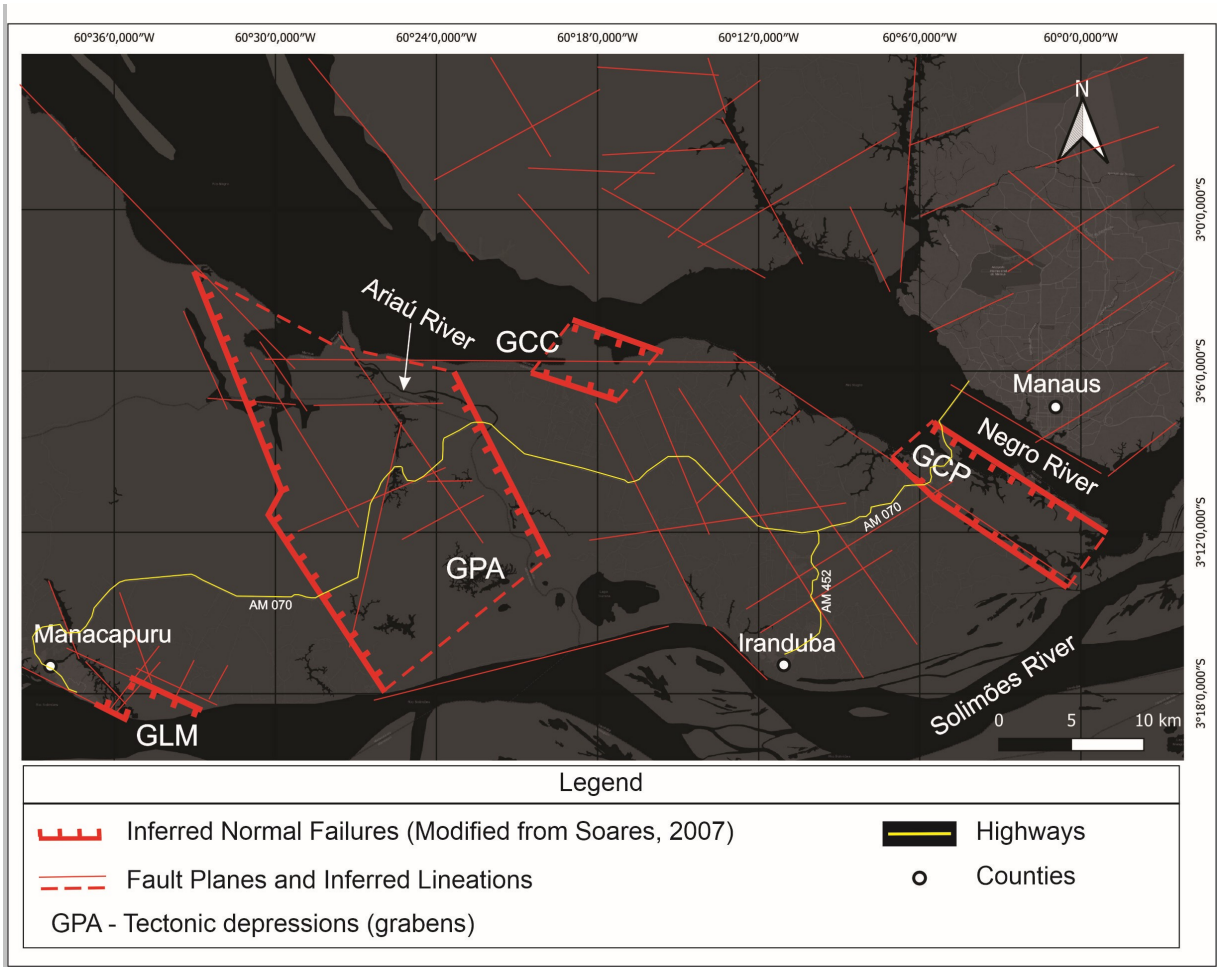



**Figure 1.**Main structural lineaments and faults (inferred) with general direction NE-SW, NW-SE, and W-E that delimit the 04 tectonic depressions (GPA, GCC, GCP, and GLM) in the Negro and Solimões riversconfluence zone (Central Amazonia) ), with access by rivers and highways. The primary structural limits and nomenclature of depressions followed the pattern defined in the study by Soares (2007).

## 4.2. Neogene sedimentary basement

The Neogene sedimentary cover of Central Amazonia is mainly represented by siliciclastic rocks from the Novo Remanso Formation (Miocene), according to the lithostratigraphic context proposed by Dino et al. (2012) and Soares et al. (2015). The unit is generally located at 50 to 100 meters above sea level, presenting dissected relief characterized by hills and plateaus supported by ferruginous lateritic profiles and yellow latosol. Lithologically, it consists of sandstones, pelites, and conglomerates, pink to reddish, discordantly covered by Quaternary sediments in the recessed areas of the tectonic depressions.

## 4.3. Graben do Paraná Ariaú (GPA)

The GPA is the most expressive tectonic depression of the region, about 34 km long and 18 km wide. It includes 02 levels of fluvial terraces, an upper (TS) and a lower (TI), with asymmetrical distribution for E-NE. The 27 geochronological data obtained in this study, integrated with those defined by Soares et al. (2010) and CPRM (2016), allowed to define age intervals for TS and TI between 261,800 to 52,900 years and 13,000 to 1,340 years, respectively (Figs. 2 and 3, Tab. 1). In the studied outcrops it was not possible to define the thickness of the terraces, being estimated in the central portion of the GPA around 10 to 20 m (Soares, 2007) to 37 m (Cesar, 2015).

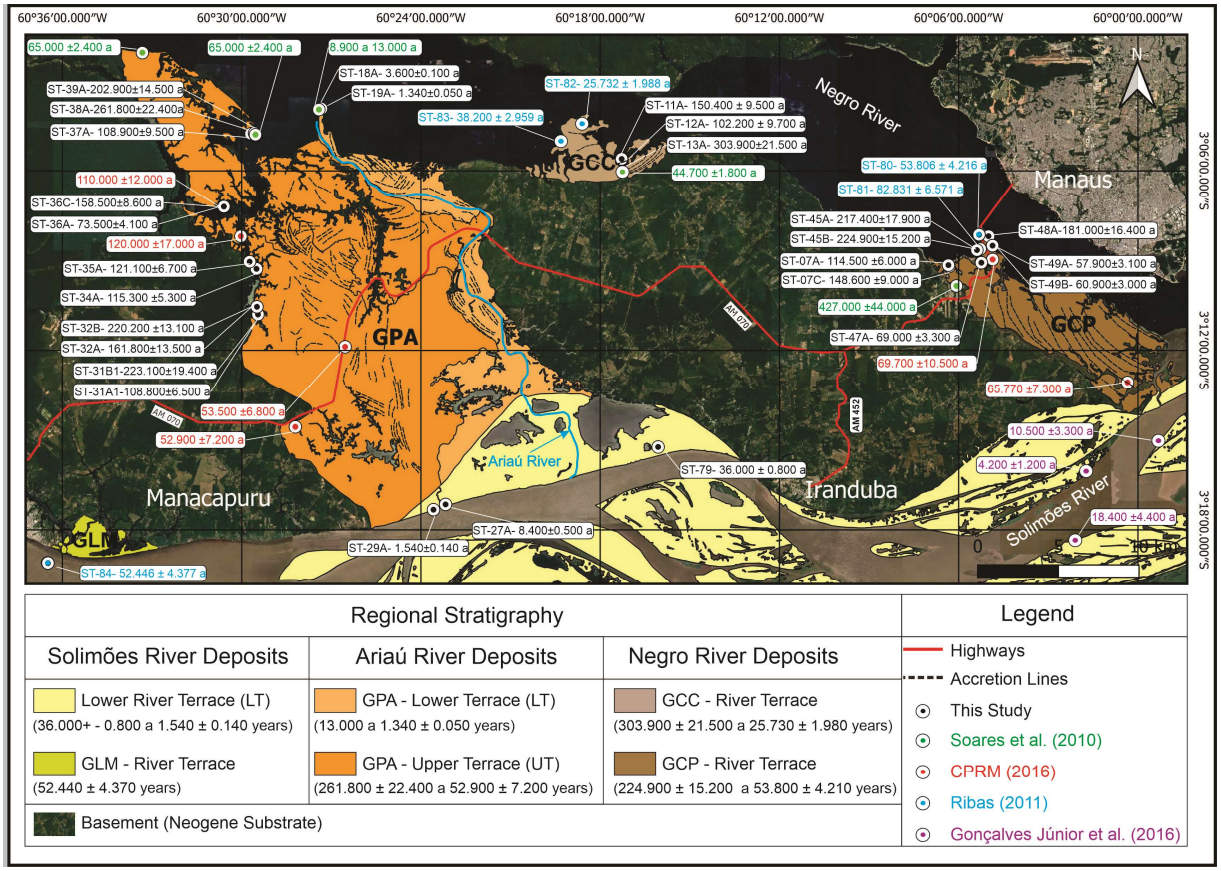



**Figure 2.**Geological map of the confluence zone of the Negro and Solimões rivers, highlighting Quaternary sedimentation associated with tectonic depressions (GPA, GCP, GCC, and GLM) and fluvial bars of the Solimões River, indicating the locations of the geochronological data (LOE), obtained in the present study, and data from papers by Soares et al. (2010), CPRM (2016), Ribas (2011) and Gonçalves Junior et al. (2016). The area delimitation of the quaternary units was based on the geological map of the studies by Soares (2007) and Soares et al. (2010).

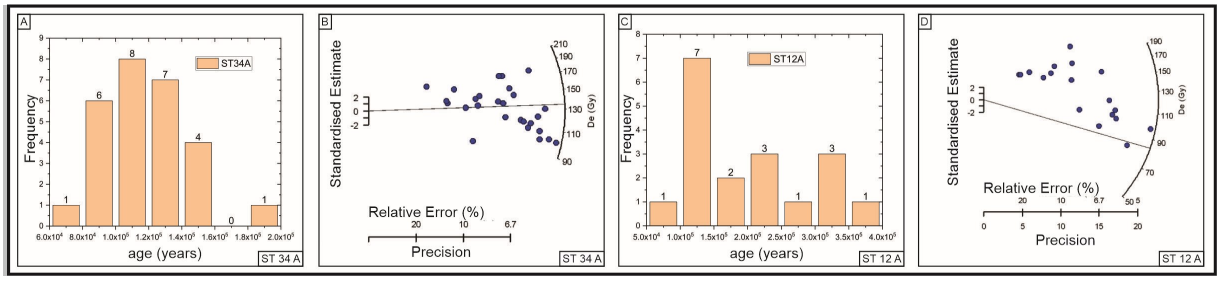



**Figure 3.**Frequency histograms (A and C) and De graphs (B and D) of the age results obtained from the analyzes of collections carried out in the field. A) Age values of ST34A samples using the CAM model SAR protocol yielded an age value of 115,300 ± 5,300 years. B) Equivalent doses of sample ST34A. The line shows the De = 134.00 ± 5.44Gy and O.D. = 20% determined using the Central Age Model (CAM) C) age values of the ST12A sample using the MAM model SAR protocol which yields an age value of 102,200 ±9,700 years. D) Equivalent doses of the ST12A sample. The line shows the De = 84.17± 7.69Gy and O.D. = 40% determined using the Minimum Age Model (MAM).

**Table 1.**Table of sample points dated by LOE, amount of aliquots used (N), sample scatter (O.D.), radioisotope concentration (Th, U, K), equivalent doses (De), annual dose rate (A.D.) and ages of GPA, GCP, GCC, and terrace of Rio Solimões (S.R.).

| Sample | N | OD % | Th (ppm) | U (ppm) | K (%) | De (Gy) | AD | Age (Years) CAM / MAM* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GPA-ST18A | 8 | 40 | 9.91±0.41 | 2.41±0.12 | 1.58±0.05 | 8.93±0.19 | 2475±44 | 3.600±0.100* |
| GPA-ST19A | 8 | 8,6 | 9.86±0.39 | 2.05±0.11 | 1.45±0.05 | 3.09±0.11 | 2309±42 | 1.340±0.050 |
| GPA-ST31A1 | 11 | 15,7 | 4.58±0.21 | 1.18±0.07 | 0.22±0.01 | 97.87±5.26 | 899±24 | 108.800±6.500 |
| GPA-ST31B1 | 9 | 22,4 | 4.89±0.22 | 1.74±0.09 | 0.14±0.01 | 203.44±17.0 | 912±21 | 223.100±19.400 |
| GPA- ST32A | 11 | 25,7 | 5.46±0.24 | 1.74±0.09 | 0.21±0.01 | 157.24±12.63 | 972±22 | 161.800 ± 13.500 |
| GPA- ST32B | 11 | 24 | 4.24 ± 0.18 | 1.18 ± 0.07 | 0.31 ± 0.01 | 183.45 ± 10.18 | 833 ± 18 | 220.200 ± 13.100 |
| GPA- ST34A | 27 | 20 | 6.19 ± 0.26 | 2.23 ±011 | 0.17 ± 0.01 | 134.00 ± 5.44 | 1162 ± 26 | 115.300 ± 5.300 |
| GPA- ST35A | 10 | 6,4 | 4.40±0.2 | 1.55±0.08 | 0.13±0.01 | 109.10 ±5.30 | 901±24 | 121.100±6.700 |
| GPA- ST36A | 7 | 27,6 | 6.19±0.26 | 1.68±0.09 | 0.39±0.02 | 81.45 ±9.59 | 1101±25 | 73.500±4.100 |
| GPA- ST36C | 7 | 9,1 | 5.87±0.25 | 2.08±0.11 | 0.30±0.02 | 182.39±9.00 | 1151±25 | 158.500 ± 8.600 |
| GPA- ST37A | 25 | 34 | 3.77 ± 0.17 | 1.04 ± 0.06 | 0.07 ± 0.01 | 74.48 ± 6.13 | 684 ± 19 | 108.900± 9.500* |
| GPA- ST38A | 15 | 29 | 3.08±0.15 | 0.96±0.06 | 0.07±0.01 | 159.71±12.86 | 610±18 | 261.800 ±22.400 |
| GPA- ST39A | 12 | 24 | 7.67±0.31 | 2.74±0.14 | B.D.L. | 202.88±15.27 | 1105±27 | 202.900 ± 14.500 |
| GCC-ST07A | 11 | 34 | 3.68 ± 0.17 | 0.59±0.04 | 0.10±0.01 | 75.11 ±3.03 | 656 ±2 1 | 114.500 ± 6.000* |
| GCC-ST07C | 18 | 23 | 3.81 ± 0.17 | 0.84 ±0.05 | 0.14 ±0.01 | 103.21 ± 5.62 | 694 ± 18 | 148.600 ± 9.000 |
| GCC-ST45A | 13 | 26 | 4.23±0.19 | 1.18±0.07 | 0.15±0.01 | 178.19±13.9 | 820 ± 22 | 217.400 ± 17.900 |
| GCC-ST45B | 20 | 24,7 | 2.80±0.14 | 0.87±0.06 | 0.05±0.01 | 134.14±7.78 | 597±21 | 224.900 ± 15.200 |
| GCC-ST47A | 18 | 39 | 7.74 ± 0.31 | 2.23 ± 0.12 | 0.27 ± 0.01 | 96.89 ± 4.15 | 1404 ± 31 | 69.000 ±3.300* |
| GCC-ST48A | 7 | 19,3 | 4.74±0.22 | 1.25±0.07 | 0.21±0.01 | 168.29±14.62 | 930±23 | 181.000 ± 16.400 |
| GCC-ST49A | 11 | 41 | 8.40±0.33 | 2.52±0.12 | 0.36±0.02 | 87.83±4.28 | 1516±30 | 57.900 ± 3.100* |
| GCC-ST49B | 12 | 9,2 | 8.94 ± 0.37 | 2.46 ±0.13 | 0.24±0.01 | 89.04±3.99 | 1461 ±32 | 60.900±3.000 |
| GCP-ST11A | 10 | 16,7 | 5.84 ± 0.25 | 1.84±0.1 | 0.30±001 | 178.35±11.12 | 1186±26 | 150.400±9.500 |
| GCP-ST12A | 18 | 40 | 4.85 ± 0.20 | 1.22 ±0.07 | 0.15 ±0.01 | 84.17± 7.69 | 824 ± 20 | 102.200 ±9.700* |
| GCP-ST13A | 12 | 15,9 | 3.43±0.16 | 0.56±0.04 | 0.09±0.01 | 178.1±21.76 | 586 ± 18 | 303.900 ± 21.500 |
| RS-ST27A | 11 | 18,9 | 11.47±0.45 | 2.91±0.15 | 1.67±0.06 | 22.26±1.29 | 2666±47 | 8.400±0.500 |
| RS-ST29A | 9 | 25,8 | 10.31±0.40 | 2.46±0.12 | 1.61±0.05 | 3.77±0.35 | 2456±44 | 1.540±0.140 |
| RS-ST79 | 19 | 59 | 10.34 ±0.38 | 2.40 ±0.11 | 1.65±0.05 | 97.76 ±1.46 | 2715 ±44 | 36.000 ± 0.800* |

The TS occupies the central and western portion of the GPA depression, whose top is at 40 and 28 meters, and is densely vegetated. It has a relatively flat and rugged relief (inactive terrace) with successive elevations and depressions that define the depositional morphology of

the accretionary bars and contain narrow and irregular crescent-shaped lakes (Figs 2, 4, and 5). Internally, the deposits consist mainly of muddy sediments (silt and clay) with interbedded sand in varying proportions, sometimes defining pairs of inclined heterolytic stratification (EHI), with features of pedogenesis and development of yellow and clayey soil at the top (Fig. 4A, Fig. 5A, and 5B). The mud layers vary from decimetric to metric, exhibit a whitish to a brownish color with reddish mixtures (rusting), a massive appearance (occasionally with plane-parallel lamination) (Fig. 5C), with fossil impressions of fragmented leaves (diameter of 2 cm) (Fig. 5D). The sand layers vary in thickness from 3 cm to approximately 2 m, exhibit a yellowish to orange color with reddish mixtures, solid or laminated appearance, very fine to fine granulometry, sometimes with dispersed clay granules. This unit's 11 LOE dates indicated an age range between 261,800 and 73,500 years (Fig. 3, Fig. 4B, 4C, and Fig. 5A).




**Figure 4.**The panoramic section of the TS outcrop on the bank of the Igarapé Grande highlights the crest and depression morphology. Internally, the terrace comprises interbedded mud and sand (white dashed line) that define the bar-to-point EHI pairs. Details B and C indicate the sample collection sites (ST31A1 and ST31B1) in aluminum tubes for LOE dating. The location of the studied point (ST31) is on the map in figure 2.

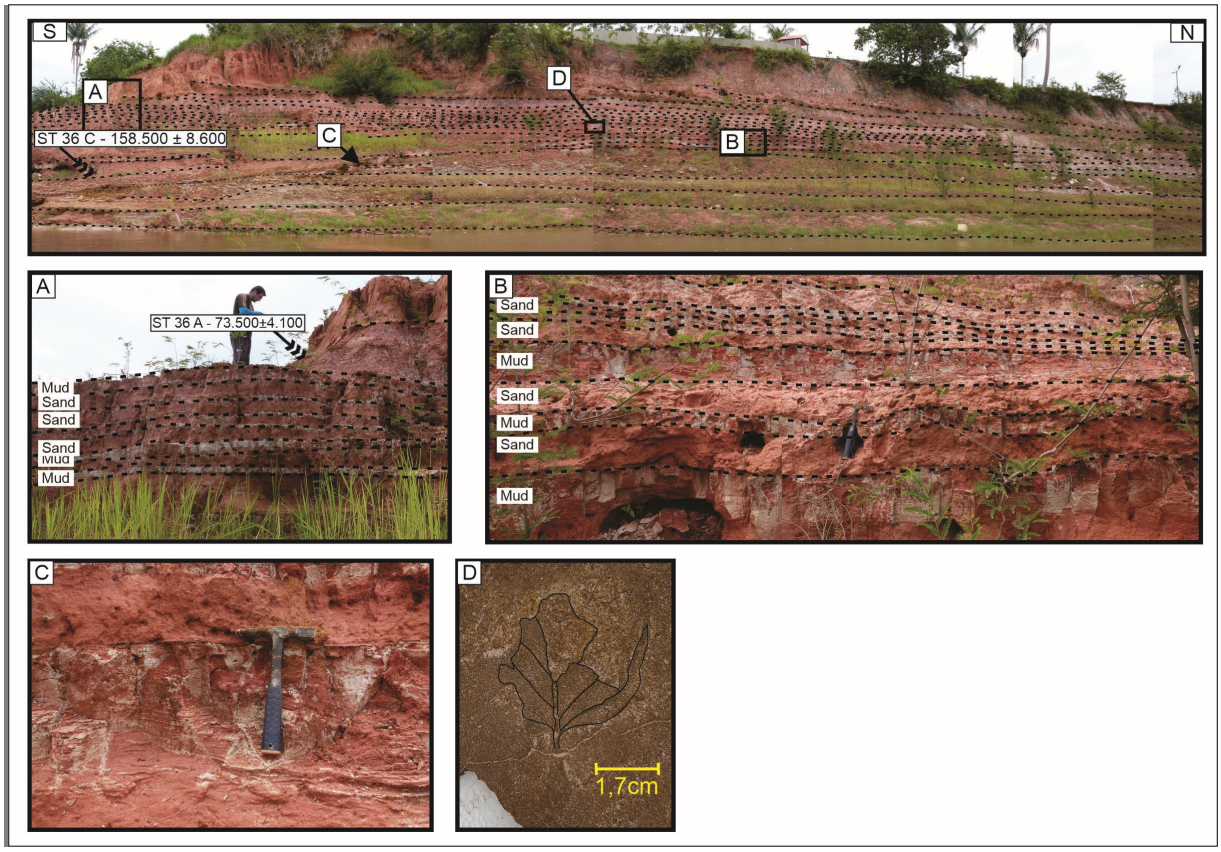



**Figure 5.**The panoramic section of the TS outcrop of the Igarapé Acajituba bank high lights the crest and depression morphology of the river bar, composed of successive intercalations of layers of sand and mud that form pairs of the EHI (black dashed line). Details A and B show the intercalations of sand and mud layers with the indication of the sample collection site (ST36A) for LOE dating. Detail D shows a flat-parallel lamination and fossilized leaf impression in the muddy layers. The location of the studied point (ST36) is on the map in Figure 2.

The TI is regularly distributed in the eastern portion of the GPA, confined in this portion by rocks of the Neogene substrate, and makes up the current active alluvial plain of the Ariaú River, being covered by small vegetation (Fig. 6). It is characterized by a flat relief, with gentle crests and depressions and morphological features of accretionary lines, containing irregular and narrow lakes and its top is located at altitudes of 15 to 28 meters. It generally consists of muddy sediments (laminates) with sandy intercalations (massive) that define bars with EHI. In the northern part of this terrace, an elongated deltaic feature develops, built by the dynamics of the Ariaú River, which flows into the Negro River for about 3.0 km (Fig. 6). Internally, the deltaic deposit consists predominantly of muddy sediments (silt and clay) with centimetric to decimetric intercalations of fine sand layers that define a plane-parallel stratification. The layers generally exhibit a light beige to pink color and have a solid and/or laminated appearance (Fig. 6A, 6B, 6C, 6D, 6E). Geochronologic data from 02 dating by

LOE in the exposed basal layers, integrated with age data obtained by Soares et al. (2010) in the delta, indicated an initial deposition interval between 13,000 to 1,340 years (Fig. 6B, 6E). Changes in the delta feature area defined by the multitemporal analysis of Landsat imagery over a 19-year time interval (2001 to 2020) and at an approximate elevation of 17 meters indicate a baseline delta growth rate of approximately 365% (Fig. 7). Between 2001 and 2009, the area of the delta increased considerably, about 73.18 hectares (ha), while between the years 2009 and 2020, the increase was shorter, about 35.38 hectares, indicating a 35% decrease in the growth rate compared to the first-time interval.




**Figure 6.**Panoramic section of the delta highlighting the lateral (Details A, B) and frontal (Detail C) parts at the Ariaú and Negro riversconfluence, indicating sampling collection sites for LOE (Details B, E). Internally, the unit is beige. It exhibits a massive muddy appearance (Detail B) and/or is stratified, with interspersed layers of sand and mud (Detail E). The studied points' locations (ST18 and ST19) are on the map in Figure 2.
Acronyms: Cl - Clay, Si - Silt; FS - Fine Sand; MS - Medium Sand; CS - Coarse Sand.

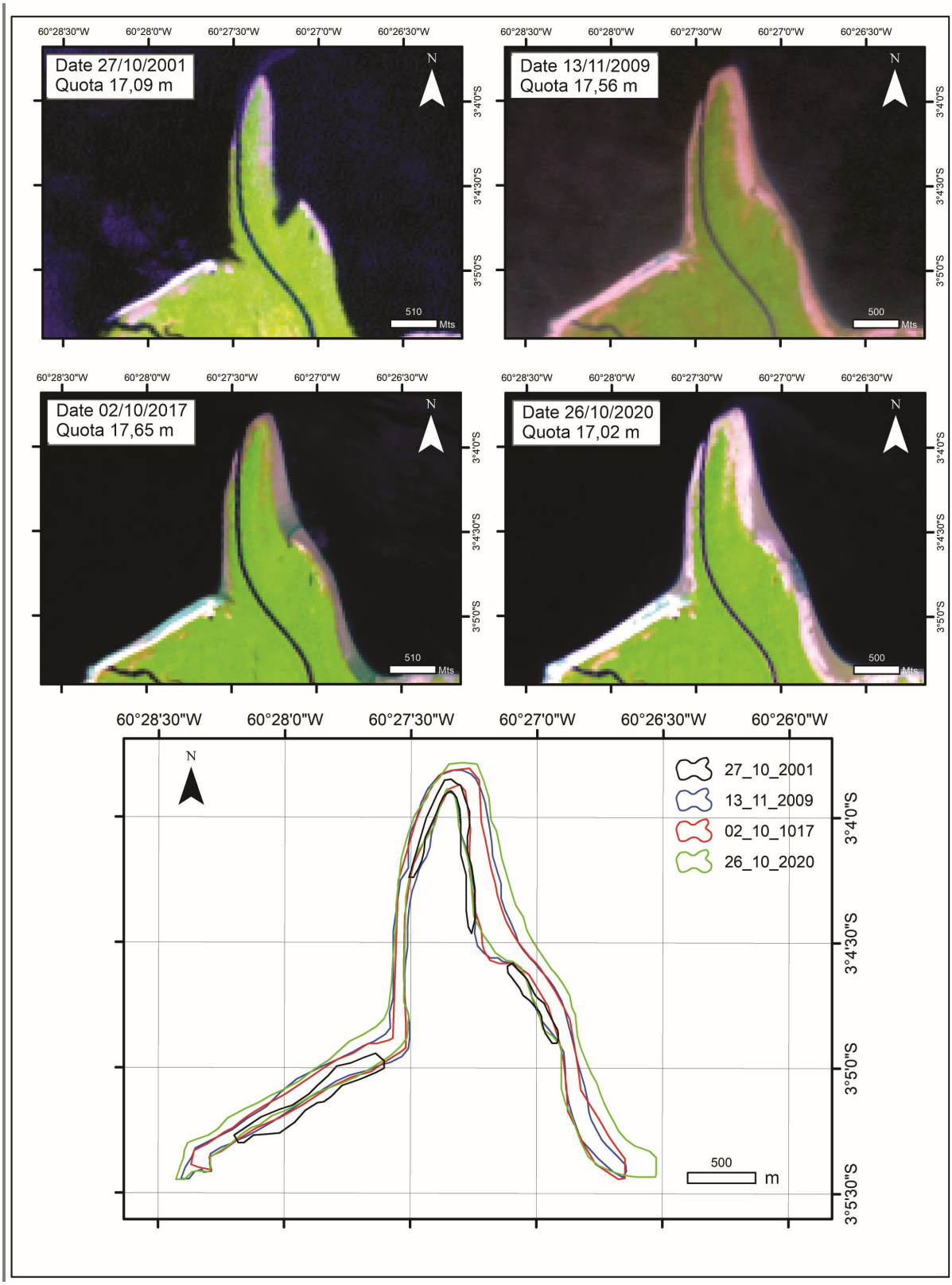



**Figure 7.**Phases of the delta development on the lower terrace of the GPA. Changes in the area were measured over 19 years (2001 to 2020), considering a quota of 17 meters.

## 4.4. Grabens Cacau Pireira (GCP) and Cachoeira do Castanho (GCC)

The GCP and GCC depressions are located on the lower course of the Rio Negro, and exhibit rhombohedral shapes with rectilinear contours, preferably elongated in the NW-SE. They exhibit varied dimensions. The first is about 15 km long, 5 km wide, and 15 m deep, while the second is 5 km long, 4 km wide, and 4 m deep. The deposits that fill the depressions have the top located at elevations between 26 and 29 m above sea level, flat relief, moderately dissected, and represent areas of the inactive Rio Negro plain, partially flooded by seasonal floods. On the surface, they exhibit features of depositional morphology defined by smoothly curved accretion lines, oriented in the NE (GCP) and N (GCC) directions (Fig. 2). The base of the depressions is defined by slightly planar, undulating surfaces, with a slight N-NE inclination, developed over sandstones and silicified pelites of the Neogene sedimentary substratum (Figs. 8 and 9).




**Figure 8.**Panoramic section of a stretch of the GCP showing the rough and slightly undulating contact between the quaternary deposits and silicified sandstones of the Neogene substrate. The surface exhibits a northward slope. The locationof the studied point (ST 82) is on the map in figure 2.




**Figure 9.**Panoramic section of a stretch of the GCC showing the sudden and undulating contact between the Quaternary deposit and the Neogene unit, with the inclination of the substratum to NE. The locationof the studied point (ST 12) is on the map in figure 2.

The GCP is the second most expressive tectonic depression in the study area. Sedimentation in the GCP started with a consolidated basal conglomeratic layer about 10 to 40 cm thick, laterally discontinuous, and disposed discordantly on the Neogene basement. The

conglomerate is white to yellowish (ferruginous), with a massive appearance, containing portions of closed and open frameworks. It contains pebbles (diameter from 1 to 15 cm) of quartz and silicified sandstone (Neogene unit), surrounded by a medium to very thick, poorly sorted, porous sandy matrix (quartz) dispersed subrounded to rounded quartz grains. Overlying this layer, there are predominantly muddy sediments (silt and clay) with decimetric to metric intercalations of sandy layers, which define the EHI pairs (Figs. 10 and 11). The mud has a whitish to greyish-pink color, with reddish (ferruginous) mixtures with a thin bedding/internal parallel plane lamination. In contrast, the sand is reddish to orange, has fine to very fine granulometry, and has a massive appearance with clayey grains and clasts (diameter millimeters to centimeters) scattered throughout. In the deposits of the GCC, no conglomeratic basal layer was identified, being constituted solely of homogeneous sediments, predominantly muddy (silt and clay) with intercalations of layers of sand (fine) that define pairs of HIE, like those described in the GCP (Fig. 12 and 13).

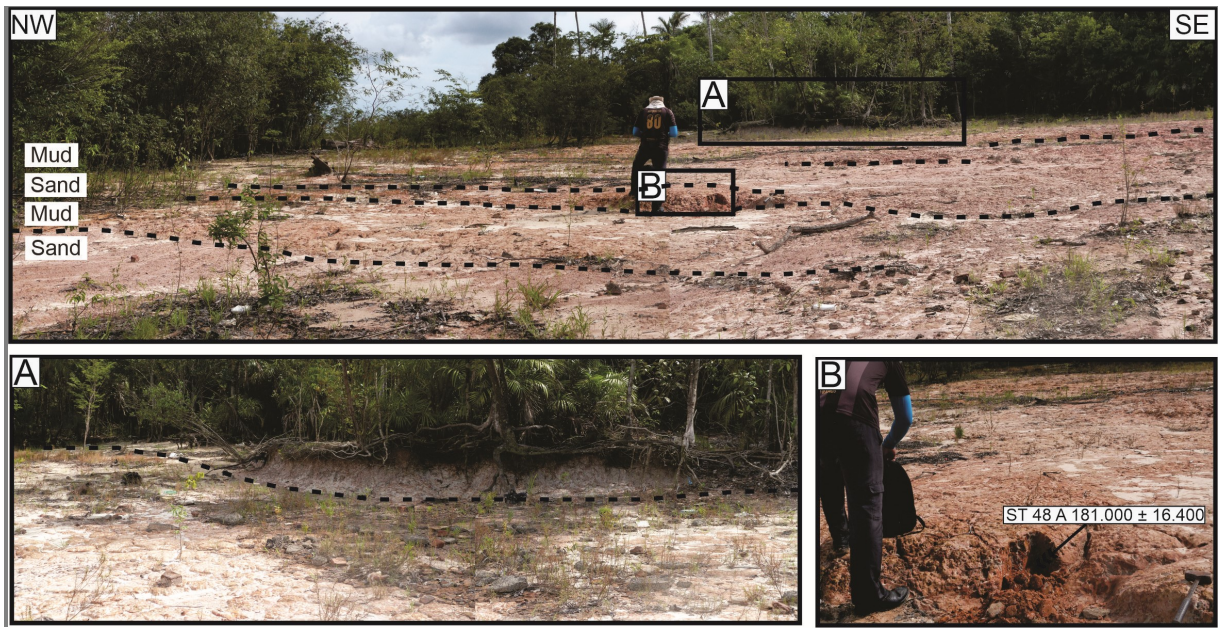



**Figure 10.**Panoramic section of the GPC outcrop highlighting the EHI defined by intercalations of mud and sand layers (dashed black line), with thin and yellowish soil on top. Detail A shows the stratification between mud (top) and sand (bottom). Detail B shows the sampling location of sample collection for LOE dating. The locationof the studied point (ST 48) is on the map in Figure 2.




**Figure 11.**Panoramic section of the outcrop, highlighting the slightly inclined plane of the EHI (Detail A). Details B and C show sampling locations for LOE dating in the sand layers. Details D and E show reddish paleosol with bioturbations (root marks-R, contraction cracks-C). The locationof the studied point (ST 07) is on the map in Figure 2.




**Figure 12.**Panoramic section of the GCC outcrop showing interbedded mud and sand layers (dashed black line). Detail A shows the boundaries of the bedding planes between sand and mud. Detail B shows crack planes (black dotted line) of metric length filled with mud. Detail C shows the sampling location of sample collection for LOE dating. The locationof the studied point(ST 12) is on the map in Figure 2.




**Figure 13.**Panoramic section of the GCC outcrop shows the rhythmic intercalation of layers of mud and sand. Detail A shows the stratification defined by the intercalation of a layer of mud and sand with a thinning feature. Detail B indicates the location of sample collection for LOE dating. The locationof the sampled point (ST 13) is on the map in Figure 2.

In general, paleosols occur at the top of some sandy layers, with penetrative features defined by biogenic structures (phyto-bioturbation) and contraction cracks, highlighted by the reddish coloration and rusting at the edges of the features, in addition to the filling of the structures by muddy material from the overlying layer ( Fig. 11D, 11E, and Fig. 12B). In plan, the shrinkage cracks are irregularly distributed, with discontinuous and roughly polygonal cracks and, in profile, they are rectilinear, tapering at the base and reaching a depth of 70 cm to 1 meter. In plan, the biogenic structures are circular to elliptical, with diameters from 10 to 30 cm and, in profile, present a smooth funneling towards the base (arranged perpendicularly to the bedding), reaching up to 1 meter in depth, and may represent molds filled with roots or trunks. Geochronologic data from 10 datings by LOE in the GCP, integrated with ages from

the studies by Soares et al. (2010), Ribas (2011), and CPRM (2016) in the same depression, indicated a time interval of deposition between 224,900 to 53,806 years. In the GCC, five geochronologic data by LOE, integrated with ages determined by Soares et al. (2010) and Ribas (2011), resulted in a deposition interval between 303,900 to 25,732 years (Fig. 2).

### 4.5. Miriti Lake Graben (GLM)

The GLM has a rhombohedral shape with rectilinear boundaries defined by faults/structural lineaments of general NW-SE and NE-SW directions (Figs. 1 and 2). Its locationis on the left bank of the Solimões River, approximately 4 km long, 2.5 km wide, and 5 meters deep (in the central portion of the depression). The sedimentary deposit that fills the depression has the top located at levels of 23 and 27 meters above sea level, exhibits flat and dissected relief, is covered by medium-sized vegetation, being partially inundated by the seasonal floods of the Solimões River. It consists mainly of muddy sediments (silt and clay) with rare centimeter to decimeter intercalations of fine sand that are internally massive or laminated, which define flat-parallel stratification. It exhibits a medium gray color, with pinkish to yellowish tones, with reddish and yellowish mixtures (ferruginous) that characterize the mottled appearance (Fig. 14). LOE dating data indicates an age of approximately 52,446 years for the sedimentation (Fig. 2).




**Figure 14.**Panoramic section through the GLM depression, showing the Quaternary deposits overlying ferruginous sandstones of the Neogene substrate. Detail A shows a thin intercalation of a layer of sand (dashed black line), yellowish in color, with an indication of the sampling collection site for LOE dating in the project by Ribas (2011). The locationof the sampled point (ST 81) is on the map in Figure 2.

### 4.6. Bars of the Solimões River

In the southern portion of the GPA and GCP depressions are lateral and central bars (islands) of the Solimões River (Figs. 1 and 2). They present flat relief, with the top located at elevations between 15 and 35 m, with smooth crests and depressions, which is a succession of lateral accretion cords that truncate into several sets with accretion zones stabilized by vegetation (Fig. 15). The sets of bars extend for tens of kilometers and register migrations in several directions, containing lakes in the shape of a half moon, asymmetrical and narrow and are sectioned by secondary channels. They have a whitish, yellowish, to brownish color and are predominantly muddy (silt and clay) with centimetric to metric intercalations of sand (fine to medium), which define inclined heterolytic bars. The layers of sand and mud are solid or laminated and present bioturbations characterized by straight to slightly curved cylindrical tubes with an external diameter of up to 1.8 mm and an internal central hole of up to 1.2 mm, formed by the agglutination of mud and sand, probably produced by worms (Fig. 15D).

Geochronological data obtained by LOE in this study, integrated with data from Gonçalves Júnior et al. (2016), indicated age between 36,000 to 1,540 years (Fig. 2).

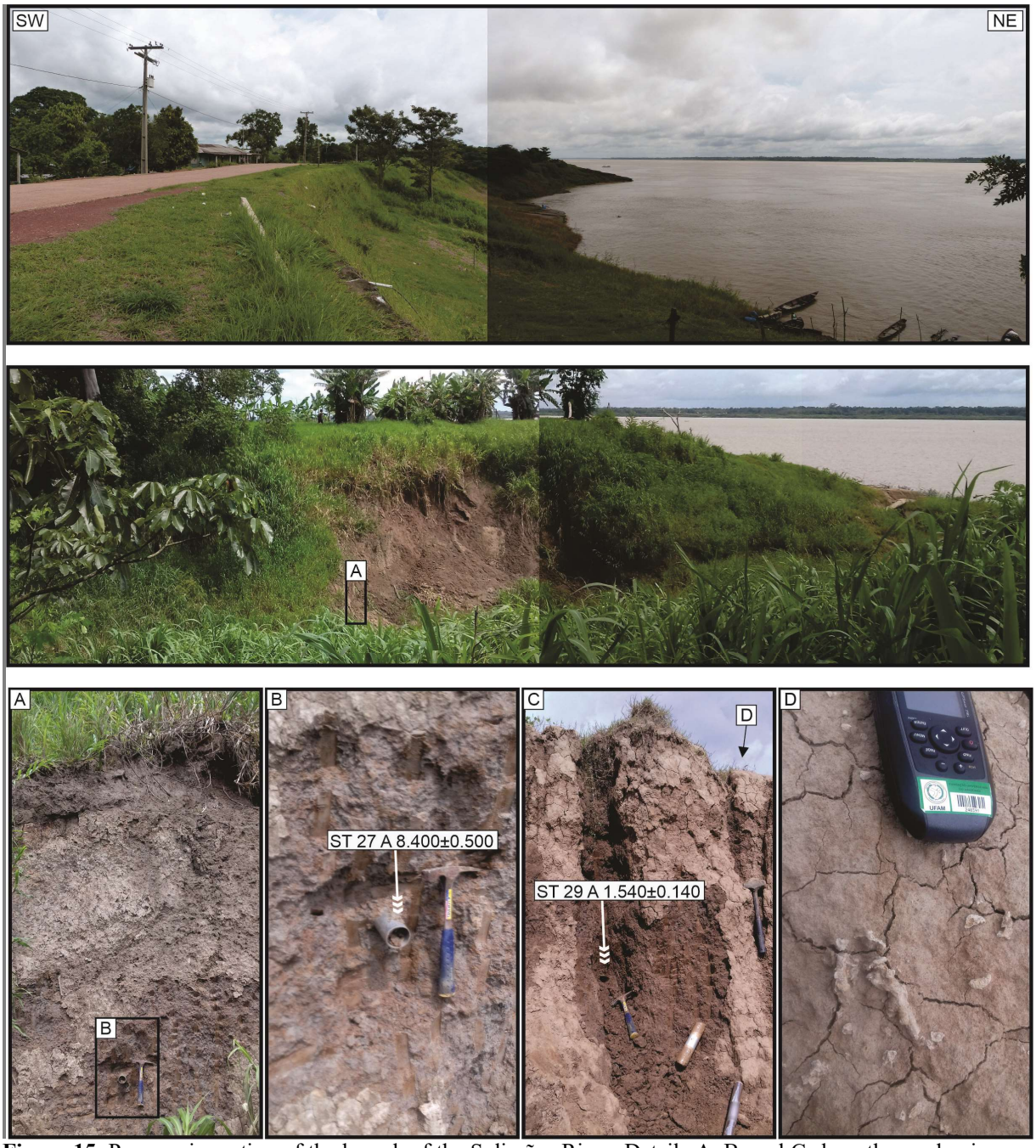



**Figure 15.** Panoramic section of the branch of the Solimões River. Details A, B, and C show the predominance of muddy sediments indicating the location of sampling for LOE dating in a thin sand layer. Detail D shows elongated bioturbation tubes inserted into the muddy layer. The locations of the Points (ST 26, ST 27, and ST 29) are on the map in Figure 2.

## 5. Discussions

Tectonic-sedimentary context of the study area. The intrinsic relationship between the sedimentation of the fluvial terraces and the neotectonic movements is reflected in the

tectonic-sedimentary evolution of the tectonic depressions in the confluence area of the Negro and Solimões rivers, whose evolutionary stages are based on the geochronological data (LOE) of this study, which are correlated with the age data from the papers of Soares et al. (2010), Ribas (2011), CPRM (2016), and Gonçalves Junior et al. (2016). Punctuated geochronological data on the substrate of the GCP indicate that the evolution of these structural features began in the Lower Pleistocene (ca. 427,000 years ago) (Soares et al., 2010) and is related to the reactivation of faults of the general direction NW-SE in the Neogene substrate, due to extensional efforts towards NE-SW (Franzinelli&Igreja, 1990; Franzinelli&Latrubesse, 1993; Costa et al., 1996; Fernandes Filho et al., 1995; Franzinelli et al., 1999; Costa et al., 2001), which produced isolated basins and subsequent development of secondary channels associated with a confined alluvial plain with lakes, as shown in the block diagrams in Fig. 16 (GPA, GCP, and GCC - Stage 1).

In the GPA, sedimentary filling started more prominently in the western part of the depression, with the initial implantation of the small meandering fluvial system of the Ariaú River, influenced by the seasonal dynamics of the Negro and Solimões rivers (Fig. 16, GPA - Stage 2). The continuous tilting and deepening of the depression floor to E-NE influenced the continuous eastward migration of the Ariaú River that prevailed between 261,800 and 52,900 years, promoting the broad and gradual development of the inactive alluvial plain to the west. The meandering style of this river is evidenced by the morphological features of accretion bars on the surface, composed of mud (silt and clay) and sand that make up the EHI pairs. Subsequently, degradation and abandonment of the floodplain in the western and central portions of the GPA led to the final development of the upper fluvial terrace (TS), on which vegetation began to settle, and the processes of dissection and pedogenesis began. Concomitantly, between 13,000 years and 1,340 years, a new phase of degradation and development of the lower terrace (TI) by the active channel of the Ariaú River begins to settle in the eastern portion of the GPA, with the sedimentation of elongated sandy ridges that begin the construction of the feature deltaic in the Rio Negro basin (Fig. 16, GPA - stage 3). The dynamic character of the TI is reflected in the deposition of sandbars along the Ariaú River channel, as well as by the continuous and gradual development of the deltaic feature, which currently enters the Negro River basin for about 3 km (Feitosa & Soares, 2009 ). Current bars of the Solimões River deposited between 36,000 and 1,540 years ago, block the southern

edges of the GPA and GCP, emphasizing the predominantly inactive character of the depressions.

The tectonic-sedimentary model proposed for the evolution of the GPA can be compared with the development and filling of hemigrabens proposed by Leeder & Gawthorpe (1987), which relates mainly to neotectonics and channel migration. Feitosa & Soares (2009) associated the development of the deltaic feature identified on the lower terrace of the GPA, the activity of the Ariaú River when flowing into the lower Rio Negro basin, since in this section, the flow of the Rio Negro is low (28,400 $m^3$/s - National Water Agency 2010) due to the blockage by the high flow of the Solimões River (103,000 $m^3$/s - National Water Agency 2010) in the confluence zone. Straight and elongated delta lines were also identified in the Anavilhanas Archipelago (Lower Rio Negro), downstream of the depressions, with their origin associated with the development of marginal dikes on the islands of the archipelago (Barbosa, 2015).

The development of terraced units in the GCP and GCC depressions is related to the continuous deepening and tilting of the soils by faults toward N-NE, which allowed the development of isolated basins but was more restricted than in the GPA. In these basins, small meandering river systems fed by the Rio Negro were established, resulting in the deposition of accretionary bars, internally constituted by pairs of EHI interspersed by layers of paleosols, in addition to fines from the floodplain. In the GCC and GCP, the sets of accretion bars are oriented in SE-NW and S-N directions, respectively, with age intervals between 303,900 and 25,732 years for the GCC and 224,900 and 53,806 years for the GCP (Fig. 16, GCP and GCC - stages 2 and 3). As the blocks were eroded to the N-NE, higher parts SW of the depressions were progressively stabilized by vegetation and submitted to dissection and pedogenesis processes (Fig. 16, GCP and GCC - stage 3). The recurrence of paleosol stages in the accretionary bar deposits on the terraces indicates interruptions in sedimentation and subaerial exposure that could be related to neotectonic movements and/or minor climatic changes. The irregularities of the GCP and GCC substrates, which exhibit features of gradual scaling towards N-NE, reflected even in the morphology of the current relief, is evidence that corroborates the role of recent tectonics in the formation of depressions, which is also reflected in the asymmetry of the substrate, allowing them to be classified as hemigrabens, corroborating with the interpretation of Franzinelli&Igreja (2002).

Sedimentation in the GLM is exclusively influenced by the dynamics of the Solimões River, which deposited muddy sediments (silt and clay) with thin laminated sandy intercalations by

the suspension. In this depression, a single geochronological measurement indicated an age of 52,446 years.

General geochronological data (LOE and C-14) obtained in this study and regional works (Soares et al., 2010; CPRM, 2016; Gonçalves Jr. et al., 2017 and Passos et al., 2020) allowed showing a chronological concordance relationship between the ages of the upper terrace of the depressions (GPA, GCP, and GCC) and the upper-intermediate terraces of the floodplain of the Solimões River (between the Purus and Madeira tributaries). In the depressions, the deposition occurred concomitantly between 303,000 and 25,000 years, while in the Solimões River, it developed between 240,000 and 19,000 years, indicating temporally similar phases of implantation and evolution of the Negro and Solimões rivers, in the confluence zone.

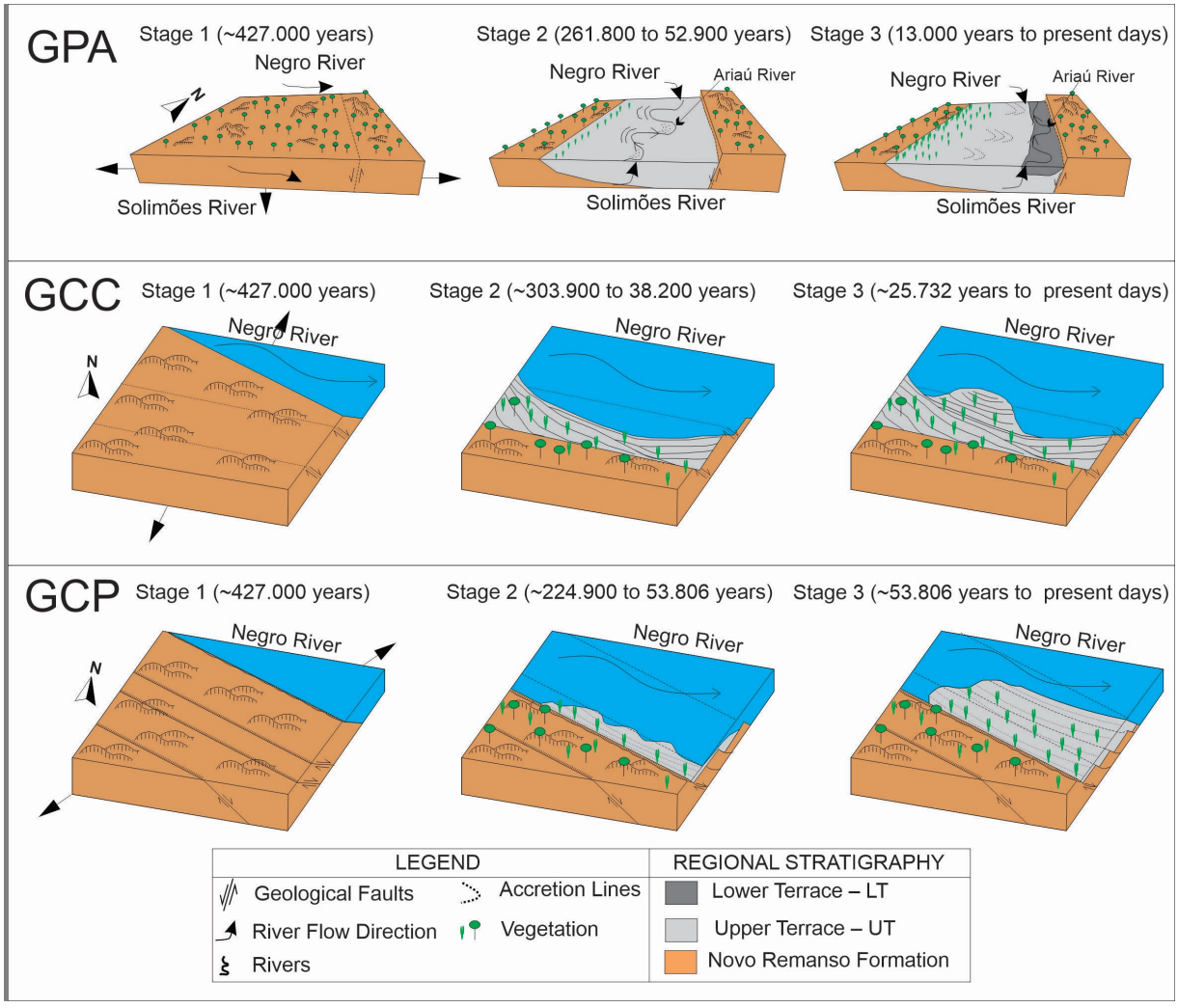



Figure 16. Schematic block diagram illustrating the stages (1 to 3) of tectonic-sedimentary development of the GPA, GCC, and GCP in the confluence zone of the Negro and Solimões rivers.

## 6. Conclusions

- The present study allowed the establishment of a temporal relationship between the morpho-stratigraphic units of river terraces, as well as the elaboration of a tectonic-sedimentary model for the tectonic depressions in the Negro and Solimões riversconfluence area, which exhibit varied dimensions, between 34 and 5 km of length.
- Punctual geochronological data by LOE demonstrated that the opening of the depressions might be related to a neotectonic event in Central Amazonia approximately 427,000 years ago (Soares et al., 2010). In addition, unpublished geochronological data (LOE) from this study allowed expanding the sedimentation intervals of the terrace units (upper and lower) of the studied depressions, previously positioned between 65,000 and 9,000 years by Soares et al. (2010), for 303,000 to 1,340 years, also emphasizing the unprecedented age attributed to the sedimentation of the GLM (52,446 years).
- In general, the significant development of depressions occurred in a correlated time interval, and the sedimentary filling was related to the development of smaller meandering river systems in restricted basins.
- The phases of construction and abandonment of the terraces, currently inactive, can be associated with recurrent neotectonic movements, which induced the tilting of substrates and gradual development of hemi-grabens, as well as the seasonal dynamics of the Negro and Solimões rivers in the Pleistocene-Holocene boundary.

## 7. References

Almeida-Filho R., Miranda F. P., Beisl C. H. 2005. Evidência de uma mega captura fluvial no Rio Negro (Amazônia) revelada em modelo de elevação digital da SRTM. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. Anais. São Jose dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 1701-1710.

Barbosa R. O. 2015. Estudos sedimentológicos e estratigráficos dos depósitos sedimentares quaternários do Arquipélago de Anavilhanas, município de Novo Airão (Amazônia Central). Dissertação de MestradoemGeociências, Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 109 p.

Cesar, R. G. 2015. AnáliseEstratigráfica de 3 depressõestectônicas da margemdireita do Rio Negro, pormeio de dados geológicos e geofísicos. 2015 PIBIC (Projeto de iniciaçãoCientífica

PIB-E/0025/2014) Departamento de Geociências - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 17 p.

Costa J. B. S., Bemerguy R. L., Hasui Y., Borges M. S., Ferreira Junior C. R. P., Bezerra P. E. L., Costa M. L., Fernandes J. M. G. 1996. Neotectônica da regiãoamazônica: aspectostectônicos, geomorfológicos e deposicionais. Geonomos, Minas Gerais, v. 4, n. 2, p. 23-44.

Dino, R., Soares, E. A. A., Antonioli, L., Riccomini, C., Nogueira, A. C. R. 2012. Palynostratigraphy and sedimentary facies of miocene fluvial deposits of the Amazonas Basin, Brazil. Journal of South American Earth Sciences. v. 34, p. 61-80.

CPRM, 2016.Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus, Estado do Amazonas, escala de integração 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Brasília: Ministério de Minas e Energia/CPRM/Serviço Geológico do Brasil.

Crósta, A. P. 1993. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas: IG/UNICAMP, 170 p.

Feitosa I.L & Soares E.A.A. 2009. Análise sedimentológica dos deltas lacustres dos lagos cabaliana e do Padre, Amazônia Central. In: SBGA, Simpósio de Geologia da Amazônia.

Fernandes Filho L.A., Costa J. B. S., Costa M. L. 1995.Bacia de Manaus: uma estrutura pull-apart do Quaternário. In: 5º Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos. Gramado. Boletim de resumos expandidos. Gramado SBG/RS e CPGQ/UFRGS, p. 419-420.

Franzinelli E. & Igreja H.L.S. 2002. Modern Sedimentation In The Lower Negro River, Amazonas State, Brazil. Geomorphology, v. 44, n. 3, p. 259-71.

Franzinelli E. 2011. Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil). Revista Brasileira de Geociencias, v. 41, n. 4, p. 587-596.

Franzinelli E., Igreja H., Repolho T. 1999.Fragmentation of Ecosystem Owing to neotectonics in the Amazon Basin. Science Reports of Tohoku University, 7th (Geography), Japão. Special Issue on GLOCOPH'98. v 49, n° 2.

Franzinelli E., Igreja H.L.S. 1990. Utilização do sensoriamento remoto na investigação na área do Baixo Rio Negro e Grande Manaus. In: 6º SBSR – 6º Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Manaus. Anais. v. 3, p. 641-648.

Franzinelli E., Latrubesse E. 1993. Neotectonic in the central partoftheAmazonbasin. Bulletin INQUA Neotectonic Commission, v. 16, p. 10-13.

Gonçalves Júnior E. S., Soares E. A. A., Tatumi S. H., Yee M., Mittani J. C. R. 2017.Pleistocene-Holocene sedimentation of Solimões-Amazon fluvial system between the tributaries Negro and Madeira, Central Amazon. Brazilian Journal of Geology, v. 46 n. 2, p. 167-180.

Igreja H. L. S., Franzinelli E., Repolho T. 1999.Neotectonic influenceon fluvial capture in theAmazonBasin, stateof Amazonas, Brazil. GLOCOPH '98 Abstract ofconferencepapers, p. 85-86.

Leeder M.R., & Gawthorpe R.L. 1987. Sedimentary models for extensional tilt-block/half-graben basins. Geological Society, London, Special Publications, v 28, p. 139 - 152.

Lomax J., Hilgers A., Twidale C. R., Bourne J. A., Radtke U. 2007. Treatment of broad paleodose distributions in OSL dating of dune sands from the western Murray Basin, South Australia. Quaternary Geochrnology, v. 2, p. 51-56.

Murray A.S. & Wintle A.G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol, Radiation Measurements, v. 32, p. 57-73.

Nascimento A. Z. A. 2016. Características hidro-geomorfológicas do baixo curso dos rios Solimões e Negro, e sua confluência, Amazônia, Brasil. Dissertação de Mestrado em Geografia, Instituto de Ciências Humanas e Letras, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 63 p.

Passos, M. S; Soares, E. A. A; Tatumi, S. H; Yee, M; Mittani, J. C. R; Hayakawa, E. H; Salazar, C. A. 2020. Pleistocene-Holocene sedimentary deposits of the Solimões-Amazonas fluvial system, Western Amazonas. Journal Of South American Earth Sciences, v. 98, doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102455.

Quartaroli C. F., Batistella M. 2005. Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto: Tutorial Básico. Embrapa Monitoramento por Satélite, Campinas. 143 p.

Ribas C.C. 2011. In Projeto de Pesquisa: Relação entre padrões biogeográficos e história geológica na zona de confluência dos rios Negro e Solimões (Amazônia Ocidental): compreendendo os mecanismos responsáveis pela origem da diversidade Amazônica. Manaus, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, 21 p.

Riedel W. 1929. Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. Zentralblatt fur Mineralogie, Geologie und Paleontologie B, 354-368.

Rosa R. 2009.Introdução ao sensoriamento remoto 7ª ed. Uberlândia: EDUFU. 264 p.

Rossetti D. F., Valeriano M. M., Vasconcelos D. L. 2023. A different path to the Negro River in the Chibanian as a window to temporalize the eastward-flowing transcontinental Amazon, Journal of South American Earth Sciences, v 122, doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104187.

Santos L. O., Munita C. S., Soares E. A. A. 2015. Provenance studies in Amazon basin by means of Chemical composition obtained by INAA. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, v 306, p.713–719.

Silva C.L., Morales N., Crósta A.P., Costa S.S., Jiménez-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, v.79, n. 4, p. 693-711.

Soares E. A. A., Tatumi S. H., Riccomini C. 2010.OSL age determinations of Pleistocene fluvial deposits in Central Amazonia. Academia Brasileira de Ciências, v.82, n.3 p. 691-699.

Soares, E.A.A. 2007.Depósitos pleistocenos da região de confluência dos rios Negro e Solimões, porção oeste da Bacia do Amazonas. Tese de Doutorado em Geologia Sedimentar, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 205 p.

Soares, E. A. A., Dino, R., Soares, D. P., Antonioli, L., Silva, M. A. L. 2015. New sedimentological and palynological data from surface Miocene strata in the central Amazonas Basin area.Brazilian Journal of Geology, v. 45, n. 3, p.337-357.

Tatumi S. H., Rossetti D. F., Soares E. A. A. 2020. OpticallyStimulatedLuminescence (OSL) Dating in theAmazonianWetlands. Reino Unido: Cambridge Scholars Publishing, v. 1, 137 p.

## 6.2 CONTEXTO TECTÔNO-SEDIMENTAR DE SUB-SUPERFÍCIE DA DEPRESSÃO TECTÔNICA GPA

Neste topico será abordado o arcabouço estratigráfico da depressão GPA, que se destaca como a mais expressiva da região. A análise enfoca os aspectos morfológicos do embasamento sedimentar Neógeno circundante, bem como os limites estruturais e preenchimento sedimentar do GPA. Dados de sondagem rotativa (10 furos) e perfilagem geofísica (9 SEV's), com profundidade de até 70m, permitiram definir a conformação do limite basal do GPA, bem como dados litológicos do preenchimento sedimentar (Figura 10).

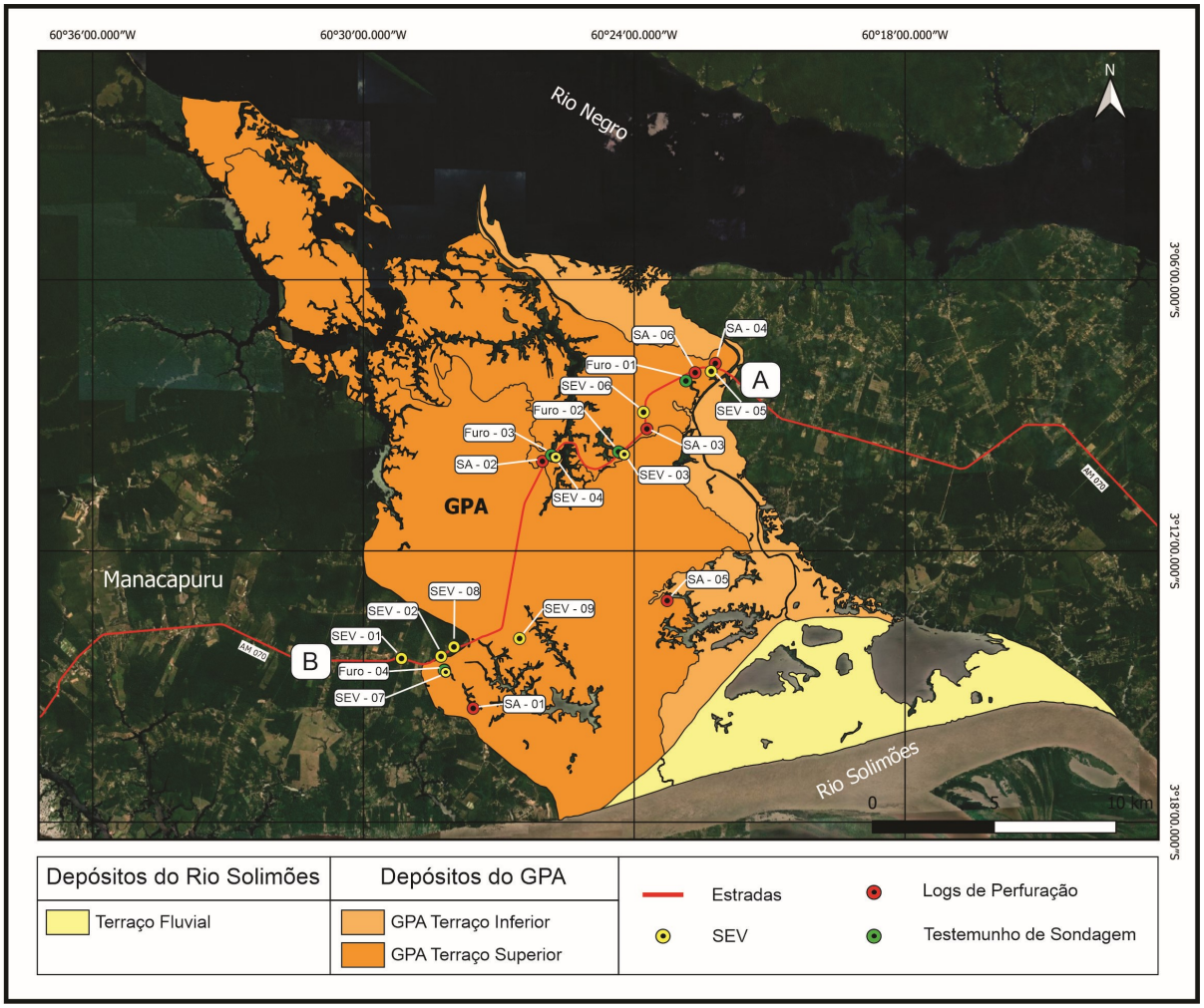



Figura 10. Localização das SEV's (pontos amarelos, sigla SEV 01 a 09), furos de sondagem (pontos verdes, furos 1 a 4) e poços com perfis litológicos (pontos vermelhos, sigla SA 01 a 06, disponíveis no http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_coordenada.php) nos limites do GPA.

### 6.2.1 EMBASAMENTO SEDIMENTAR NEÓGENO.

Rochas siliciclásticas da Formação Novo Remando (Neógeno) sustentam o relevo morfologicamente caracterizado por morros e colinas da área de estudo, disposto em cotas que variam entre 40 e 100m de altitude (Figuras 11, 12 e 13). No topo da unidade ocorre crosta laterítica e latossolo amarelado, que formam uma superfície dissecada (Figura 13), com vales abertos e íngremes com padrão de drenagem subdendrítico a dendrítico (Figura 14, A). Em geral, os litotipos da unidade exibem coloração rosada a avermelhada, aspecto mosqueado, com porções parcialmente friáveis e/ou endurecidas (silicificadas), sendo constituída principalmente de arenitos e pelitos, com conglomerados subordinados, que recobrem discordantemente a unidade cretácea (Formação Alter do Chão) (Figura 12) .




Figura 11. Seção panorâmica na margem do Rio Igarapé Tarumã Mirim mostrando o relevo de morros da unidade sedimentar neógena, limitada por depósitos arenosos quaternários. Ponto estudado (ST40) localizado no mapa da Figura 9.

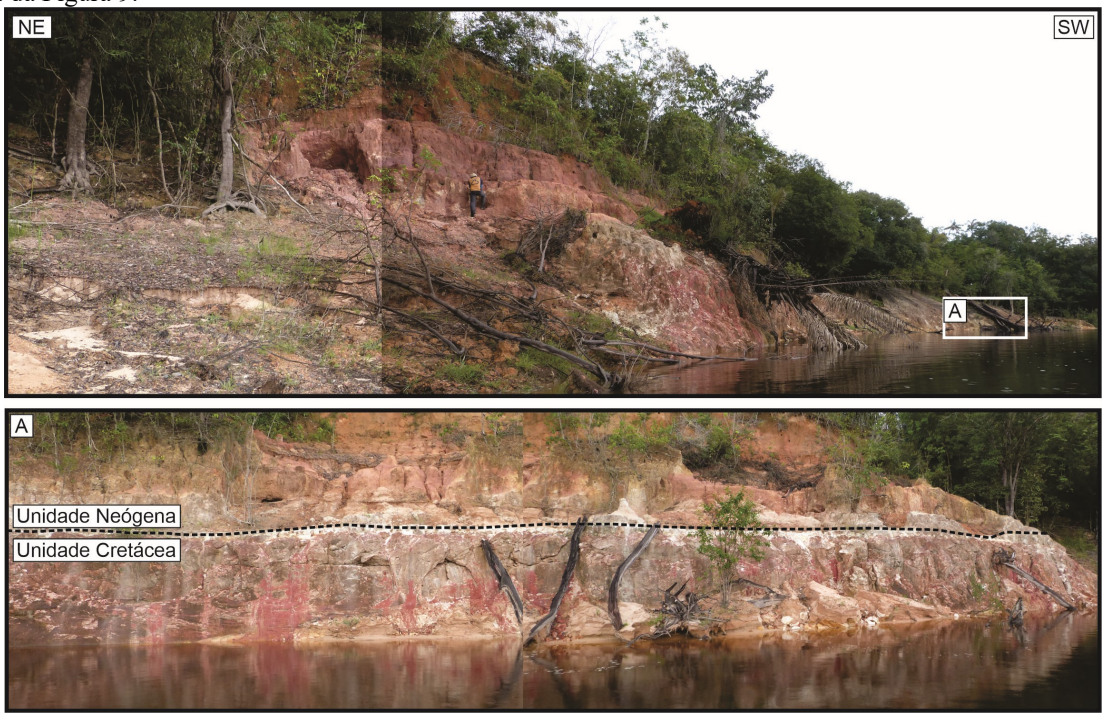



Figura 12. Seção panorâmica da unidade sedimentar neógena na margem do Rio Tarumã Mirim, com destaque para o aspecto avermelhado e mosqueado, com desenvolvimento de latossolo amarelo no topo. O Detalhe A mostra a relação de contato brusco entre as unidades cretácea e neógena. Ponto estudado (ST43) localizado no mapa daFigura 9.




Figura 13 Seção panorâmica da unidade neógena mostrando o desenvolvimento de crosta lateritica (linha pontilhada branca) e latosolo amarelo no topo. Ponto estudado (ST01) localizado no mapa da Figura 9.

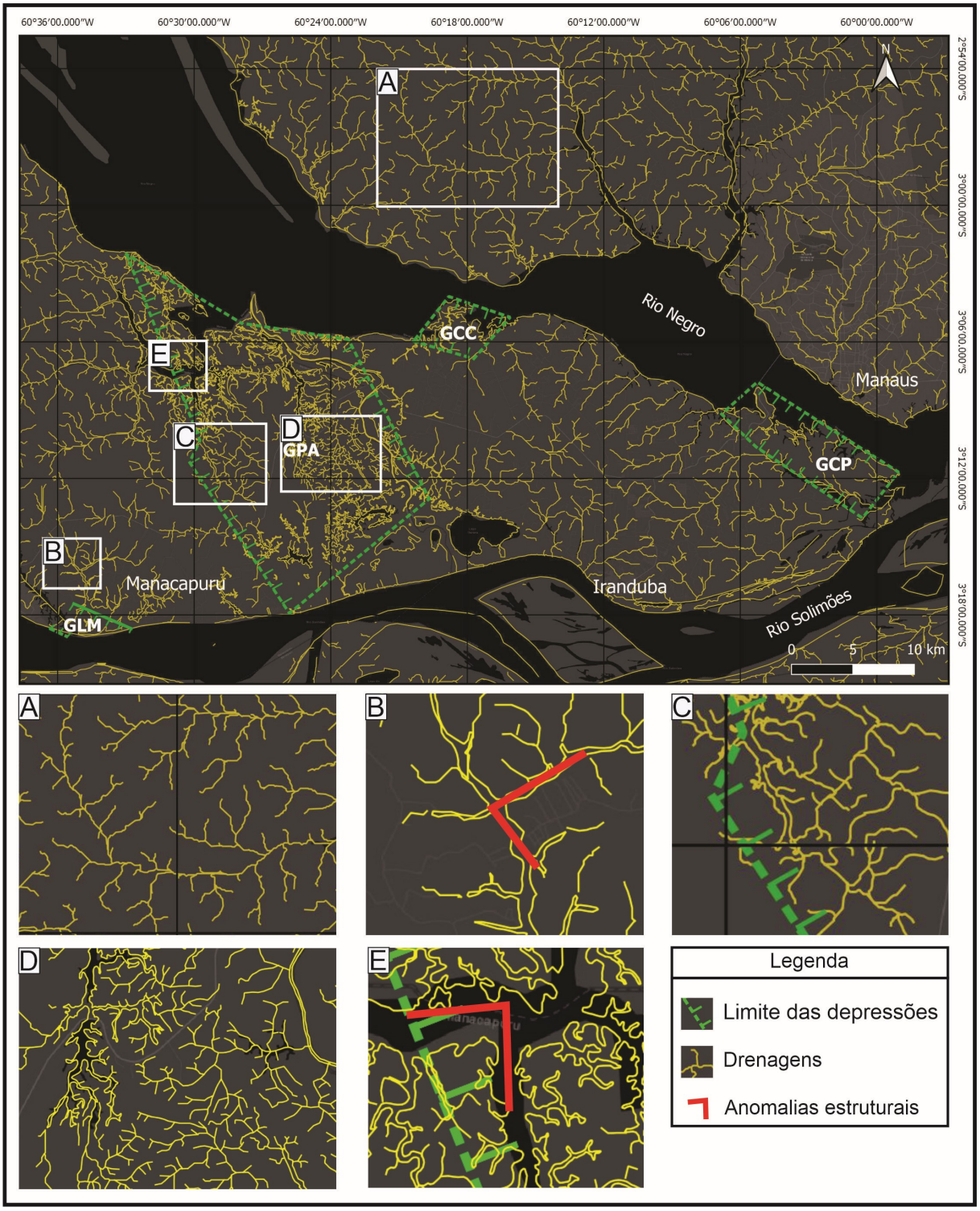



Figura 14. Mapa mostrando diferentes padrões de drenagem desenvolvido sobre a unidade sedimentar neogena e depósitos quaternários da zona de confluência dos rios Negro e Solimões, com enfoque para os limites estruturais das depressões tectônicas GPA, GCP, GCC e GLM (linha tracejada verde). Na área aflorante do substrato Neógeno predomina o padrão de drenagem tipo dendrítico (Detalhe A) com detalhe de anomalia de quebra em cotovelo (Detalhe B), enquanto particularmente nos depósitos quaternários do GPA, predomina os padrões de drenagem tipo sub-dendrítico (Detalhe C) e festonado (Detalhe D), com detalhes de anomalia de drenagem com quebra em cotovelo (Detalhe E).

A partir da fotointerpretação em imagens do satélite Sentinel pode-se evidenciar a atividade neotectônica na região por meio de padrões de lineamento (falhas e fraturas) e de drenagem (seguindo a classificação geral de Lima, 2006). Foram observadas diferenças quanto aos tipos e orientações dos padrões de drenagem desenvolvidos na superfície do embasamento Neógeno e das unidades sedimentares quaternárias das depressõesna zona de confluência dos rios Negro e Solimões. No embasamento predomina os padrões dendrítico e subdendrítico, sendo que o primeiro não indica a acção de controle geológico-estrutural, enquanto o segundo, pode estar associado a controle estrutural, litológico ou litoestrutural (Lima, 2006) (Figura 14, A). Comparativamente, no GPA foram definidos principalmente os padrões de drenagem sub-dendrítico e festonado (Figura 14, D) que seguem o controle estrutural principal NW-SE, concordante com os limites estruturais do GPA e demais depressões, bem como, com o alinhamento do trecho inferior do Rio Negro e demais tributários da região, conforme compilação de dados estruturais regionais (Fernandes Filho et al., 1995; Costa et al., 1996; Igreja et al., 1999; Franzinelli et al., 1999; Franzinelli & Igreja, 2002 e 2011; Silva et al., 2007; Igreja 2012). Em ambos, ocorrem anomalias na rede de drenagem associadas a quebras em "cotovelo", que podem indicar diferenças litológicas e a presença de falhas e fraturas (Figura 14, B, E) e refletem a presença de zonas de fraqueza estrutural.

Os limites geológicos do GPA, a leste e oeste, seguem alinhamentos estruturais bem definidos, por vezes, marcados por desníveis topográficos. Na extremidade leste, o contato é bem evidente, marcado por quebra negativa com desnível acentuado de aproximadamente 25m, onde o relevo da parte elevada é sustentado por rochas da unidade neógena com crosta laterítica e latossolo amarelo no topo e, a parte rebaixada, delimita o topo da sedimentação quaternária (Figuras 15 e 16). Aquebra negativa na porção leste, que marca a zona de contato Neógeno-Quaternário, é bem evidente por cerca de 10km, sendo marcada pela alta densidade de drenagem (Almeida Pinto & Luchiari, 2017). Na extremidade oeste não é possível observar desnível topográfico entre as unidades, apenas a transição litológica entre os depósitos quaternários (predominantemente lamosos) e os arenitos e pelitos da unidade néogena, com crostala teritíca e latossolo no topo (Figura 17).




Figura 15. Seção panorâmica no limite leste do GPA, com destaque para a quebra negativa do relevo (linha tracejada branca), entre a unidade neógena e o preenchimento sedimentar Quaternário (Terraço Inferior), com desnível de aproximadamente 25m. Ponto estudado (ST15) localizado no mapa da Figura 9.




Figura 16.Seção panorâmica mostrando lajedos e blocos de crosta laterítica no topo da unidade neógena aflorante, sustentando o relevo elevado da borda leste do GPA. Ponto estudado (ST01) localizado no mapa da Figura 9.




Figura 17. Seção panorâmica mostrando o relevo plano no limite oeste do GPA, sem quebra negativa evidente. Ponto estudado (ST24) localizado no mapa da Figura 9.

Dados geomorfológicos de superfície, que inclui também os limites estruturais leste e oeste do GPA, integrados ao contexto estratigráfico de subsuperfície, permitiram definir uma conformação de *hemigraben* para a depressão tectônica, com caimento para E-NE (Figura 18). Os dados geológicos-geofísicos (Figuras 19, 20 e 21) atingiram profundidade de até 66m e permitiram definir a maior profundidade da depressão na porção leste, onde o limite basal do substrato atinge aproximadamente 60m de profundidade (Figura 20, SA-06), o qual ascende suavemente até aflorar na porção oeste (Figura 19, Furo 03;Figura 20, SA-01;Figura 21, SEV´s 01 e 07). O assoalho da depressão é marcado por contato brusco entre as unidades neógena e quaternária, por vezes, bem marcado por nível espesso de crosta laterítica, definido

nos furos de sondagem, perfis litológicos de poços e SEV's (valores elevados de resistividade entre 7782 e 14876 ohm.m) (Figuras 19, 20, 21, 22, Tabela 1). Em determinados locais o assoalho da depressão mostra-se basculado, com deslocamento associado a falhas normais, bem evidente na borda NE, sendo determinante para a feição de *hemigraben* (Figura 18).

No preenchimento do GPA foram individualizadas duas unidades de sedimentação, ainferior, predominantemente areno-siltico-argilosa, com espessura variando entre 10 e 30m e, a superior, predominantemente argilo-siltico-arenosa, com espessura entre 15 e 38m, identificadas na seção geológica da Figura 18.

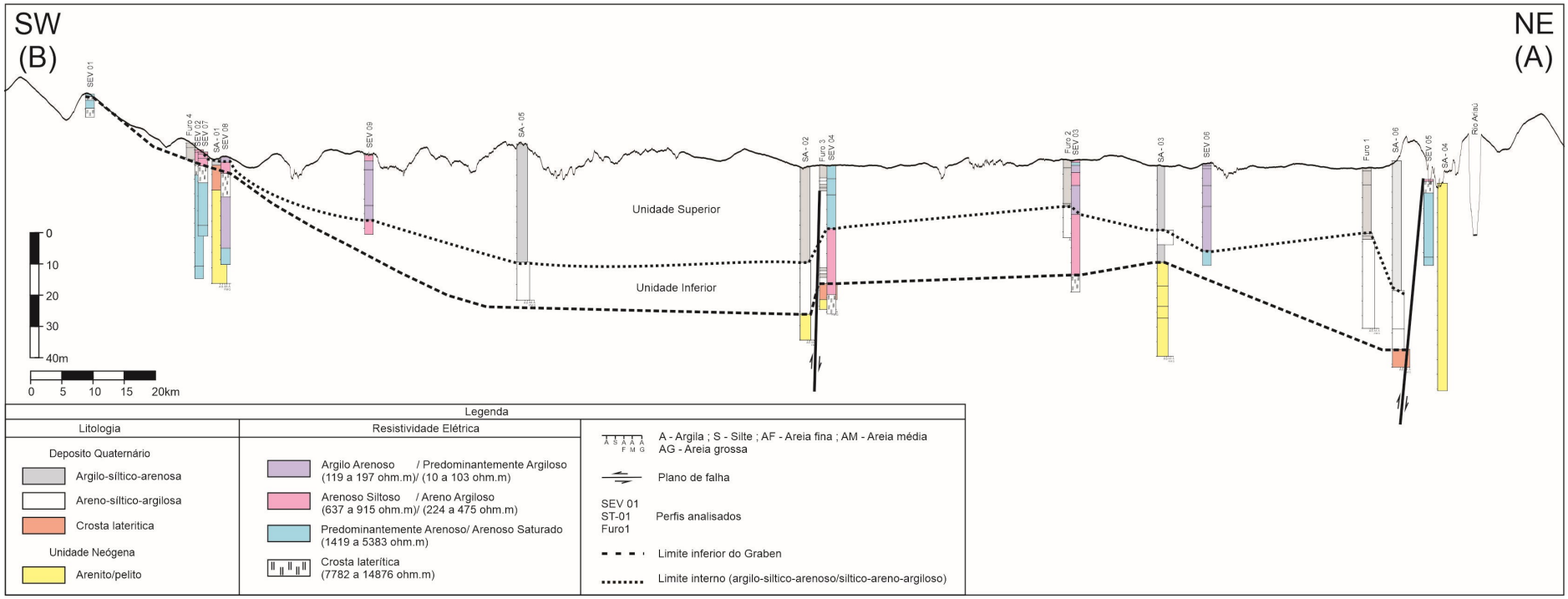



Figura 18. Seção geologica B- A confeccionada a partir das seções colunares de 09 SEV's (SEV 01 a SEV 09), 04 furos de sondagem rotativa (Furos 1 a 4) e 06 perfis litológicos de perfuração de poços (SA - 01 a SA - 06) (Fonte: CPRM/SIAGAS - http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_coordenada.php). Ênfase é dada a inclinação do substrato da depressão para E-NE (linha tracejada preta) e a individualização de duas unidades deposicionais Superior e Inferior (linha pontilhada preta). Seção identificada naFigura 10.

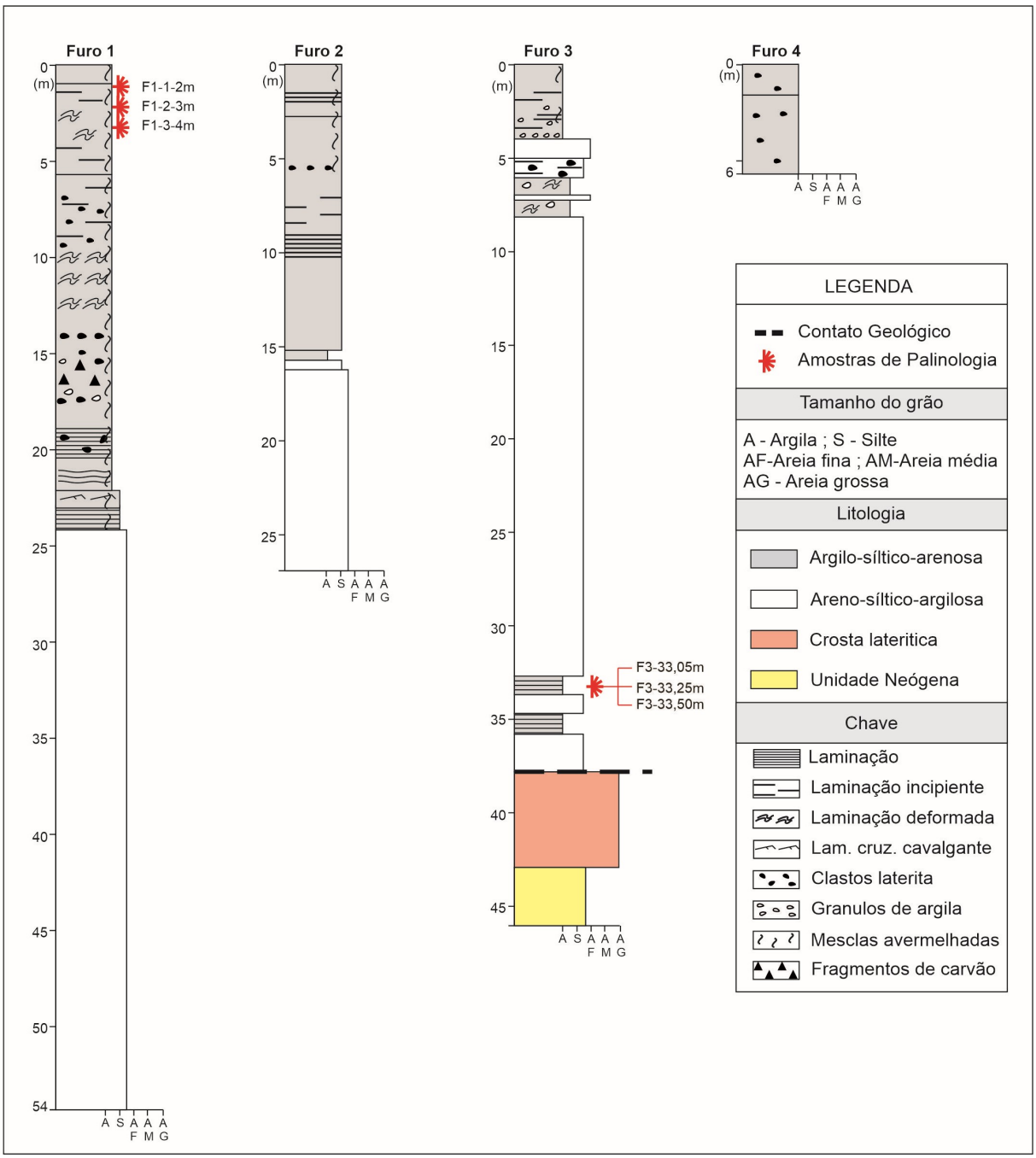



Figura 19. Seção colunar dos furos de sondagem 1, 2 3 e 4 no GPA, com a definição da granulometria e estruturas sedimentares dos depósitos quaternários. Particularmente, no furo 3 foi possível definir a relação de contato dos depósitos quaternários com a unidade neógena, marcado por nível de crosta laterítica. Os pontos vermelhos representam os locais de coleta para análise palinológica. Seções identificadas nas Figuras 10 e 18.

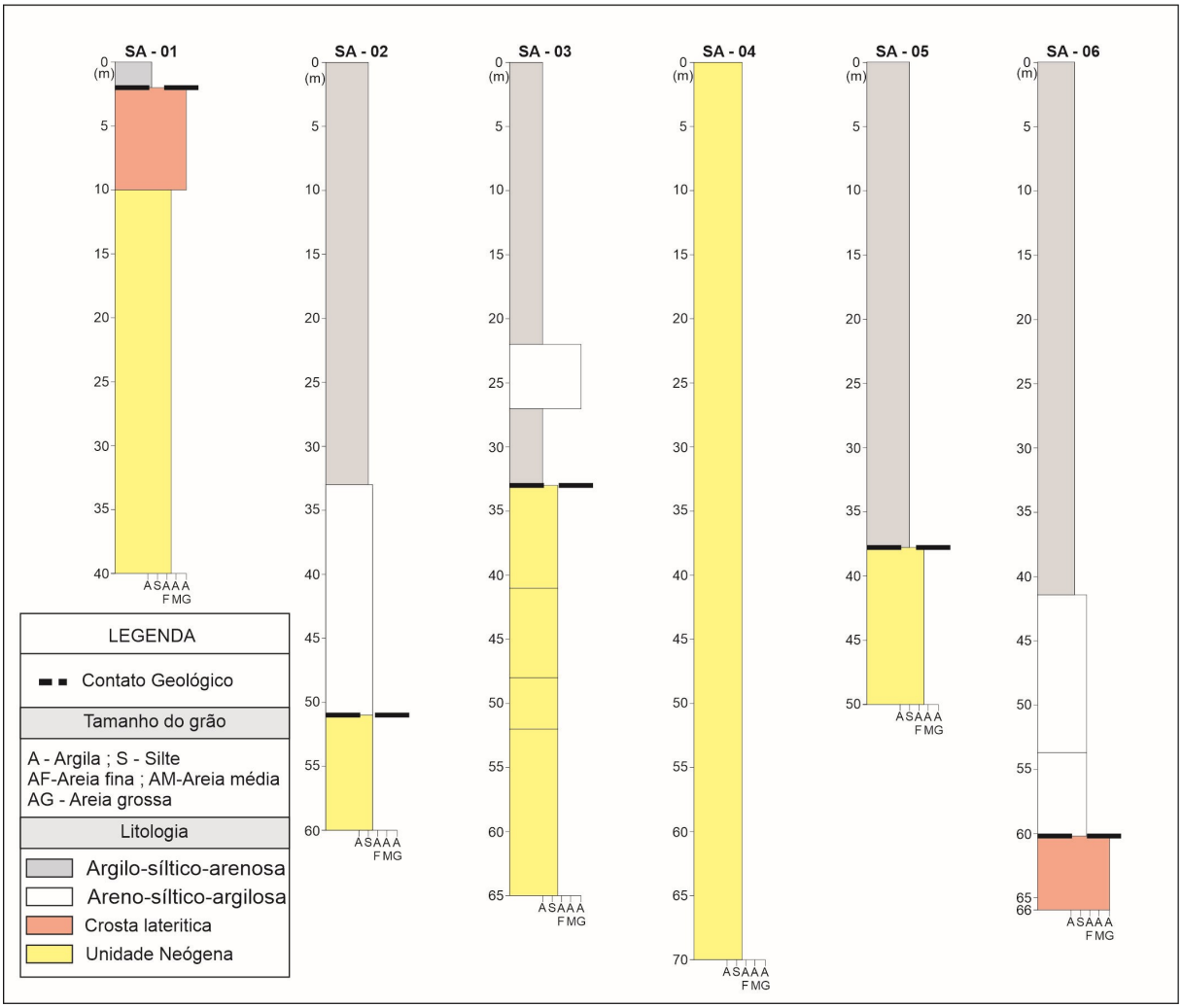



Figura 20. Seção colunar dos perfis litológicos de perfuração de poços (siglas SA 1, 2, 3, 4, 5 e 6) no GPA, com a individualização de 02 litofácies sedimentares quaternárias, definidas como “argilo-síltico-arenoso” e “areno-siltico-argiloso” limitados na base (tracejado preto) pela unidade neógena e crosta laterítica. Fonte: Logs de poços (CPRM/SIAGAS - http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_coordenada.php). Seções identificadas nas Figuras 10 e 18.

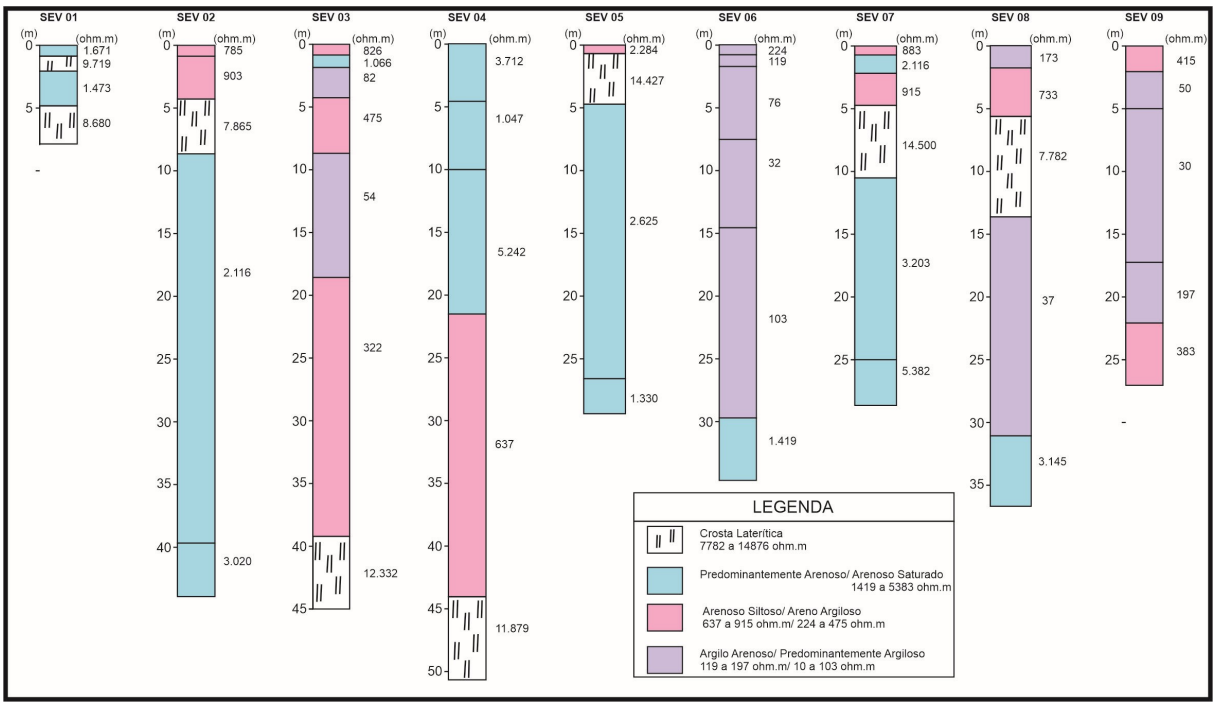



Figura 21. Seções colunares com dados de eletrorresistividade das camadas obtidas por SEV's (01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08 e 09) no GPA, com destaque para os níveis métricos de crosta laterítica. Seções identificadas nas Figuras 10 e 18.

Tabela 1 Tabela simplificada com dados interpretados das sondagens elétricas, em função da profundidade em metro (Pn) e resistividade elétrica em ohm.m (rn) das camadas geoelétricas (n=1, 2, 3, 4, 5 e 6).

| SEV | $P_1$ | $r_1$ | $P_2$ | $r_2$ | $P_3$ | $r_3$ | $P_4$ | $r_4$ | $P_5$ | $r_5$ | $P_6$ | $r_6$ | $P_7$ | $r_7$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SEV-1 | 0,0 | 1671 | 0,9 | 9719 | 2.0 | 1473 | 4.9 | 8680 | | | | | | |
| SEV-2 | 0,0 | 785 | 0.9 | 903 | 4.1 | 7865 | 8,8 | 2116 | 40.1 | 3020 | | | | |
| SEV-3 | 0,0 | 826 | 0.9 | 1066 | 1.9 | 82 | 4.1 | 475 | 8.8 | 54 | 18.7 | 322 | 10.0 | 12332 |
| SEV-4 | 0,0 | 3712 | 4.5 | 1047 | 10.0 | 5242 | 21.7 | 637 | 44.1 | 11879 | | | | |
| SEV-5 | 0,0 | 2284 | 0.9 | 14427 | 4.9 | 2625 | 26.7 | 1330 | | | | | | |
| SEV-6 | 0,0 | 224 | 0,9 | 119 | 1.8 | 76 | 7.4 | 32 | 14.9 | 103 | 30,0 | 1419 | | |
| SEV-7 | 0,0 | 883 | 0.9 | 2116 | 2.1 | 915 | 4.7 | 14876 | 10.9 | 3203 | 25.0 | 5382 | | |
| SEV-8 | 0,0 | 173 | 1.8 | 733 | 5.4 | 7782 | 13.3 | 37 | 31.0 | 3145 | | | | |
| SEV-9 | 0,0 | 415 | 2.0 | 50 | 10.0 | 30 | 22.4 | 197 | 27.3 | 383 | | | | |

| LEGENDA | |
|---|---|
| | Valor de Resistividade correspondente Crosta laterítica (entre 7782 e 14876) |
| | Valor de Resistividade correspondente a conteúdo predominantemente arenoso (entre 1419 e 5383ohm.m) |
| | Valor de Resistividade correspondente a conteúdo areno-siltoso (637 e 915ohm.m) |
| | Valor de Resistividade correspondente a conteúdo areno-argiloso ou silte-argiloso (224 e 475ohm.m) |
| | Valor de Resistividade correspondente a conteúdo argilo-arenoso (119 e 197ohm.m) |
| | Valor de Resistividade correspondente a conteúdo predominantemente argiloso (30 e 103ohm.m) |

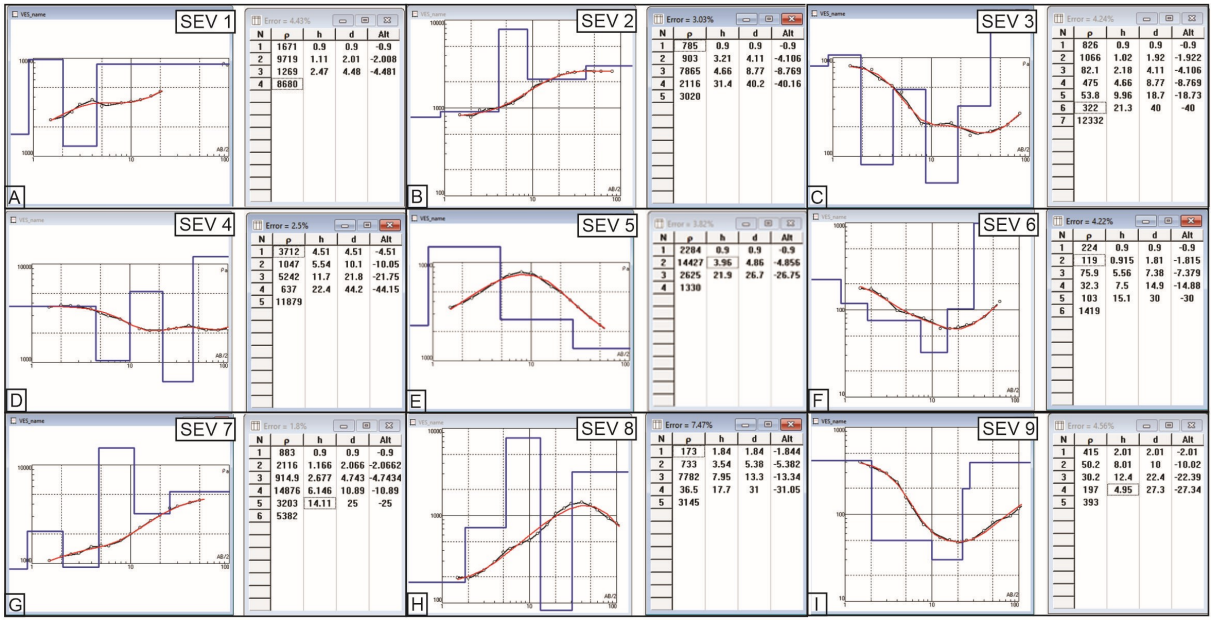



Figura 22. Curvas de resistividade aparente obtidas por meio dos valores calculados para as profundidades e resistências das camadas geoeléticas das SEV's.

Dados de resistividade elétrica das SEV's, também expresso na Tabela 1, foram utilizados de forma complementar aos dados litológicos e representam o resultado da modelagem das curvas de resistividade aparente obtidas a partir dos valores de resistividade elétrica e profundidades das respectivas SEV's (Figura 21). Nesse contexto, as camadas geoelétricas foram interpretadas e identificadas como depósitos argilosos-siltosos (10 a 197 ohm.m), depósitos siltico-argilo-arenosos (224 a 5383 ohm.m) e crosta laterítica (7782 a 14876 ohm.m).

### 6.2.2 PALINOLÓGIA DE FUROS DE SONDAGEM.

Dados palinológicos foram obtidos de trechos dos furos 1 (1-2m, 2-3m e 3-4m) e 3 (33,05m, 33,25m e 33,50 m) do GPA (Figura 19). Os intervalos analisados do furo 1 mostraram-se estéreis, em função da coloração cinza-rosada (oxidação), enquanto os do furo 3 apresentaram assembleia composta de pólens e esporos, predominantemente de gramínea associados aos de palmeira de buriti, além de pólens e esporos de origem andina (Figura 23).

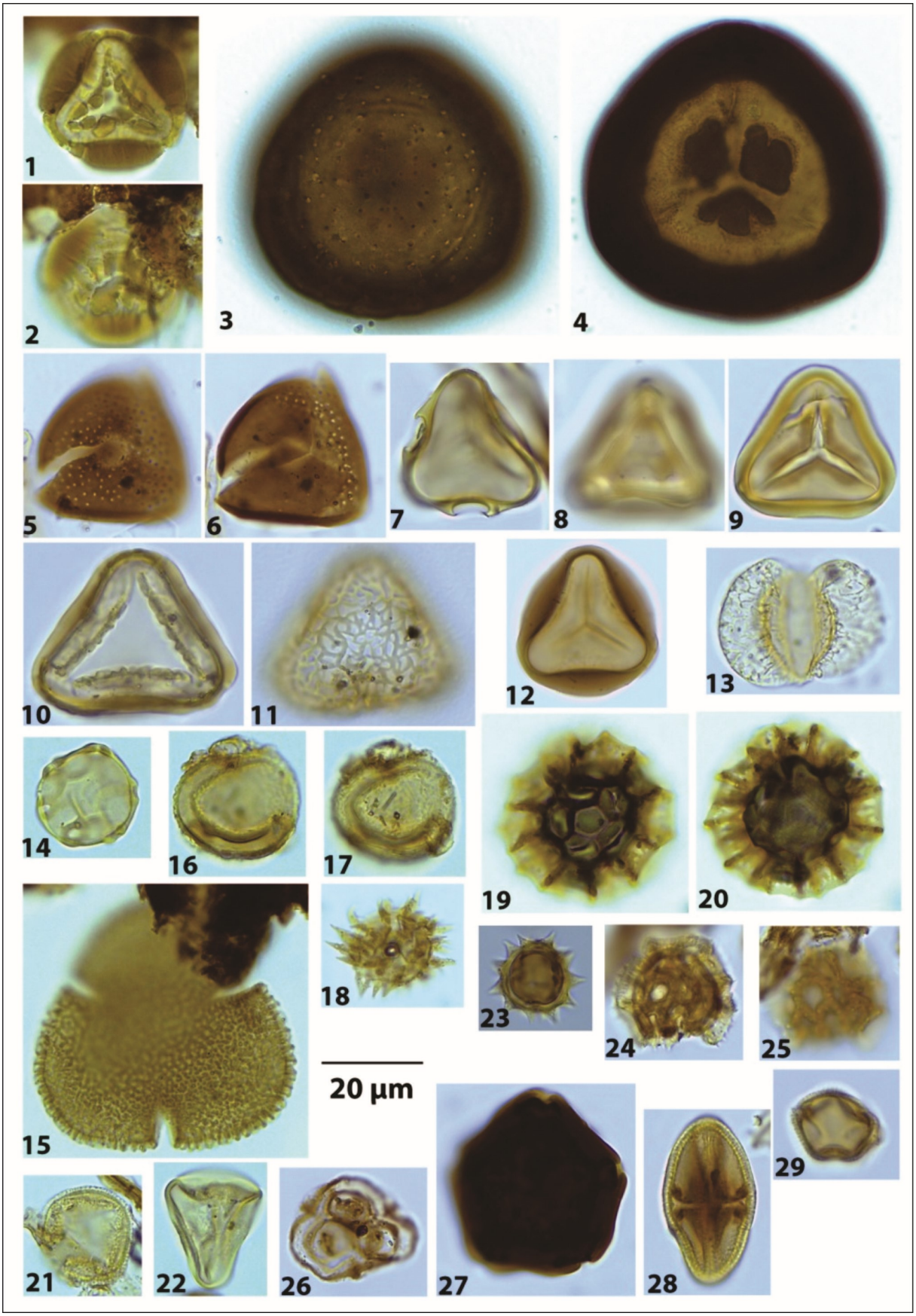



Figura 23. Pólen e esporos selecionados de: 1-2) Camarozonosporitestrilobactus D'Apolito et al., 2021; 3-4) CyatheaciditesannulatusCookson 1967; 5-6) FoveotriletesornatusRegali et al., 1974; 7) KuylisporiteswaterbolkiiPotonié 1956; 8-9) Polypodiaceoisporitespseudopsilatus Lorente 1986; 10-11) Polypodiaceoisporites? amazonensis Silva-Caminha et al., 2010; 12) PsilatrileteslobatusHoorn 1994b; 13)

Podocarpidites sp.; 14) Alnipollenitesverus (Potonié 1931) exPotonié 1934; 15) Bombacaciditesciriloensis Muller et al., 1987; 16-17) Byttneripollisrugulatus D'Apolito et al., 2021; 18) Cichoreaciditeslongispinosus (Lorente 1986) Silva-Caminha et al., 2010; 19-20) Cichoreacidites? igapoensis D'Apolito et al., 2019; 21) Clavainaperturitesmicroclavatus Hoorn 1994b; 22) Cyperaceaepollenites "rotundus" (informal from Gomes et al., 2021); 23) Echitricolporitesspinosus Van der Hammen 1956; 24-25) Fenestritesspinosus Van der Hammen 1956; 26) Loranthacites "oryctanthusis" (informal from Jaramillo et al., 2014); 27) PachydermitesdiederixiGermeraad et al., 1968; 28) Paleosantalaceaepitescingulatus Jaramillo et al., 2010; 29) Rhoipites manausensis D'Apolito et al., 2019.

## 6.3 CONTEXTO ESTRUTURAL DAS DEPRESSÕES TECTÔNICAS

Diversos estudos (Franzinelli & Igreja, 1990; Costa et al., 1996; Fernandes Filho et al., 1996; Franzinelli et al., 1999; Igreja et al., 1999; Almeida Filho et al., 2005; Silva et al., 2007; Franzinelli & Igreja, 2011; Igreja, 2012) associam o controle estrutural da Amazônia a um Sistema Neotectônico Transcorrente Dextral (SNTD), que resultou no desenvolvimento de *hosts* e *grabens*, com basculamentos associados (*hemigraben*). O SNTD sugerido pelos autores é compatível com as principais estruturas encontradas na Amazônia Central-Ocidental, que é responsável pelo desenvolvimento das depressões tectônicas, em várias regiões da Amazônia, incluindo a zona de confluência dos rios Negro e Solimões, conforme destacado por Franzinelli & Igreja (2002), Franzinelli (2011) e Ibanez et al. (2014).

As falhas e lineamentos estruturais fotointerpretados na zona de confluência dos rios Negro e Solimões apresentam direções preferenciais NW-SE, NE-SW e E-We são concordantes com as zonas de cisalhamento que compõe os cinturões de cavalgamento e transcorrências, descrita por Almeida (1974), na região da fronteira tríplice Brasil-Peru-Colômbia, que definem traços fundamentais da estruturação crustal e zonas de fraqueza potencialmente favoráveis a reativação e desenvolvimento dos processos geológicos. No contexto regional é possível verificar que o sistema de drenagem está implantado em zonas de falhas e fraturas, que seguem os principais alinhamentos estruturais (Franzinelli & Igreja, 1990; Costa et al., 1996; Franzinelli et al., 1999; Igreja et al., 1999; Franzinelli & Igreja, 2011; Igreja, 2012).

Particularmente, Soares et al. (2010) interpretam que as feições estruturais associadas ao desenvolvimento das depressões tectônicas na Amazônia Central tiveram origem a cerca de 400.000 anos (Pleistoceno), com a reativação de falhas de direção geral NW-SE no substrato Neógeno, além de esforços distensionais de direção NE-SW. O desenvolvimento das depressões (GPA, GCC, GCP e GLM) pode ser associado ao contínuo basculamento dos assoalhos para E-NE, que possibilitou a deposição de terraços fluviais a partir da migração de canais secundários meandrantes e, consequentemente, deposição de barras em pontal, conforme registros das feições morfológicas deposicionais e dados geocronológicos.

Existem diferenças quanto aos tipos e orientações dos padrões de drenagem desenvolvidossobre áreas do embasamento Neógeno e unidades sedimentares quaternárias dasdepressões, sendo que em ambos, ocorrem anomalias associadas a quebras em “cotovelo”, que podem ser associadas a diferenças litológicas e a presença de falhas e fraturas. Com ênfase nos padrões de drenagens que refletem o controle estrutural regional nas direções NW-SE, NE-SW e E-W, destaca-se padrão subdendrítico sobre o embasamento e os padrões subdendrítico e festonado no GPA.

O alinhamento estrutural do trecho inferior do Rio Negro com os limites oeste e leste do GPA, na direção preferencial NW-SE (Figura 24), permitiu inferir a suposição de que essa depressão represente uma feição de palocanal do Rio Negro (Silva et. al., 2007; Silva & Rossetti,2009; Rossetti et al. 2023). Nesse sentido, esses autores ainda sugerem que a zona de confluência do Rio Negro com o Rio Solimões ocorria cerca de 50 km a jusante da atual localização (Figura 25). Neste contexto, análise de imagens de radar permitiram definir feições morfológicas curvadas e ramificadas na região dos rios Jaú e Mancapuru, as quais foram também interpretadas como peloacanais do Rio Negro, desenvolvidas por atividade neotectônica (Almeida-Filho et al., 2005; Almeida-Filho & Miranda, 2007; CPRM 2010; Rossetti et al., 2023) (Figura 25).

De forma complememtar, análises de proveniência sedimentar realizados por Soares (2007) e Santos et al. (2015) nos depósitos quaternários da zona de confluência dos rios rios e Solimões, utilizando o método de Ativação de Nêutrons, permitiu a comparação de dados químicos das depressões GPA (Depressão 1), GCP (Depressão 2), GCC (Depressão 3) e GLM (Depressão 4). Os dados comparativos entre os sedimentos do GPA (TS e TI) e do GCP e GCC indicam divergência química, fato que sugere fontes de contribuição diferentes (Figura 26, detalhe A), enquanto, dados comparativosdos sedimentos do GPA (TS e TI) e GLM indicam uma semelhança química parcial, que sugere mesma fonte sedimentar (Figura 26, detalhe B). Na comparação geral, os sedimentos do GPA mostram maior “afinidade química” com os do GLM, que divergem dos depósitos do GCP e GCC (Figura 26 detalhe C). Esse fato indica uma maior influência do Rio Solimões no preenchimento sedimentar do GPA e GLM, enquanto o Rio Negro teve maior influência da sedimentação do GCP e GCC.

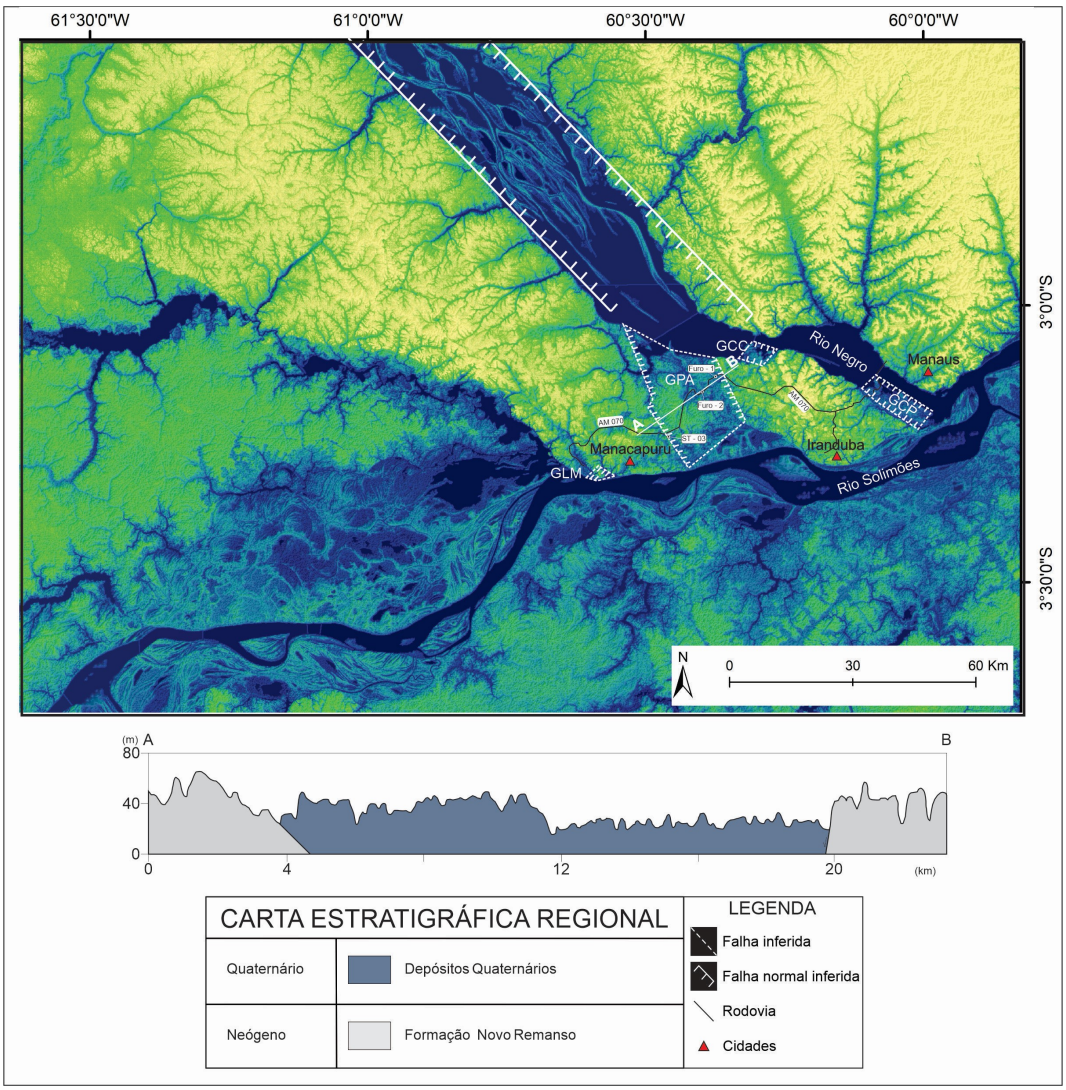



Figura 24. Controle estrutural do curso inferior do Rio Negro, com destaque para as delimitações das depressões tectônicas (GPA, GCC, GCP e GLM) seguindo o padrão estrutural do estudo de Soares (2007). A seção A-B, obtida por imagem SRTM, mostra os aspectos topográficos e limites da depressão GPA.

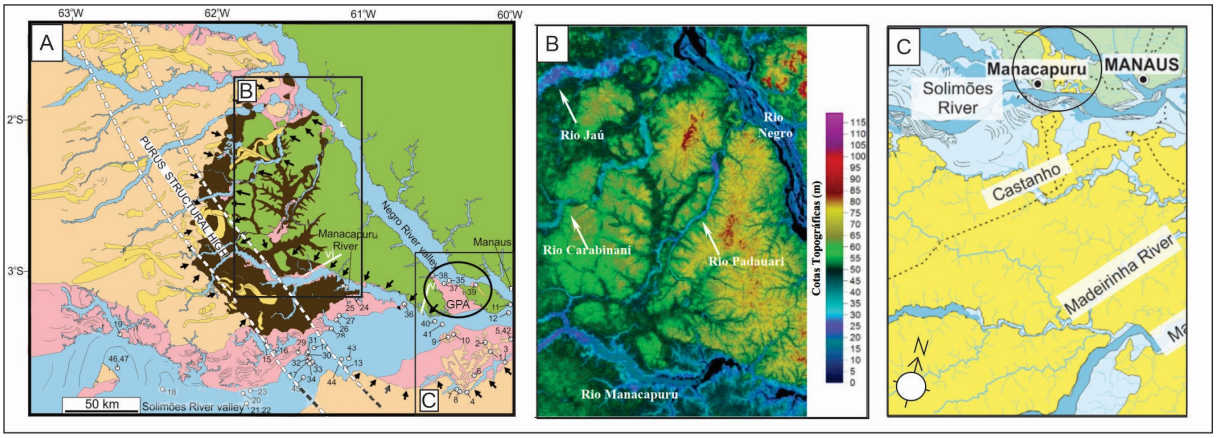



Figura 25. Feições de paleocanais do Rio Negro, entre os rios Jaú e Manacapuru (coloração marron) e no GPA (círculo) (Detalhe A, modificado de Rossetti et. al., 2023). Feições de paleocanal na região dos rios Jaú e Manacapuru, em imagem SRTM (Detalhe B, segundo Almeida-Filho et al., 2005). Indicação do paleocanal do Rio Negro no mapa da CPRM (2010) (círculo no Detalhe C).

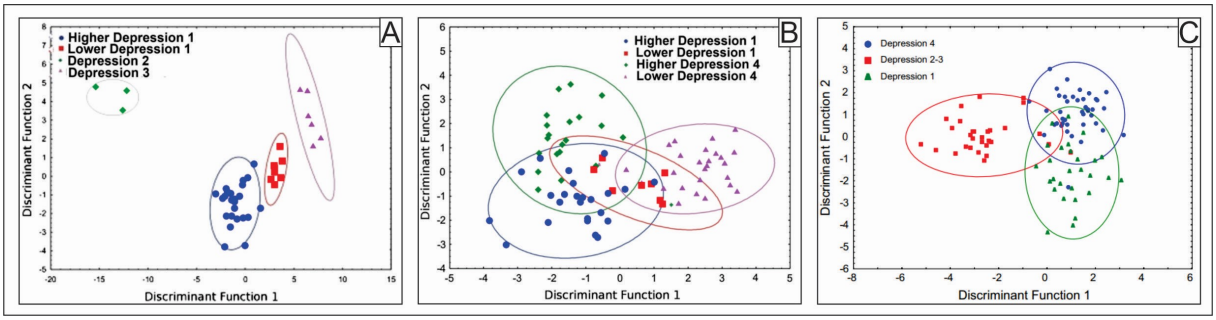



Figura 26. Análise química comparativa entre os sedimentos superficiais das depressões GPA (Depression 1), GCP (Depression 2), GCC (Depression 3), GLM (Depression 4). O detalhe A apresenta uma comparação entre os sedimentos do GPA (TS e TI), do GCP e GCC, o detalhe B compara os sedimentos do GPA (TS e TI) e do GLM e o detalhe Ccompara os sedimentos das 04 depressões. Fonte: Santos et al. (2015)

## 6.4 MODELO DEPOSICIONAL DO GPA,

Com base nos dados geológicos, geofísicos, geocronológicos e geoquímicos (Ativação de nêutrons) é proposto neste estudo um modelo de evolução tectono-sedimentar para a depressão GPA. A instalação da mesma sobre o substrato Neógeno ocorreu por volta de 400.000 anos (Figura 27, estágio 1), em função de processos neotectônicos, representados por falhas/fraturas. Com a evolução gradual das falhas, ocorreu o basculamento inicial do substrato para E-NE, que resultou na feição de *hemigraben*, cujo preenchimento começa com a deposição da unidade inferior, predominantemente areno-siltosa, por influência da dinâmica dos rios Negro e Solimões (Figura 27, estágio 2). Nesta unidade, a presença local de pólens e esporos de vegetação gramínea e palmeira de buritiindicam o desenvolimento de área de várzea nos arredores da depressão, enquanto a presença de pólens e esporos de origem Andina permitem vincular o preenchimento ao aporte sedimentar parcial do Rio Solimões. A contínua reativação das falhas e, consequente aprofundamento da depressão para E-NE, bem como a elevação lateral dos blocos a norte e sul, permitiu a instalação do Rio Ariaú nos limites do GPA, inicalmente na porção oeste. O padrão meandrante deste rio, que predominou entre 260.000 e 53.000 anos, é evidente em função das feições morfológicas superficiais de barras acrescionárias com EHI do terreaço superior (Figura 27, estágios 3 e 4). Finalmente, com a contínua migração do Rio Ariaú para leste, entre 13.000 anos até o recente, ocorreu o aprofundamento e desenvolvimento do terraço inferior, que corresponde a planície aluvial ativa do GPA. Sobre o terraço superior abandonado, principalementena porção central e oeste da depressão, começou a se instalar vegetação de pequeno e médio porte, bem como a atuação dos processos de dissecação e pedogênese (Figura 27, estágios 5 e 6). A nova fase de agradação e desenvolvimento do terraço inferior do Rio Ariaú, segue o contorno da borda

leste, sendo limitado por rochas do substrato Neógeno. Nesse terraço, ocorrem cordões arenosos acrescionários, além de feição deltaica alongada que se desenvolve onde o Rio Ariaú desagua na Bacia do Rio Negro.

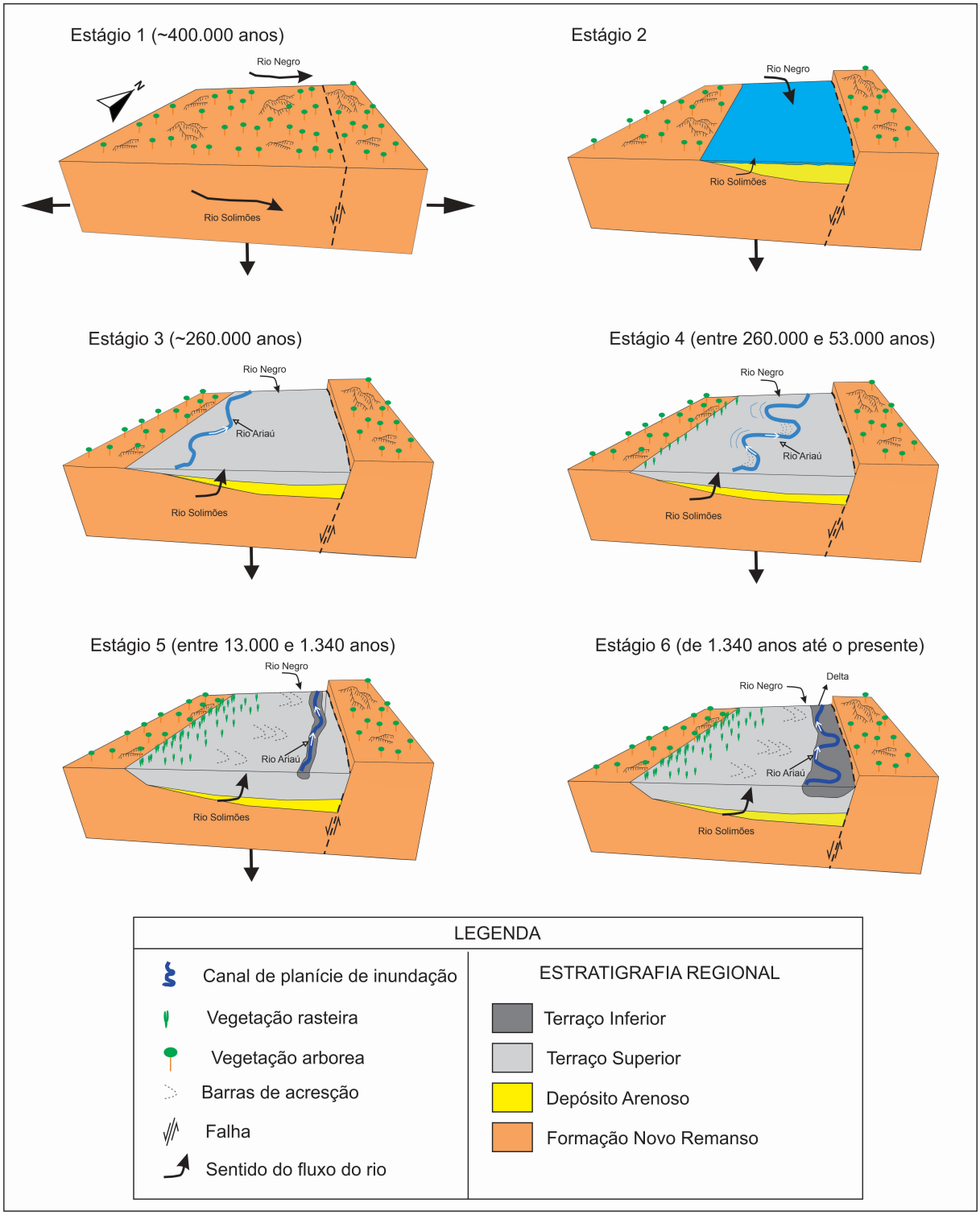



Figura 27. Bloco diagrama esquemático ilustrando as etapas de desenvolvimento tectono- sedimentar do GPA, na zona de confluência dos rios Negro e Solimões.

# 7. CONCLUSÕES

Neste estudo, análises estruturais obtidas de produtos de sensores remotos (Satélite e Radar), integrados a dados geocronológicos (LOE) permitiram inferir os principais limites das depressões tectônicas no substrato Neógeno, bem como o posicionamento temporal das fases de preenchimento sedimentar. Dados geológicos de superfície permitiram definir 02 unidades de terraços fluviais (Superior-TS e Inferior-TI). Entretanto, dados geocronológicos (LOE) inéditos (27 análises) desse estudo, permitiram posicionar o intervalo temporal de sedimentação do TS (inativo), que ocorre nas depressões GPA, GCP, GCC e GLM, entre 303.900 a 25.732 anos, ampliando o intervalo anteriormente proposto por Soares (2007) e Soares et al. (2010), entre 65.000 e 44.700 anos. Particularmente, a sedimentação das barras e feição deltaica do TI (ativo) do GPA ocorreu entre 3.600 a 1.340 anos e mostra-se contínua até o recente, com o crescimento da feição deltaica adentrando a Bacia do Rio Negro. Esse intervalo temporal pode ser englobado ao intervalo de 13.000 a 8.900 anos proposto por Soares (2007) e Soares et al. (2010), para os depósitos do TI do GPA

Em geral, os dados geocronológicos indicam diminuição de idade, da porção oeste para leste do GPA, corroborando com a interpretação da migração assimétrica dos terraços superior e inferior em função do meandramento do Rio Ariaú nessa direção durante o Pleistoceno-Holoceno. A sedimentação do GCC e GCP foi associada a sistemas fluviais meandrantes restritos em bacias isoladas, influenciados pela variação sazonal do Rio Negro. A contínua migração desses sistemas para N-NE é evidente em função dos deslocamentos das linhas de acresção (possivelmente influenciadas por neotectônica) e diminuição das idades nessas direções.

Nesse estudo, dado geocronológico (LOE) inédito permitiu definir a idade de 52.446 anos para a sedimentação da porção central do GLM, a qual pode ser associada ao intervalo temporal proposto para a sedimentação do TS das demais depressões. No GLM os dados sedimentológicos e geocronológicos ainda são insuficientes para uma avaliação tectono-sedimentar mais profunda.

Dados geológicos, geofísicos e palinológicos de furos de sondagem obtidos nesse estudo, permitiram obter informações sobre as contribuições dos influxos sedimentares dos rios Negro e Solimões no preenchimento do GPA, no limite Pleistoceno-Holoceno. Possivelmente, a unidade inferior desta depressão, predominantemente areno-siltosa, pode ser associada a maior contribuição de influxo sedimentar do Rio Negro em relação ao Solimões, fato que permite associar essa feição estrutural a um provável paleocanal desse rio. A unidade

superior do GPA, predominantemente argilo-siltosa, pode ter maior contribuição do influxo do Rio Solimões, que controlou a dinâmica de sedimentação da planície aluvial do Rio Ariau durante seu desenvolvimento.

## 8. REFERÊNCIAS


ALBUQUERQUE, O. R. Reconhecimentos geológicos no vale do Amazonas. Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. Rio de Janeiro, n. 19, p. 15-56, 1922.

ALMEIDA PINTO, W. H. A. & LUCHIARI, A. Uso das imagens SAR R99B para mapeamento geomorfológico do canal do Ariaú no município de Iranduba-AM. Revista de Geografia (Recife) v. 34, p. 209-229, 2017

ALMEIDA, L.F.G. A drenagem festonada e seu significado fotogeológico. In:CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. v. 28, 1974, Porto Alegre. Resumo das Comunicações. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Geologia. p. 274-276. 1974.

ALMEIDA-FILHO, R.; MIRANDA, F. P. ; BEISL, C. H. . Evidência de uma mega captura fluvial no Rio Negro (Amazônia) revelada em modelo de elevação digital da SRTM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. São Jose dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. p. 1701-1710. 2005

ALMEIDA-FILHO, R.; MIRANDA, F. P. Mega capture ofthe Rio Negro andformationofthe Anavilhanas Archipelago, Central Amazônia, Brazil: Evidences in an SRTM digital elevation model. Remote Sensing of Environment, v. 110, p. 387-392, 2007. doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.005.

ANTONIOLI, L. et al. New Methodof Rock Samples Preparation for PalynologicalandPalynofaciologicalAnalysis. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v.43, v. 1, p. 339-345, 2020. doi.org/10.11137/2020_1_339_345

BARBOSA, Rogério Oliveira. Estudos sedimentológicos e estratigráficos dos depósitos sedimentares quaternários do Arquipélago de Anavilhanas, município de Novo Airão (Amazônia Central) 2015. Dissertação (Mestrado em Geociências), Departamento de Geociências - Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2015.

CAPUTO, M.V., RODRIGUES, R., VASCONCELOS, D.N.N. Litoestratigrafia da Bacia do Amazonas. Relatório interno, PETROBRÁS. (641-A): p 99, 1972.

CAPUTO, Mário Vicente. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil. 1984. Tese (Doutorado em Geologia). Universidade da Califórnia, Santa Bárbara, Canadá. 1984.

CESAR, R. G.; SOARES, E. A. A. Sedimentação quatérnária em depressões tectônicas na zona de confluência dos rios Negro e Solimões, Amazônia central. In: XV CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA E ESTUDOS DO QUATERNÁRIO - ABEQUA, 2015, Tramandaí - IMBÉ (RS).

CESAR, Rafael Guedes. Análise Estratigráfica de 3 depressões tectônicas da margem direita do Rio Negro, por meio de dados geológicos e geofísicos. 2015 PIBIC (Projeto de iniciação Científica PIB-E/0025/2014) Departamento de Geociências - Universidade Federal do Amazonas, Manaus. 2015.

COSTA, J. B. S. et al. Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. Geonomos, Minas Gerais, v. 4, n. 2, p. 23-44, 1996.

CPRM, Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus, Estado do Amazonas, escala de integração 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Brasília: Ministério de Minas e Energia/CPRM/Serviço Geológico do Brasil. 2016.

CPRM, Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. (site) Disponível na Internet em 01 de novembro de 2020 no site http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/index.php.

CPRM. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas, Programa Geologia do Brasil. Brasília: Ministério de Minas e Energia/CPRM/Serviço Geológico do Brasil. 2006.

CUNHA, P. R. C.; GONZAGA, F. G.; COUTINHO, L. F. C. Bacia do Amazonas. Boletim de Geociências da Petrobras. Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 47-55, 1994.

CUNHA, P. R. C.; MELO, J. H. G.; SILVA, O.B. Bacia do amazonas. In: BOLETIM DE GEOCIÊNCIAS DA PETROBRÁS. v. 15, 2007, Rio de Janeiro, v.15, n. 2, p. 227-251. 2007.

D'APOLITO C, JARAMILLO C, HARRINGTON G. Miocenepalynologyofthe Solimões Formation (well 1-AS-105-AM), western Brazilian Amazonia. Smithsononian Contributions to Paleobiology. v.105, 134p. 2021.

D'APOLITO C. et al. The Pliocene–PleistocenePalynologyofthe Negro River, Brazil. Palynology, v. 43 p. 223–243. 2019.

DAEMON, R. F. & CONTREIRAS, J. A. Zoneamento palinológico da Bacia do Amazonas. In: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 25, 1971. São Paulo, Anais, v. 3, p.79-88, 1971.

DINO, R. et al. Palynostratigraphy and sedimentary fácies of miocene fluvial depositsof the Amazonas Basin, Brazil. Journalof South American Earth Sciences. v. 34, p. 61-80. 2012.

DINO, R., SILVA, O. B, ABRAHÃO. Palynostratigraphic characterization of the Cretaceous strata from the Alter do Chão Formation, Amazonas Basin. In: SBG,

INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, Rio de Janeiro, Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, 2000. (CD ROM).

DINO, R.; SILVA, O.B.; ABRAHÃO, D. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, Rio Claro. Boletim de resumos expandido, p. 557 – 565. 1999.

FERNANDES FILHO, L.A.; COSTA, J. B. S.; COSTA, M. L. Bacia de Manaus: uma estrutura pull-apart do Quaternário. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS. n. 5 Gramado. Boletim de resumos expandidos. Gramado SBG/RS e CPGQ/UFRGS, p. 419-420. 1995.

FIORE, M.et. al. OSL dating of sediments from Negro and Solimões rivers - Amazon, Brazil. Radiat. Phys. Chem. v. 95, p. 113–115, 2014.

FRANZINELLI, E. & IGREJA, H.L.S. Modern Sedimentation In The Lower Negro River, Amazonas State, Brazil. Geomorphology, v. 44, n. 3, p. 259-71, 2002.

FRANZINELLI, E. Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil). Revista Brasileira de Geociencias, v. 41, n. 4, p. 587-596, 2011a.

FRANZINELLI, E., IGREJA, H. L. S., Ponta das Lajes e o Encontro das Águas, AM - A Formação Alter do Chão como moldura geológica do espetacular Encontro das Águas Manauara In: Winge, M., Schobbenhaus, C., Souza, C.R.G., Fernandes, A.C.S., Berbert-Born, M., Sallun Filho, W., Queiroz, E.T. (Edit.) SÍTIOS GEOLÓGICOS E PALEONTOLÓGICOS DO BRASIL. Publicado na Internet em 29/11/2011 no endereço http://sigep.cprm.gov.br/sitio054/sitio054.pdf. Acesso em 27 jun. 2022.

FRANZINELLI, E., IGREJA, H., REPOLHO, T. Fragmentation of Ecosystem Owingto neotectonics in the AmazonBasin. Science Reports of Tohoku University, 7th (Geography), Japão. Special Issueon GLOCOPH'98. Vol 49, n° 2. 1999.

FRANZINELLI, E.; IGREJA, H.L.S. Utilização do sensoriamento remoto na investigação na área do Baixo Rio Negro e Grande Manaus. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), n. 6, Manaus. Anais. v. 3, p. 641-648. 1990. CD-ROM.

GONÇALVES JÚNIOR, E S. et al. Pleistocene-Holocenese dimentation of Solimões-Amazon fluvial system between the tributaries Negro and Madeira, Central Amazon. Brazilian Journal of Geology, v. 46 n. 2, p. 167-180, 2017.

HAYAKAWA, E.H.; ROSSETTI, D.F.; VALERIANO, M.M. Applying DEM-SRTM for reconstructing a late Quaternary paleodrainage in Amazonia. Earth and Planetary Science Letters, p. 262-270, 2010.

HOORN, C. Na environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (Middle-Late Miocene, NW Amazonia), Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 112, p. 187-238. 1994b.

HORBE, A.M.C. et. al. Environmental changes in the western Amazonia: morphological framework, geochemistry, palynology and radiocarbon dating data. Anais Academia Brasileira de Ciências v. 83, n. 3, p. 863–874, 2011.

IBANEZ, D. M., RICCOMINI, C., MIRANDA, F. P. Is the current stress state in the Central Amazonia caused by surface waterloading? Journal of South American Earth Sciences, v. 55, p. 19-28, 2014.

IGREJA, H. L. S. A neotectônica e as mudanças hidrogeológicas do sistema fluvial Solimões-Amazonas: "Encontro das águas de Manaus – EAM" – Amazonas, Brasil. Revista Geonorte, Edição Especial, v. 2, n. 4, p.20-32, 2012.

IGREJA, H. L. S., FRANZINELLI, E., REPOLHO, T. Neotectonic influence on fluvial capture in the Amazon Basin, state of Amazonas, Brazil. GLOCOPH '98 Abstract of conference papers, p. 85-86. 1999.

JARAMILLO C. & RUEDA M. A Morphological Electronic Database of Cretaceous-Tertiary and Extantpollen and Spores from Northern South America. 2021. http://biogeodb.stri.si.edu/jaramillosdb/web/morphological/.

JARAMILLO, C. et al. Palynological Record of the last 20 Million years in Panama. In: Stevens, W. D., Montiel, O. M. and Raven, P., editors. (Org.). Paleobotany and Biogeography: A Festschrift for Alan Graham in His 80th Year. 1 ed.St Louis: Missouri Botanical Garden Press, v. 1, p. 134-253, 2014.

JARAMILLO, C. et al. The origin of the modern Amazon rain forest: implications from the palynological and paleobotanical record. In: Hoorn, M.C. and Wesselingh, F.P.. (Org.). Amazonia, Landscape and Species Evolution. 1 ed. Oxford: Blackwell, v. 1, p. 317-334, 2010

KISTLER, P. Historical resume of the Amazon Basin. PETROBRAS/RENOR, Belém, Relatório Interno, Belém. 104-A. 1954.

LATRUBESSE, E. M. & FRANZINELLI, E. The Holocene alluvial plain of the middle amazon river, Brazil. Geomorphology, v 44, p. 241-257, 2002.

LEITE FPR, SILVA-CAMINHA SAF, D'APOLITO C. New Neogene index pollen and spore taxa fromthe Solimões Basin (western Amazonia), Brazil. Palynology v.45, p. 115–141, 2021. doi.org/10.1080/01916122.2020.1758971.

LIMA, Mário Ivan Cardoso. Apostila análise de drenagem e seu significado geológico-geomorfológico. 3ª ed. Belém, Pará: UFPA, 2006

LORENTE Maria. A. Palynology and Palynofacies of the Upper Tertiary in Venezuela: Dissertation es Botanicae, Berlin/Stuttgart, Lubrecht & Cramer Ltd. 1986.

MANTELLI, L.R. et al. SRTM digital elevation model tounravel Quaternary drainage in forested areas of Northeastern Amazonia. Computers & Geosciences. v. 35, p. 2331-2337, 2009.

MENDES, M. S.; BORGHI, L. . Sistemas deposicionais da Formação Codó (Cretáceo, bacia do Parnaíba). In: 7° SIMPÓSIO DO CRETÁCEO NO BRASIL / 1° SIMPÓSIO DO TERCIÁRIO NO BRASIL, 2006, Serra Negra. 7° Simpósio do Cretáceo no Brasil / 1° Simpósio do Terciário no Brasil. Rio Claro: IGCE-Unesp. v. 1. p. 83-83. 2006.

MOSKA, P. & MURRAY, A. S. Stability of the quartz fast-component in insensitive samples, Radiation Measurements, v. 41, p. 878-885, 2006.

MUNSELL SOIL COLOR COMPANY. Munsell color soilcharts. Baltimore, 1975.

MURRAY, A.S. & WINTLE, A.G. Luminescence dating of quartz using na improved single-aliquot regenerative-dose protocol, Radiation Measurements, v. 32, p. 57-73, 2000.

NOGUEIRA, A.C.R.; VIEIRA, L.C.; SUGUIO, K. Paleossolos da Formação Alter do Chão, Cretáceo-Terciário da Bacia do Amazonas, regiões de Presidente Figueiredo e Manaus. In SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL, n. 5, Serra Negra, Resumos. Serra Negra, v. 1, p. 261-266. 1999.

ORELLANA, Ernesto. Prospeccion Geoelectrica em corriente continua. 2ª ed. Madrid: Paraninfo, 1982.

PASSOS, M. S. et al. Pleistocene-Holocene sedimentary deposits of the Solimões-Amazonas fluvial system, Western Amazonas. Journal Of South American Earth Sciences, v. 98, 2020.

PIETSCH, T.J., OLLEY, J.M., NANSON, G.C. Fluvial transport as a natural luminescence sensitise of quartz. Quaternary Geochronology, v. 3, p. 365-376, 2008

PRESCOTT, J. R. & ROBERTSON, G. B. Sediment dating by luminescence: A review. Radiation Measurements, v. 27, p. 893–922, 1997.

REGALI, M. S. P; UESUGUI, N; SANTOS, A. S. Palinologia dos sedimentos mesocenozóicos do Brazil (I). Boletim Técnico da Petrobras. v.17, p. 177–191. 1974

RIDING J.B. A guide to preparation protocols in palynology, Palynology, v. 45 v. 1, p. 1-110, 2021. DOI: 10.1080/01916122.2021.1878305

RITTENOUR, T. M. Luminescence dating of fluvial deposits: applications to geomorphic, paloseismic and archeological research. Boreas. v. 37, p. 613-635, 2008.

ROSSETTI, D.F., NETTO, R.G. First evidence of marine influence in the cretaceous of the Amazonas Basin, Brazil. Cretaceous Research, v.27, p. 513-528, 2006.

ROSSETTI, D.F.; TOLEDO, P.M.; GÓES, A.M. New geological framework for western Amazonia (Brazil) and implications for biogeography and evolution. Quaternary research, v. 63, n. 1, p. 78-89, 2005.

ROSSETTI, D.F.; VALERIANO, M.M. Evolution of the lowest Amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. Catena, v. 70, p. 253-265, 2007.

ROSSETTI, D.F.; VALERIANO, M.M.; VASCONCELOS, D. L. A different path tothe Negro River in the Chibanian as a wind owto temporalize the eastward-flowing transcontinental Amazon. Journal of South American Earth Sciences, v. 122, 2023. doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104187.

ROZO, J.M.G., NOGUEIRA, A.C.R, CARVALHO, A. S. Análise multitemporal do sistema fluvial do Amazonas entre a Ilha do Careiro e a foz do Rio Madeira. In:SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, n. 12, Goiânia. anais. INPE, p.1875-1882. 2005.

SALLUN, A.E.M. et al. Datação absoluta de depósitos quaternários brasileiros por luminescência. Revista Brasileira de Geociências, v. 37, n. 2, p. 402-413, 2007.

SANTOS, L. O; MUNITA, C. S; SOARES, E. A. A. Provenance studies in Amazon basin by means of Chemical composition obtained by INAA. Journal of Radioanalyticaland Nuclear Chemistry, v 306, p.713–719 ,2015.

SHELKOPLYAS, V.N., MOROZOV, G.V. Some results of na investigation of Quaternary deposits by the thermoluminescence method Material son the Quaternary period of the Ukraine, Naukova Dumka, Kiev, pp. 83-90 (for the VII th International Quaternary Association Congress) 1965.

SILVA, C. L. et. al. Analysis of tectonic-controlled fluvial morphology and sedimentary processes ofthe western Amazon Basin: an approach using satellite image sand digital elevation model. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.79, n. 4, p. 693-711, 2007.

SILVA, C. L.; ROSSETTI, D. F. . História geológica dos rios da Amazônia. Ciência e Cultura, p. 24 – 26, 2009.

SILVA-CAMINHA S. A. F; JARAMILLO C, ABSY M. L. Neogene palynology of the Solimões Basin, Brazilian Amazonia. Palaeontographica Abteilung B Band 284 Lieferung. p. 13 - 79. 2010. doi.org/10.1127/palb/284/2010/13.

SOARES, E. A. A. et al. New sedimentological and palynological data from surface Miocenestrata in the central Amazonas Basinarea. Brazilian Journal of Geology, v. 45, n. 3, p.337-357, 2015.

SOARES, E. A. A.; TATUMI, S. H.; RICCOMINI, C. OSL age determinations of Pleistocene fluvial deposits in Central Amazonia. Academia Brasileira de Ciências, v.82, n.3 p. 691-699, 2010.

SOARES, Emilio Alberto Amaral. Depósitos pleistocenos da região de confluência dos rios Negro e Solimões, porção oeste da Bacia do Amazonas. 2007. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.

TATUMI, Sônia Hatsui; ROSSETTI, Dilce Fátima; SOARES, Emílio Alberto Amaral. Optically Stimulated Luminescence (OSL) Dating in the Amazonian Wetlands. Reino Unido: Cambridge Scholars Publishing, 2020.

TEIXEIRA, S.G., RIKER, S.R.L., 2010. In: Projeto Dinâmica Fluvial do Sistema Negro Solimões-Amazonas (Relatório de viagem à Bacia do Baixo Solimões, nas regiões de Codajás, Anamã, Anori, Beruri, Manacapuru e Coari), pp. 31.

WINTLE, A. G.; MURRAY, A. S. A review of quartz optically stimulated luminescence characteristic sand their relevance in single-aliquot regeneration dating protocols. Radiation Measurements, v. 41, n. 4, p. 369–391, 2006