

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISES E IMPLICAÇÕES DA ARQUITETURA FLUVIAL
DOS TERRAÇOS EXPOSTOS AO LONGO DO CURSO DO
RIO JAPURÁ NO ESTADO DO AMAZONAS**

YURI MATHEUS MINUTELLA BORTOLETTO MACHADO

Orientador: Prof. Dr. Renato Paes de Almeida

Dissertação de Mestrado

Nº 917

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Renato Paes de Almeida

Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer

Dr. André Marconato

SÃO PAULO

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a) via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Minutella Bortoletto Machado, Yuri Matheus
Análises e implicações da arquitetura fluvial dos terraços expostos ao longo do curso do rio Japurá no estado do Amazonas / Yuri Matheus Minutella Bortoletto Machado; orientador Renato Paes de Almeida. -- São Paulo, 2023.
105 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica) -- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2023.

1. Análise arquitetural. 2. Terraços fluviais. 3. Paleocorrente. 4. Amazônia. I. Paes de Almeida, Renato, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço o meu orientador Prof. Dr. Renato Paes de Almeida por toda a paciência e orientação providenciada ao longo deste mestrado e pela oportunidade de participar do grupo de pesquisa, além do apoio no longo caminho de perder a temida timidez.

Agradeço também aos colegas e amigos da pós-graduação e do grupo de pesquisa – Carlos Eduardo Manjon Mazoca, Larissa Natsumi Tamura, Geovana Leite Geraldo – pelo imenso auxílio na construção desta dissertação, ajuda com indicações bibliográficas, disponibilidade de seu tempo e apoio durante esses anos. Sempre estiveram disponíveis independente do problema, desde o início até o final deste trabalho. Espero um dia poder retribuir por toda a ajuda prestada.

Agradeço também aos meus queridos amigos Lucas Vinicius Santos e Tom Dias Motta Morita. Há quase dez anos estamos juntos, fazendo trabalhos da graduação, viagens de campo, criticando a pronúncia do nome de personagens fictícios entre outras inúmeras alegrias que não cabem aqui. Me acompanharam em muitas jornadas e espero que ainda tenham diversas mais a me acompanhar. Obrigado por fazerem parte de minha trajetória.

Agradeço também a CAPES pela bolsa inicial de mestrado e ao Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo (PRH-ANP) 43.1 pela bolsa de mestrado.

Por fim, agradeço meus pais, dona Ana Regina Minutella e o senhor Antônio Sérgio Bortoletto Machado, pelo imenso apoio em todas as minhas escolhas e pelo amparo em momentos difíceis e alegria proporcionada em momentos felizes. À minha irmã e companheiros do Magic, por sempre alegrarem meus finais de semana.

RESUMO

O presente estudo concentra-se na análise das arquiteturas fluviais atravessadas pelo Rio Japurá, utilizando fotomosaicos construídos a partir de fotografias obtidas durante a pesquisa de campo em 2020. O objetivo é compreender a evolução dos terraços fluviais, resolver problemas relacionados à origem desses depósitos e correlacioná-los com reservatórios fluviais de hidrocarbonetos. Os resultados obtidos mostram a presença de diferentes associações de fácies e elementos arquiteturais nos afloramentos dos terraços estudados. Foram identificadas barras fluviais, topos de barras e planícies de inundação, indicando processos de migração de canal e construção de barras. A análise dos terraços mapeados revelou diferenças na granulometria dos sedimentos depositados pelo Rio Japurá e pelo Rio Solimões. Os sedimentos do Rio Japurá são mais grossos, com presença de conglomerados e areias médias a grossas, enquanto os sedimentos do Rio Solimões são mais finos, com predominância de areias finas a muito finas. Essa dicotomia indica a existência de sistemas fluviais distintos na região. As medidas de paleocorrente mostraram duas tendências distintas nas amostras coletadas. As amostras a oeste, associadas ao Rio Japurá, apresentaram uma tendência geral para leste, com vetor médio mostrando valor de aproximadamente $80,9^\circ$, enquanto as amostras a leste, associadas ao Rio Solimões, mostraram uma tendência para o norte, com vetor médio de $12,3^\circ$. A diferença nominal entre os valores dos vetores médios foi grande o suficiente para descartar o potencial de ambas as tendências terem sido geradas por uma mesma população, apontando para a possibilidade de essas tendências terem sido geradas por sistemas fluviais diferentes, sendo estes o sistema do Rio Japurá e do Rio Solimões. A direção norte do Rio Solimões implica na antecipação da confluência com o Rio Negro e caracteriza o maior registro de mudança de curso de um rio grande registrado até então. Depósitos de rios de grande porte como Japurá e Solimões possuem potencial para análogos de reservatórios de hidrocarbonetos não marinhos. Os corpos arenosos têm dimensões favoráveis, porém a conectividade entre eles é um fator chave. Tecnologias atuais podem auxiliar no refinamento dos modelos de reservatório. Estudos mais aprofundados são necessários para avaliar o potencial desses reservatórios. Em resumo, este estudo contribui para a compreensão da evolução dos terraços fluviais na região amazônica, especialmente aqueles cortados pelo Rio Japurá. A caracterização das associações de fácies, elementos arquiteturais e medidas de paleocorrente permite inferir a dinâmica de deposição e as condições ambientais envolvidas. Além disso, a identificação das diferenças granulométricas entre os sedimentos dos rios Japurá e Solimões fornece informações sobre a natureza dos sistemas fluviais na região. Esses resultados são relevantes para o entendimento da geologia e do potencial de hidrocarbonetos em sistemas fluviais de grande porte.

Palavras-chave: Análise arquitetural, terraços fluviais, Rio Japurá, Amazônia, paleocorrente, reservatório de hidrocarboneto

ABSTRACT

The present study focuses on the analysis of fluvial architecture crossed by the Japurá River, using photomosaics constructed from photographs obtained during field research in 2020. The objective is to understand the evolution of river terraces, solve problems related to the origin of these deposits and correlate them with river hydrocarbon reservoirs. The results obtained show the presence of different associations of facies and architectural elements in the outcrops of the studied terraces. Fluvial bars, bar tops and floodplains deposits were identified, indicating processes of channel migration and bar construction. The analysis of the mapped terraces revealed differences in the granulometry of the sediments deposited by the Japurá River and the Solimões River. The sediments of the Japurá River are coarser, with the presence of conglomerates and medium to coarse sands, while the sediments of the Solimões River are finer, with a predominance of fine to very fine sands. This dichotomy indicates the existence of different river systems in the region. Paleocurrent measurements showed two distinct trends in the collected samples. The samples to the west, associated with the Japurá River, showed a general eastward trend, with a mean vector showing a value of approximately $80,9^\circ$, while the samples to the east, associated with the Solimões River, showed a northward tendency, with a mean vector of $12,3^\circ$. The nominal difference between the values of the mean vectors was big enough to rule out the potential for the same population generating both trends, pointing to the possibility that these trends were generated by different river systems, namely the Japurá River and Solimões River systems. The northward Direction of Solimões River implies on the anticipation of it's confluence with the Negro River, which characterizes the biggest case ever recorded until then of change in the course of a large river. Large river deposits such as Japurá and Solimões have potential as analogues for non-marine hydrocarbon reservoirs. The sandy bodies have favorable dimensions, but the connectivity between them is a key factor. Current technologies can help refine reservoir models. Further studies are needed to assess the potential of these reservoirs. In summary, this study contributes to the understanding of the evolution of river terraces in the Amazon region, especially those crossed by the Japurá River. The characterization of facies associations, architectural elements and paleocurrent measurements allows inferring the deposition dynamics and the environmental conditions involved. In addition, the identification of granulometric differences between the sediments of the Japurá and Solimões rivers provides information about the nature of the river systems in the region. These results are relevant for understanding the geology and potential of hydrocarbons in large fluvial systems.

Key words: Architectural analysis, fluvial terraces, Japurá River, Amazon, paleocurrent, hydrocarbon reservoir.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Localização da Área de Estudo	2
2. OBJETIVOS	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1. Contexto Geológico.....	4
3.1.1. Bacia do Solimões.....	4
3.1.2. Terraços fluviais.....	7
3.2. Grandes Rios.....	12
3.3. Rio Japurá: Dimensões, características e evolução.....	14
3.4. Análise de Elementos arquiteturas	17
3.4.1. Método proposto por Miall (1996)	17
3.4.2. Críticas a análise arquitetural.....	24
3.5. Reservatórios fluviais de hidrocarbonetos.....	27
3.5.1. Areias betuminosas de Athabasca	31
3.5.2. Formação Statfjord.....	34
3.5.3. Campo Daqing	37
3.5.4. Faixa Petrolífera do Orinoco	41
3.6. Análogos de Reservatório e Elementos arquiteturas em reservatórios de HC.....	44
4. MÉTODOS.....	48
4.1. Mapeamento de Terraços e Viagem de Campo.....	48
4.2. Análise de Elementos Arquiteturais	49
4.3. Paleocorrentes	51
5. RESULTADOS	53
5.1. Mapeamento de Terraços	53
5.2. Fácies.....	54
5.2.1. Fácies L1 e L2 – Lamas sem estruturas e laminadas; Lama siltosa com estratos cruzados acanalados.....	55
5.2.2. Fácies A1 – Areias com estratificação cruzada acanalada, com ou sem intraclastos.	57
5.2.3. Fácies A2 – Areias sem estruturas ou laminadas, com ou sem intraclastos.....	58
5.2.4. Fácies A3 – Areias com estratificação cruzada tabular, com ou sem intraclastos.....	60
5.2.5. Fácies H – Heterolíticas de areia e silte, podendo apresentar ripples.....	61
5.2.6. Fácies C – Conglomerados.....	61

5.3.	Associações de Fácies.....	63
5.3.1.	Associação de fácies de barras e canais (AFC).....	63
5.3.2.	Associação de fácies externa ao canal (AFP).....	65
5.4.	Análise arquitetural.....	67
5.5.	Paleocorrentes.....	84
6.	DISCUSSÕES.....	87
7.	CONCLUSÕES.....	93
8.	BIBLIOGRAFIA.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Área de estudo, com as bacias fluviais individualizadas.	3
Figura 2 - Bacias da região da Amazônia Wanderley-Filho et al. (2009).	5
Figura 3 - Perfil das formações sedimentares existentes na Bacia do Solimões. Extraído de Reis et al (2000).	6
Figura 4 - Área de estudo, próximo à confluência do Rio Japurá com o Rio Solimões. Ferreira et al. (2006).	6
Figura 5 - Terraços quaternários mapeados por Rossetti et al. (2005).	8
Figura 6 - Terraços mapeados na região central do Rio Madeira. Extraído de Rossetti et al. (2014).	10
Figura 7 - Perfis sedimentares levantados nas proximidades ao longo do Rio Solimões. Extraído de Pupim et al. (2019).	11
Figura 8 - Rio Caquetá (Japurá) próximo à fronteira com Brasil. Extraído de Van der Hammen et al. (1992).	12
Figura 9 - Esquema dos arenitos Brownstones mostrando as hierarquias dos contatos. Extraído de Allen (1983).	18
Figura 101 - Elementos de acreção jusante e lateral. Modificado de Miall (1996).	23
Figura 11 - Comparação entre as superfícies e corpos propostos por Miall (1996) e Bridge (1993).	25
Figura 12 - Elementos arquiteturais utilizados nos trabalhos de Li et al. (2015) e Hornung e Aigner (1999).	26
Figura 13 - Cunhas clásticas e preenchimento de paleovales. Extraído de Miall (1996).	28
Figura 14 - Classificação de depósitos fluviais de Friend (1983).	29

Figura 15 - Classificação de reservatórios fluviais. Modificado de Miall (1996).	30
Figura 16 - Variação dos sistemas deposicionais da Formação McMurray. Extraído de Carrigy e Kramers (1973).	32
Figura 17 - Mar do Norte, localização do Campo Statfjord, no alto Tampen. Extraído de Hoymir (1992).	34
Figura 18 - Evolução dos sistemas deposicionais da Formação Statfjord. Extraído de Steel e Ryseth (1990).	36
Figura 19 - Localização da Bacia de Songliao e do Campo Daqing. Extraído de Tong et al (2018) e Yang (1985).	37
Figura 20 - Seção sísmica e estrutural da região central da Bacia de Songliao. Extraído de Feng et al. (2010).	39
Figura 21 - Evolução dos sistemas deposicionais do Cretáceo da Bacia de Songliao. Extraído de Feng et al. (2010).	40
Figura 22 - Projeção do futuro da produção do Campo Daqing. Modificado de Tang et al. (2010).	41
Figura 23 - Localização da Faixa Petrolífera do Orinoco. Extraído de Martinius et al. (2012).	41
Figura 24 - Seção estratigráfica esquemática N-S da Formação Oficina na região de Petrocedeño. Extraído de Martinius et al. (2012).	42
Figura 25 - Vetores de migração secundária de óleo e de gás. Extraído de Summa et al. (2003).	43
Figura 26 - Mapeamento de terraços na área de estudo.	54
Figura 27 - Fácies L1.	57
Figura 28 - Fácies A1.	59
Figura 29 - Fácies A2.	59
Figura 30 - Fácies A3.	60

Figura 31 – Fácies H.	62
Figura 32 – Fácies C.	62
Figura 33 - Associação de fácies AFC.	65
Figura 34 - Associação de Fácies AFP.	67
Figura 35 – Análise arquitetural do ponto ALC 98.	69
Figura 36 - Análise arquitetural do ponto 107.	70
Figura 37 - Análise arquitetural do ponto 112.	71
Figura 38 - Análise arquitetural do ponto 113.	72
Figura 39 - Ponto 100.	73
Figura 40 - Ponto ALC 104.	74
Figura 41 - Análise arquitetural do ponto ALC 96.	76
Figura 42 - Ponto ALC 97.	77
Figura 43 - Análise arquitetural do ponto ALC 102.	78
Figura 44 - Análise arquitetural do ponto ALC 110.	79
Figura 45 - Ponto ALC 111.	80
Figura 46 - Análise arquitetural do ponto ALC 99.	82
Figura 47 - Análise arquitetural do ponto ALC 101.	83
Figura 48 - Mapa de pontos com diagramas de roseta referente às medidas de paleocorrente.	84
Figura 49 - Mapa de pontos com diagramas contendo o vetor médio de cada ponto e o erro do vetor médio.	86
Figura 50 - Padrões regionais das paleocorrentes, utilizados no teste de hipótese.	87

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Litofácies propostas por Miall (1996). Extraído de Figueiredo (2017), modificado de Miall (1996).	19
Tabela 2 – Tabela das fácies observadas em campo.	54
Tabela 3 – Tabela apresentando o número de amostras, vetor médio, erro médio e variância circular das medidas de paleocorrente.	85

1. INTRODUÇÃO

A região amazônica vem sendo explorada e estudada para fins geológicos desde o século passado, com trabalhos antigos como o de Oppenheim (1937), de caráter puramente expedicionário e exploratório. A partir de 1978, com a descoberta da província de gás do Juruá, na região da Bacia do Solimões, um grande volume de trabalhos foi desenvolvido, com o intuito de datar, identificar as fácies, ambientes deposicionais e mecanismos controladores da Bacia do Solimões, com ampliação a partir de 1986 com a descoberta da província de gás do Urucu. Mais de 120 poços, 50 mil quilômetros de linhas sísmicas 2D e 2200 quilômetros lineares de sísmica 3D foram executados desde então, com objetivo de se obter cada vez mais informações sobre os hidrocarbonetos da região (Wanderley Filho et al. 2007).

Trabalhos mais recentes, a partir dos anos 2000, diversos trabalhos como os de Hoorn (1995, 2009), Latrubesse et al. (2010), Campbell (2006), Rossetti (2005, 2014a e 2014b), Pupim et al. (2019) e tiveram como objeto de estudo os depósitos mais recentes da região amazônica, a fim de se estabelecer a evolução da paisagem mais recente e do próprio Rio Amazonas. Rossetti (2005, 2014a e 2014b), Pupim et al (2019) o principal foco são os terraços quaternários da Amazônia, onde a contribuição dos diversos episódios de incisão de vales e avulsão de canais para o desenvolvimento da grande biodiversidade é estudada.

O trabalho de reconhecimento de terraços consiste em uma avaliação preliminar dos mesmos a partir de imagens de satélite e o reconhecimento estratigráfico e das fácies em campo, com análises cronológicas (e.g. *Optical Stimulated Luminescence* (OSL), análises palinológicas) (Pupim et al., 2019). O levantamento estratigráfico em campo compreende análise de fácies, notando granulometria, estrutura, fósseis, e a análise de elementos arquiteturais proposta por Miall (1996), por se mostrar uma alternativa que leva em consideração a geometria dos corpos sedimentares para complementar a documentação e interpretação do sistema fluvial e sua evolução.

O presente trabalho foca na análise das arquiteturas fluviais atravessadas pelo Rio Japurá, a partir de fотомосаicos construídos por meio de fotografias com sobreposições, obtidas quando a etapa de campo foi realizada em 2020, fazendo uso

das informações contidas nas cadernetas de campo para a construção de colunas estratigráficas e análise de fácies. Busca-se também trazer informações acerca de problemas intrínsecos aos terraços seccionados pelo Rio Japurá, principalmente aqueles depositados no interflúvio do rio Negro com o Japurá, nas proximidades do município de Maraã, onde surge questões sobre suas origens, se tiveram sua sedimentação em decorrência do próprio Rio Japurá ou do rio Solimões, que fluiria em direção nordeste, antecipando sua confluência com o rio Negro. Para isso, se utiliza das medidas de paleocorrente coletadas em campo e tratadas de acordo com a estatística de dados circulares (Fisher, 1993).

Por fim, os resultados da construção da sedimentologia da região foram utilizados para se buscar uma correlação com reservatórios fluviais de hidrocarbonetos, depositados sob a ação de um rio de grande porte e de padrão *anabranching*, visto que os grandes exemplos de reservatórios fluviais, como as areias betuminosas de Athabasca e o cinturão petrolífero do Orinoco, tiveram como agentes rios meandrantos e associação à ambientes deltaicos.

1.1. Localização da Área de Estudo

A área de estudo foi visitada entre os dias 10 e 19 de janeiro de 2020. Foram selecionadas áreas e pontos alvo previamente ao campo, a partir de mapeamento prévio dos terraços fluviais. O trecho visitado consiste em aproximadamente 300 quilômetros ao longo das margens do Rio Japurá, compreendido entre os municípios de Maraã, próximo a confluência com o Rio Solimões, e município de Japurá, nas proximidades da cidade (figura 1).

O acesso a região foi feito por meio de um voo até o município de Tefé, com o acesso aos pontos de interesse feito por meio de barco, navegando pelo canal do Solimões e Japurá, uma vez que a aproximação por terra é inviável.

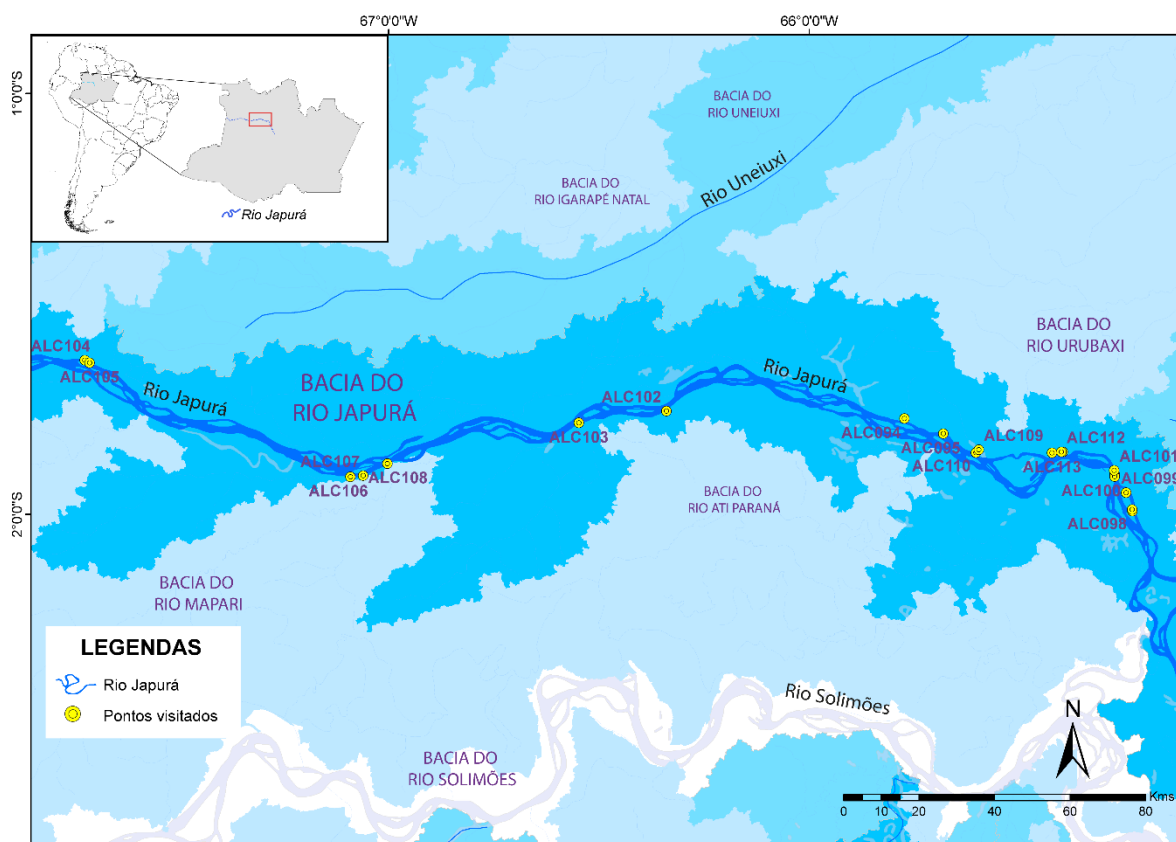


Figura 1 - Área de estudo, com as bacias fluviais individualizadas. Os pontos visitados em janeiro de 2020 estão destacados em amarelo

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é a construção e complementação do quadro sedimentológico dos terraços fluviais seccionados pelo rio Japurá e resolução de alguns problemas intrínsecos no que diz respeito a origem de alguns destes. Outro objetivo é fornecimento de base para a correlação com depósitos de hidrocarbonetos gerados em sistemas fluviais de grande porte. Os objetivos parciais para se alcançar os resultados são:

- Confecção de colunas estratigráficas e análise de fácies baseadas nas informações coletadas em campo pelo grupo de pesquisa;
- Análise da arquitetura fluvial encontrada nos afloramentos ao longo das margens do rio Japurá, através da construção de fotomosaicos a partir de fotografias

tiradas durante o campo em 2020, com a finalidade de se identificar elementos deposicionais, suas relações entre si e condições de deposição;

- Análise de medidas de paleocorrente através de estatística de dados circulares, por meio de técnicas como *bootstrapping* aplicado às variâncias de medidas de diversos planos;

- Discussão da origem de terraços fluviais localizados no interflúvio entre os Rios Japurá e Rio Negro, se foram depositados pelo Rio Solimões ou Japurá;

- Agregação dos resultados obtidos nas análises para a correlação dos depósitos do rio Japurá com reservatórios de hidrocarbonetos de rios de grande porte.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Contexto Geológico

3.1.1. Bacia do Solimões

A área de estudo do presente trabalho encontra-se nas margens do Rio Japurá, cujo curso se inicia na região da Cordilheira dos Andes na Colômbia como Rio Caquetá, adentrando o Brasil próximo ao município de Vila Bittencourt, no noroeste do estado do Amazonas. Seu curso no Brasil atravessa a Bacia do Solimões, uma bacia intracratônica paleozoica de aproximadamente 480.000 km² orientada ao longo da direção leste-oeste (figura 2), seccionada nesta mesma direção pelo rio Solimões (Wanderley-filho et al. 2009). Limita-se a leste pelo Arco de Purus, separando-a da bacia do Amazonas; a oeste pelo arco de Iquitos, na divisa com a bacia do Acre; a norte pelo escudo das Guianas e ao sul pelo escudo Brasileiro (Wanderley-filho et al., 2007). A presença de um alto estrutural, de direção norte-sul, chamado de Arco de Carauari controlou a deposição de sedimentos na bacia, especialmente durante o Paleozoico, e permitiu a subdivisão da bacia do Solimões em duas sub-bacias, denominadas Juruá, a leste, e Jandiatuba, a oeste (Wanderley-filho et al. 2009). A estratigrafia da bacia do Solimões foi amplamente estudada por meio de diversos poços, uma vez que estão ausentes afloramentos de rochas do Mesozoico e Paleozoico (ANA, 2015). Estudos estratigráficos se iniciaram ao final da década de

1950, com aumento de intensidade após a descoberta de hidrocarbonetos na província do Urucu em 1986 (Wanderley-filho et al., 2007; ANA, 2015).

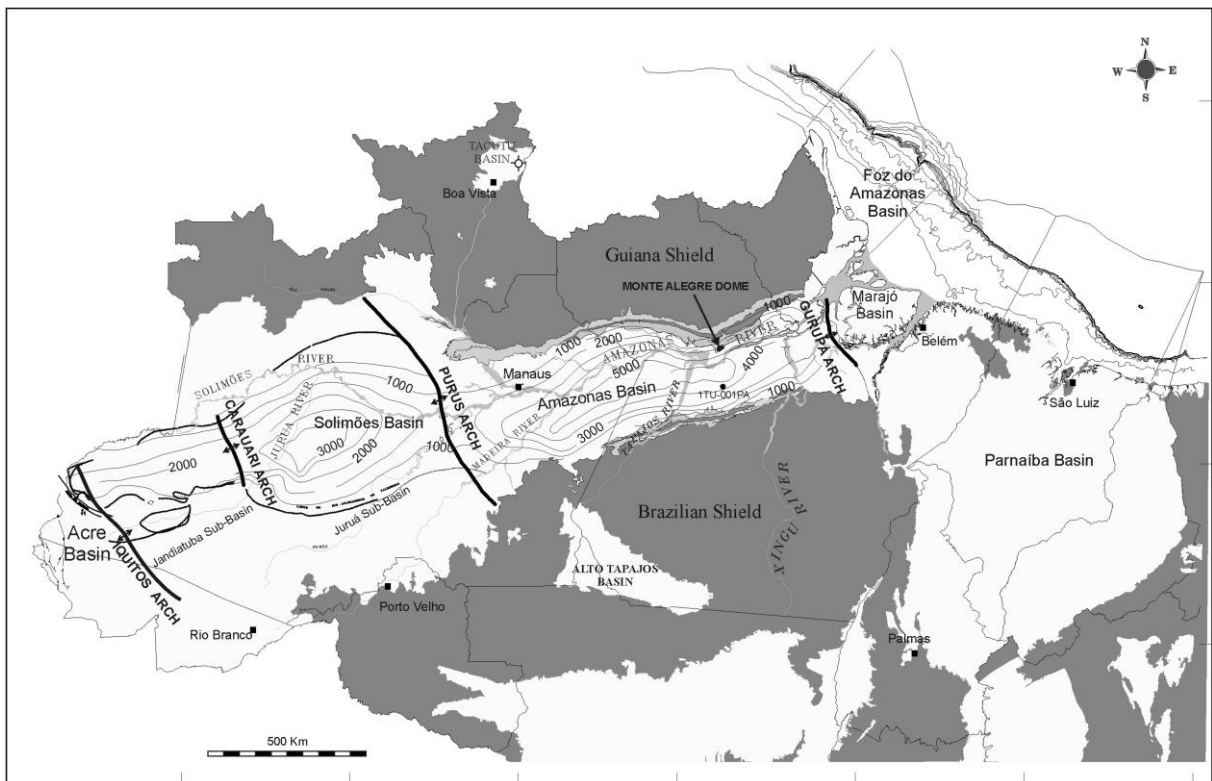


Figura 2 - Bacias da região da Amazônia, com a Bacia do Solimões contida entre os Arcos de Arco e Carauari. Extraído de Wanderley-Filho et al. (2009)

De acordo com Eiras (2005), a Bacia do Solimões se desenvolve sobre duas províncias geocronológicas, a Rondônia-Juruena e Rio Negro, com preenchimento sedimentar variando entre 3800 a 3100 metros, dividido em duas sequencias principais, uma de idade paleozoica, trespassada por diques e soleiras de diabásio e

outra mais recente, de idade meso-cenozoica, como mostra a figura 3, composta pelas rochas cretáceas da Formação Alter do Chão e miocênicas da Formação Solimões.

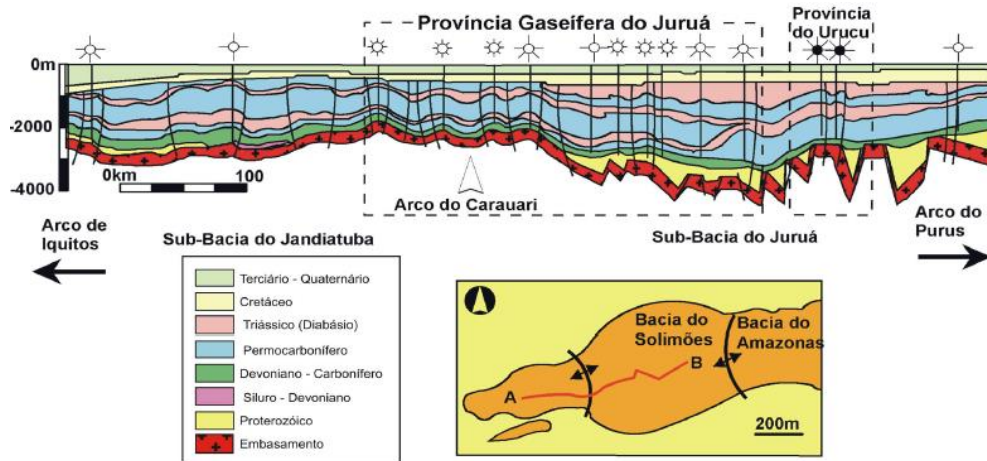


Figura 3 - Perfil das formações sedimentares existentes na Bacia do Solimões. Extraído de Reis et al (2000), modificado de Eiras (1996).

Na área de estudo (figura 4), são seccionados pelo Rio Japurá sedimentos da Formação Içá, além de sedimentos aluvionares mais recentes, compostos por terraços fluviais e a planície de inundação do rio. A Formação Içá foi definida pela primeira vez por Maia et al. (1977), em um projeto de sondagem com a finalidade de determinação do potencial lítico da região do Alto Solimões. Abrangendo uma área de cerca de 600000 Km², limitada a leste pelo Arco de Purus, constitui-se por arenitos

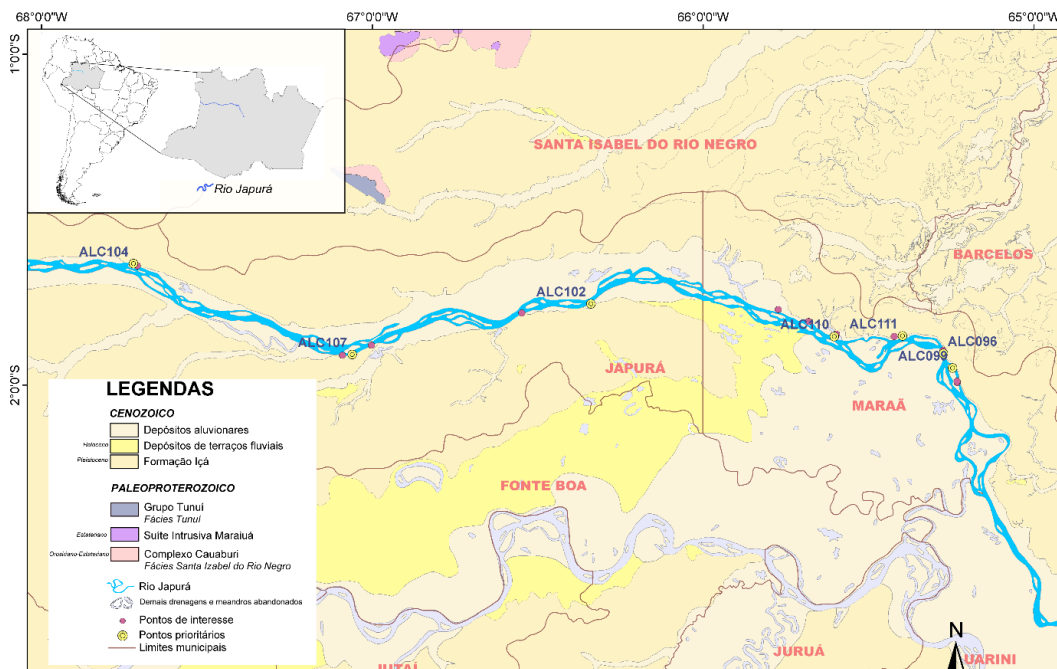


Figura 4 - Área de estudo, próximo à confluência do Rio Japurá com o Rio Solimões. Ferreira et al. 2006.

friáveis a porções conglomeráticas em sua base, com a ocorrência de siltitos e argilitos subordinados, depositados em ambiente continental de alta energia e oxidante, que resultou em grande perda da matéria orgânica presente. A idade atribuída por Maia et al. (1977) para a Formação Içá é pleistocênica, atingida ao se restringir o intervalo de tempo pela ocorrência da Formação Solimões, uma vez que não foi verificado conteúdo fossilífero nos testemunhos de sondagem ou em superfície da Formação Içá. Em trabalhos mais recentes como o de Rossetti et al (2005) e Pupim et al (2019), por meio de datações e mapeamentos mais precisos, muitas áreas antes atribuídas à Formação Içá foram redefinidas, identificando estas como mais recentes e posicionando estratigraficamente a Formação Içá ao Plio-Pleistoceno, o que permitiu importantes conclusões a respeito da evolução da Bacia Amazônica como um todo, principalmente no tocante a inversão do sistema fluvial.

3.1.2. Terraços fluviais

Terraços fluviais são feições geomorfológicas constituídas por material aluvionar em uma região mais elevada que a planície de inundação ativa do rio, estando nesta posição devido a um aumento do poder erosivo do rio, resultante de mudanças tectônicas e/ou climáticas que refletem em uma nova incisão do canal e deposição de nova planície aluvial mais abaixo (Winge et al. 2001; Bridge e Demico, 2008).

O estudo dos terraços fluviais da Amazônia, principalmente os de origem quaternária, ganharam destaque nos últimos anos como uma forma de compreender a origem e distribuição da biodiversidade na região através de uma correlação entre evolução da paisagem e evolução climática, tectônica e da biota (Rossetti et al. 2005, Rossetti et al. 2014b e Pupim et al. 2019).

Em Rossetti et al. (2005), uma reclassificação dos sedimentos pós-miocênicos da região a oeste de Manaus foi realizada, com a finalidade de melhor caracterizar o período no qual ocorreu a evolução da biodiversidade da região. A princípio, toda a cobertura sedimentar acima da Formação Solimões era tratada como Formação Içá, o que Rossetti et al. (2005) separa em mais quatro outras unidades por meio de análises sedimentológicas, sensoriamento remoto (imagens *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), disponibilizadas gratuitamente) e datações por meio de

C¹⁴. Denominados Q1, Q2, Q3 e Q4 (figura 5), os terraços foram depositados entre o Pleistoceno e Holoceno (desde 43700 a 130 anos atrás), e se diferenciam da Formação Içá pela idade, aspectos morfológicos dos canais preservados neles e características sedimentares, registrando uma grande variação na paisagem amazônica durante o Quaternário, desde um sistema fluvial mais raso, com alta taxa de migração, formando padrões entrelaçados e anastomosados, passando para depósitos de planícies de inundação e leques de crevasse à formação de sistemas fluviais de regiões mais húmidas. Embora uma separação formal dos terraços fluviais da Amazônia não tenha sido apresentada, os sedimentos quaternários da região mostraram uma subdivisão mais detalhada em Rossetti (2005), pavimentando a base para trabalhos futuros como o do Pupim et al. (2019).

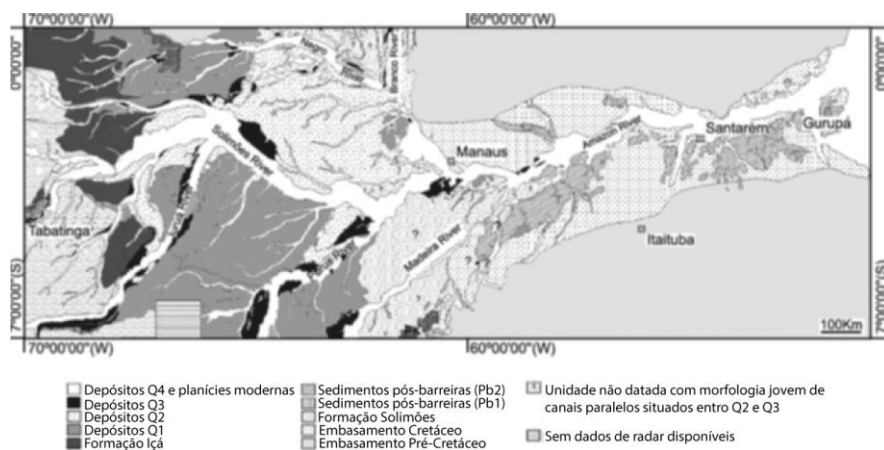


Figura 5 - Terraços quaternários mapeados por Rossetti et al. (2005).
 Extraído de Rossetti et al. (2005).

Em Rossetti et al. (2014a), a evolução dos terraços quaternários na região do Rio Madeira foi estudada, a fim de se estabelecer a importância dos fatores climáticos e tectônicos na construção da paisagem durante o período em questão. Foram discriminados 3 terraços (denominados T1, T2 e T3, do mais antigo para o mais recente, Figura 6), variando de idades desde 43500 a 3367 anos atrás. O mais antigo dos terraços, T1, é também o mais extenso, abrangendo a maior área, em ambas as margens do Rio Madeira e registra um possível aumento de energia do rio, uma vez que mostra em sua unidade mais basal sedimentos mais finos se comparado com suas unidades superiores, que transitam, juntamente com variações nos elementos e associações de fácies encontrados, para sistemas de mais energia, até se atingir o topo, onde se registra o período no qual o Rio Madeira tinha a maior capacidade de

transporte de carga de fundo. No terraço reconhecido como T2, voltam condições de menos energia, similar aquelas reconhecidas na unidade mais central do T1, com uma mistura de carga suspensa e de fundo, mas com predominância de material lamoso, que associadas com feições em semicírculo na superfície do terraço, indicam a deposição por meio de um sistema meandrante. Em T3, as condições de deposição de T2 foram mantidas, com uma frequência de depósitos arenosos ainda menor do que no terraço adjacente, enunciando aumento na carga em suspensão do rio. Segundo Rossetti et al. (2014 a), apenas fatores climáticos seriam insuficientes para a construção da configuração de terraços encontrada, atribuindo grande parte das variações a ativações de falhas pré-existentes que promoveram novas incisões de vales, seguida de períodos de quiescência, permitindo a deposição sedimentar.

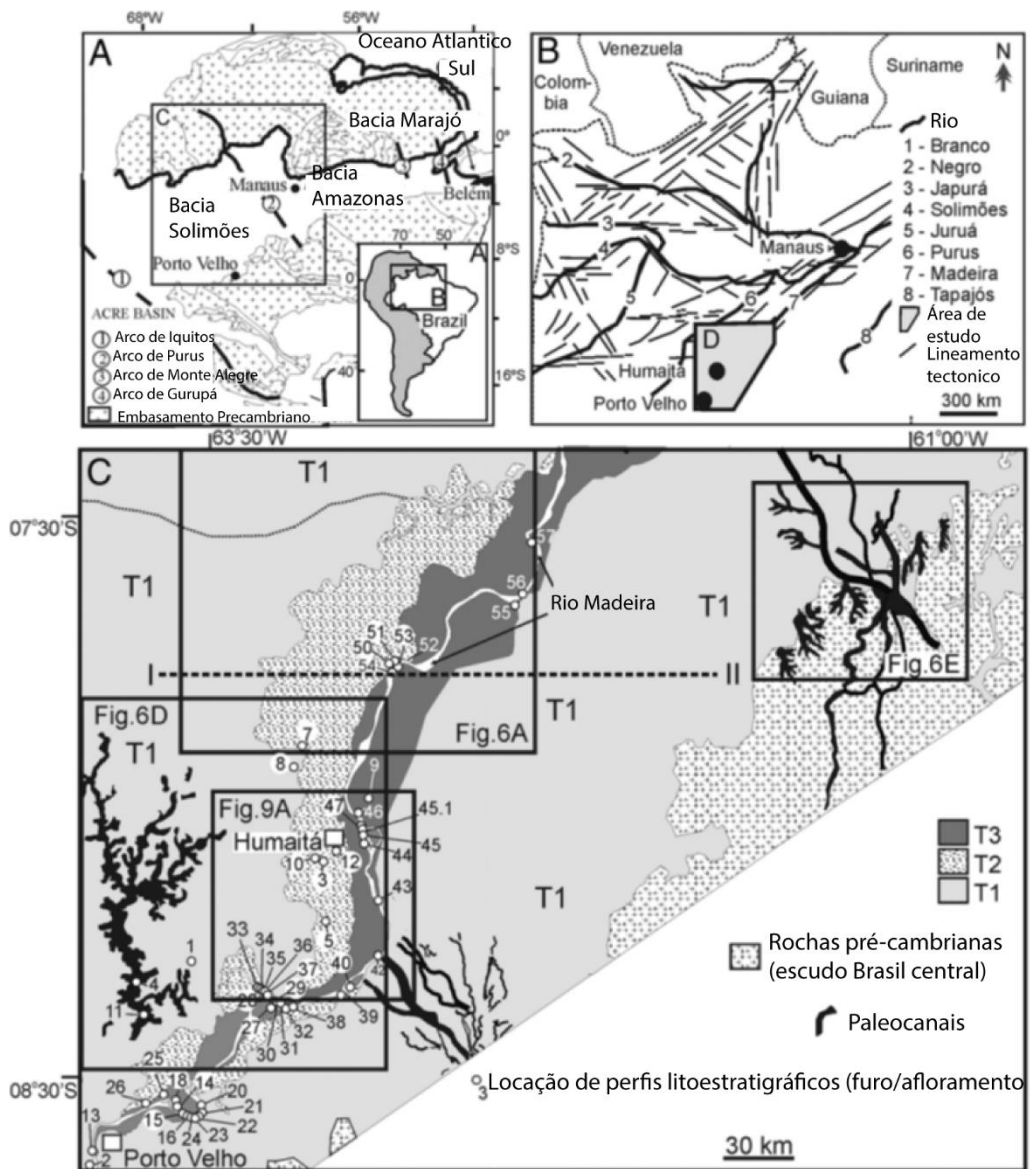


Figura 6 - Terraços mapeados na região central do Rio Madeira. Extraído de Rossetti et al. (2014).

Em Pupim et al. (2019), embora uma caracterização em detalhe dos terraços não tenha sido feita, suas construções foram cautelosamente estudadas. Os terraços fluviais localizados na região da Amazônia Central, ao longo das margens do Rio Solimões, foram reconhecidos por meio de imagens SRTM e de satélites Landsat TM, e correlacionados através de afloramentos expostos nas margens dos rios. Foram levantados 10 perfis sedimentares (figura 7), sendo 7 representantes dos terraços superiores e 3 de planícies de inundação modernas, além do registro de afloramentos nas margens dos rios, representando cerca de 1000 Km² de cobertura de florestas de Terra-firme, desenvolvidas nos topos dos terraços fluviais. De maneira geral, são

descritos como tendo uma porção de lama na base intercalando com areia de laminação e estratificação cruzada. À medida que se sobe na estratigrafia, as proporções se invertem, com o espessamento das camadas arenosas, sugerindo uma sucessão sedimentar caracterizada por um engrossamento geral de litologia. Pupim et al. (2019) interpreta uma construção dos terraços dessa região por agradação de barras fluviais e planícies de inundação, entre 250 e 45 mil anos atrás, sucedido por um período de incisão dos vales mais recentes, em dois episódios, um entre 45 e 35 mil anos e outro que formou os vales do Holoceno e os terraços mais altos. Ao compilar dados de outros estudos, Pupim et al. (2019) chegam à conclusão de que tal processo ocorreu por grande parte da região amazônica, porém em períodos distintos, formando uma espécie de mosaico de terraço com idades distintas.

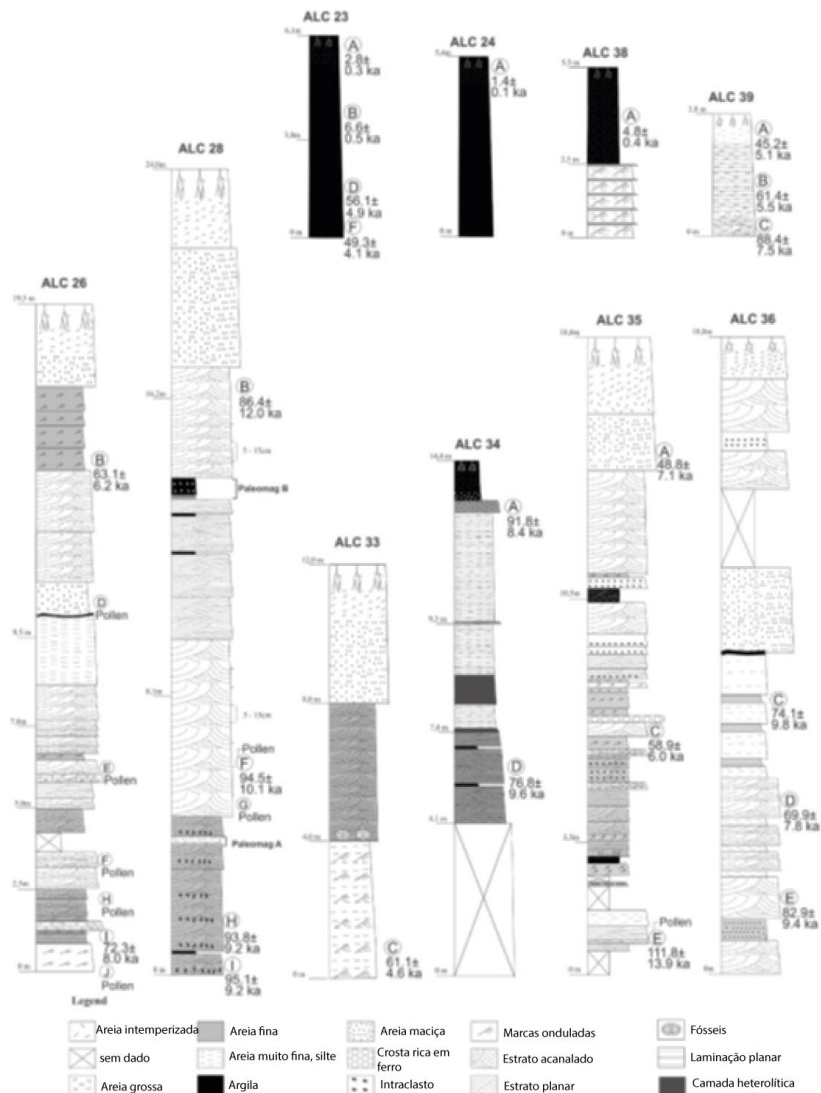


Figura 7 - Perfis sedimentares levantados nas proximidades ao longo do Rio Solimões. Extraído de Pupim et al. (2019).

Na região noroeste da Amazônia, onde corre o Rio Caquetá/Japurá, próxima à fronteira entre a Colômbia e Brasil (figura 8), Van der Hammen et al. (1992) realizam uma breve descrição dos terraços fluviais, dando ênfase aos terraços baixos, por serem claramente depositados no atual vale do rio. Os terraços mais altos e antigos da região são de origem terciária e constituem-se por sedimentos depositados por lagos e rios, escavados após o soerguimento da Cordilheira dos Andes. Os terraços baixos são caracterizados por uma porção basal de areia e cascalho sucedidos pelo que chamam de “complexo de argila cinza com preenchimento de canal raso”, seguido por argilas mais claras com lentes e camadas de areia, finalizados no topo da sequência por argilas de coloração clara e solo avermelhado. Datações das sequências sugerem uma incisão do vale nestes terraços entre 30000 e 12600 anos atrás, com os sedimentos da planície de inundação atual mostrando idades de até 12500 anos.

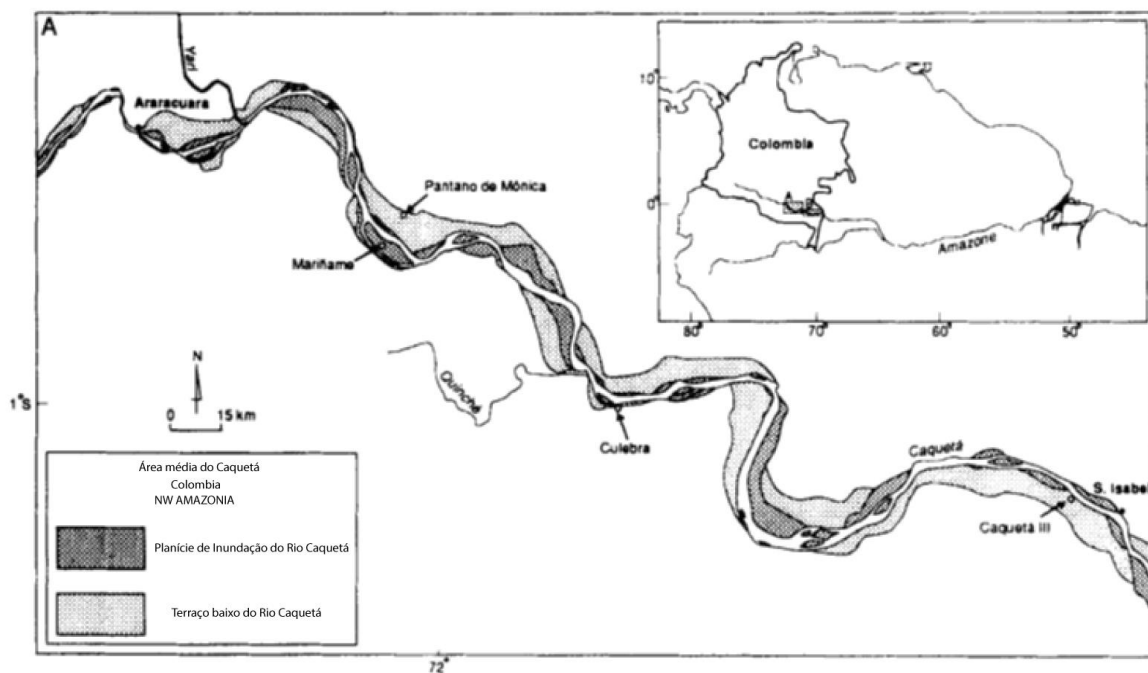


Figura 8 - Rio Caquetá (Japurá) próximo à fronteira com Brasil. São destacados a planície de inundação e os terraços mais baixos. Extraído de Van der Hammen et al. (1992).

3.2. Grandes Rios

A questão sobre o que qualifica um rio como um grande rio vem sendo debatida há um bom tempo por geólogos. Miall (2006) e Gupta (2007) ambos apontam o trabalho de Potter (1978) como um dos primeiros a realizar esse questionamento.

Potter (1978) tem como objeto de seu trabalho, o estabelecimento de parâmetros básicos petrológicos e químicos para uma melhor interpretação de arenitos antigos, ao estudar sedimentos depositados por rios grandes modernos. Entretanto surge o questionamento sobre o que pode ser considerado como um grande rio. Chega à conclusão de que essa resposta é dependente de fatores como área de drenagem, comprimento do curso de água, grande volume tanto de fluído como de detrito despejado em sua foz, dando certa ênfase em seu trabalho à área de drenagem da bacia e comprimento do rio, por serem dados mais disponíveis na época.

Latrubesse (2008) aponta que o consenso sobre o quão grande um rio tem de ser para ser considerado grande ainda está longe de ser estabelecido, embora alguns pontos em comum podem ser levantados, como a insignificância da influência de processos de caráter local (e.g. fenômenos de pequeno porte, deslizamentos e quedas de árvores) no fluxo do canal e por controles mais regionais, como tectônica, clima e área fonte (Potter, 1978, Miall, 2006, Tandon e Sinha, 2007). Miall (2006) ainda aponta como um indicador importante do tamanho do sistema fluvial a escala dos elementos deposicionais formados, fator importante principalmente na identificação de depósitos antigos. Em Ashworth e Lewin (2012) é comentado que grandes rios são maiores que bacias hidrográficas individuais, atingindo muitas vezes dimensões transcontinentais, sendo o produto de uma série de diferentes domínios com funções fluviais e características diversas (climáticas, sedimentares, morfológicas), o que confere a eles uma grande singularidade e faz com que sejam altamente diferentes entre si e de rios menores, os quais se extraiu a maior parte do conhecimento de sistemas fluviais reunidos até então.

Alguns autores optaram por impor valores mínimos para certos parâmetros, com a finalidade de se estabelecer a divisão entre grandes rios e rios menores. Tandon e Sinha (2007), ao listar os grandes rios pelo mundo, selecionam aqueles atendem um ou mais requisitos listados, como área de drenagem superior à 800000 km², comprimento superior à 2500 km, vazão média de 7500 m³/s e carga suspensa e dissolvida superior à 100 Mt anuais. Galeazzi et al. (2021) cita um limiar de 10000 m³/s na vazão máxima para diferenciar grandes rios. Latrubesse (2008) também adota como um dos principais fatores na determinação do que qualifica um rio como um grande rio a vazão, utilizando o limiar estabelecido pela *Global Commission on*

Continental Paleohydrology de média anual acima de 1000 m³/s, e classificando rios com média anual acima de 17000 m³/s como sendo mega rios.

Uma característica notada por alguns autores é a prevalência de padrões de canais em planta do tipo *anabranching* nos rios de grande porte (Latrubesse, 2008, Ashworth e Lewin, 2012). Os mecanismos que induzem a formação de multicanais em um sistema fluvial ainda hoje são objeto de estudo e questionamento, com uma possível razão o aumento da eficiência do transporte de sedimentos, reduzindo a largura de canais e aumentando a potência de corrente, sem que haja mudança no gradiente do rio (Nanson e Knighton, 1996). Latrubesse (2008) propõe que o padrão final de grandes rios é *anabranching*, entretanto tal aproximação é criticada por outros autores, que afirmam que poucos dados são apresentados para sustentar tal afirmação (Wang et al. 2022). Ashworth e Lewin (2012), embora também indiquem a dominância de multicanais em grandes rios, citando exemplos como os rios Ob, Paraná e Jamuna, mostram que os mecanismos da formação destes é diversa, sendo atingido de diferentes formas nos três rios citados, apontando para uma complexidade maior, e inerente a sistemas fluviais grandes, que aquela apresentada por Latrubesse (2008).

3.3. Rio Japurá: Dimensões, características e evolução

O rio Japurá, nome que recebe ao adentrar o território brasileiro, tem sua nascente na Colômbia como Caquetá e possui, aproximadamente, 2100 quilômetros de extensão (Silva et al. 2015), até sua convergência com o rio Solimões, nas proximidades do município de Tefé, no estado de Amazonas. Sua área de drenagem possui cerca de 248000 Km² (Latrubesse, 2005), com alguns autores indicando até 289000 Km² (Silva et al. 2015), integrando aproximadamente 4% da Bacia Amazônica. É classificado, juntamente com rios como Marañon, Ucayali e Madre de Dios, como um sistema fluvial de nascente Andina por Latrubesse (2003), caracterizado como *anabranching* por possuir ilhas estáveis e vegetadas que dividem o fluxo do rio (Nanson e Knighton, 1996), com tipicamente 2 a 3 canais principais, divididos por barras entre 3 e 15 quilômetros de comprimento e 1 a 8 quilômetros de largura, de sinuosidade média, em seu baixo curso, de 1,14 (Tamura et al. 2019).

Devido a suas características e dimensões, o rio Japurá pode ser classificado como um grande rio, seja pelo critério estabelecido por Latrubesse (2008) ou de Tandon e Sinha (2007), uma vez que possui fatores que permitem sua identificação como um: aporte sedimentar e vazão média anual. No que diz respeito ao aporte sedimentar, o rio Japurá apresenta cerca de 133 t/Km² ano, muito superior à outros rios como o Mississipi (102 t/km² ano), Paraná (43 t/Km² ano) e Congo (9 t/Km² ano); sua vazão anual média, 18600 m³/s supera a dos rios Paraná e Mississipi, e o classifica como um mega rio (Latrubesse, 2008). Além disso, pode-se dizer que atravessa domínios distintos com funções fluviais diferentes, tal qual os grandes rios de escalas transcontinentais comentados por Ashworth e Lewin (2012).

A evolução do rio Japurá, por ser um sistema fluvial de cabeceira andina e que compõe a bacia do Amazonas, está fortemente relacionada à construção da cordilheira dos Andes durante o Cenozoico e com a evolução da Bacia Amazônica em si. Autores como Hoorn (2009a) e Figueiredo et al. (2009) defendem a hipótese de mudança do curso do Amazonas e estabelecimento da configuração transcontinental por volta do 11 Ma, no início do Mioceno superior. Durante a maior parte do período verificado por Hoorn et al. (2009a), do Cretáceo a grande parte do Neogeno, a principal fonte de sedimentos da região amazônica tem origem no próprio Cráton Amazônico, sendo este cenário alterado para fontes andinas apenas nos últimos milhões de anos.

Durante o Mioceno, na região do oeste da Amazônia, devido à influência do tectonismo dos Andes, se iniciou uma mudança no padrão de drenagens da região (Hoorn et al. 1995). No início do Mioceno, o sistema de drenagem do oeste da Amazônia caracterizava-se por rios com cabeceira no cráton e na cordilheira central, fluindo em direção ao Caribe. Próximo ao meio do Mioceno, um sistema de pântanos, lagos e canais de maré se instalou, influenciado principalmente pelo soerguimento dos Andes e aumento do espaço de acomodação nas regiões sub-andinas e bacias intracratônicas, tendo seu auge entre 16 e 11 Ma., na formação do sistema Pebas, quando a inundação da região atingiu a sua maior área. Durante esse período, o sistema fluvial Amazonas ainda não apresentava caráter transcontinental, possuindo um sistema leste, desaguando no Oceano Atlântico e outro oeste correndo para o sistema Pebas, separados pelo Arco de Purus (Hoorn et al., 2009b). Nesta fase, a região alagada a oeste tinha como principal fonte de sedimentos a Cordilheira dos

Andes, com alguma contribuição menor das áreas cratônicas a leste, marcando assim transição do domínio de sistemas de drenagem com cabeceira no cráton, predominantes até então, para sistemas de origem andina, que perduram até hoje. Toda a região ainda escoava para o Caribe e somente ao final do Mioceno, com a aceleração do soerguimento dos Andes, esta conexão foi cortada, isolando a Bacia Amazônica do Mar do Caribe. A cunha sedimentar avançou em direção ao Atlântico, mudando a condição da bacia para sobre preenchida; os sistemas fluviais do Oeste e do Leste da Amazônia foram conectados, acabando com a região inundada do oeste da Amazônia e estabelecendo o sistema fluvial do Amazonas Transcontinental, evidenciado pelo surgimento do leque do Amazonas por volta de 11 Ma., mudança na direção do transporte na bacia amazônica e no caráter dos sedimentos depositados sobre os carbonatos da Plataforma do Atlântico (Hoorn 1993, 1995, 2009b; Figueiredo et al. 2009).

Entretanto, autores como Campbell et al. (2006), Campbell (2010), Latrubesse et al. (2010) e Rosseti et al. (2015) argumentam para uma mudança na configuração da drenagem do Rio Amazonas para o Plio-Pleistoceno, afirmando, em alguns casos, ainda não existir evidências tectônicas, sedimentares, estruturais ou estratigráficas que suportem a hipótese de uma mudança anterior durante o Mioceno superior (Campbell, 2010). Latrubesse et al. (2010) afirmam que apenas no começo do Plioceno o sistema fluvial da Amazônia foi integrado e passou a levar grandes quantidades de água e sedimentos para o Atlântico, utilizando como argumento um evento de soerguimento da região central da Cordilheira dos Andes durante o período de 4 a 2 Ma, causado por uma subducção de baixo ângulo da placa de Nazca, que resultou em uma mudança no caráter deposicional do Sudoeste da Amazônia brasileira para erosiva, contribuindo com sedimentos para o sistema fluvial amazônico então formado. Campbell et al. (2006) por sua vez, apresentam argumentos para uma colocação do Plioceno para a configuração transcontinental do Rio Amazonas baseados na litoestratigrafia da Formação Madre de Deus, que teve sua porção superior depositada por sistemas deltaicos e lacustres durante o Plioceno, o que seria impossível caso o Amazonas Transcontinental já tivesse sido estabelecido no Mioceno. Também se utilizam de um aumento significativo nas taxas de deposição de sedimentos terrígenos no *Ceara Rise*, uma feição submarina a cerca de 800 Km da foz do Amazonas, datados de 2,5 Ma, mesmo período no qual cessou a deposição

dos sedimentos na Formação Madre de Dios, marcando o estabelecimento da deposição do sistema fluvial Amazonas Transcontinental. Nogueira et al. (2013) por sua vez, propõem o estabelecimento do caráter transcontinental do Rio Amazonas baseando-se primariamente na função do Arco de Purus, que atuou como divisor de bacias até o Pleistoceno, quando sofreu subsidência e permitiu a deposição de Formações fluviais pleistocênicas como a Içá, que apresenta correspondente a leste do Arco. Pupim et al. (2019) ainda afirmam que as mudanças na configuração da drenagem da Bacia Amazônica, sejam estas no Mioceno ou Plioceno, não foi o último grande evento de alteração da paisagem, explicitando que ainda no Quaternário houve mudanças significativas na paisagem da região amazônica, onde, após 45 e 35 Ka processos de incisão de vales dominaram a região, construindo os terraços conhecidos como Terras Altas, áreas permanentemente secas, fora do alcance de inundações periódicas. Terraços mais antigos e ainda não datados próximos a área estudada sugerem que ciclos de agradiação e incisão podem ter ocorrido ao longo de todo o Plioceno.

3.4. Análise de Elementos arquiteturais

3.4.1. Método proposto por Miall (1996)

O método de análise de elementos arquiteturais como proposto por Miall (1996), remonta desde trabalhos anteriores, como Allen (1966), onde se é sugerido a separação em hierarquias de fluxo a fim de se facilitar o estudo de campos de fluxos, sendo estas hierarquias associadas a formas de leitos distintas. Ao longo da década de 1970, diversos autores se utilizaram do conceito inicial de Allen (1966), acerca de hierarquias de formas de leito, para descrição e estudo de estruturas internas em diferentes sistemas deposicionais, como Brookfield (1977), que caracterizou superfícies de 1 a 3 ordem em um sistema de dunas eólicas, e Jackson (1975), que definiu três hierarquias de formas de leito em um sistema subaquoso. De acordo com Miall (1996), foi em Allen (1983) a primeira tentativa realizada de se formalizar o conceito de hierarquias de superfícies limitantes em ambiente subaquoso, nas rochas devonianas da Formação Brownstones em Gales (figura 9) e, baseando-se nos conceitos ali propostos, foi desenvolvido a análise de elementos arquiteturais como sugerida por Miall (1996) e em seus trabalhos anteriores.

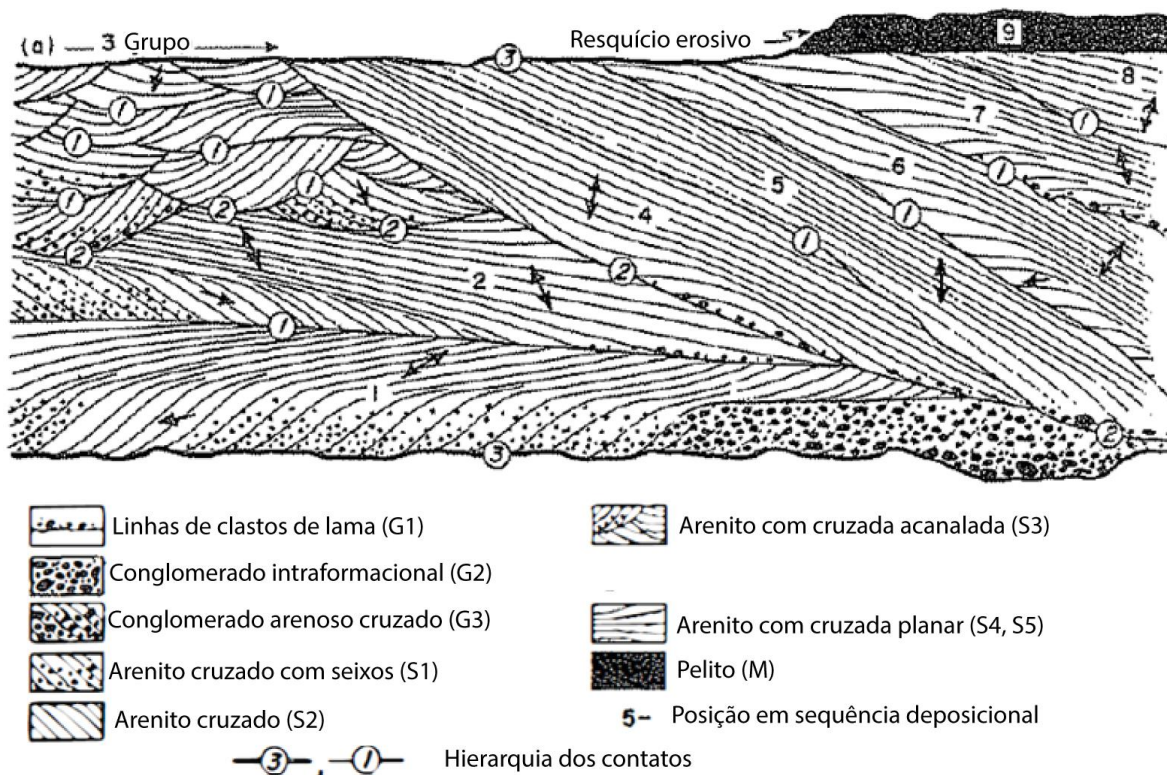


Figura 9 - Esquema dos arenitos Brownstones mostrando as hierarquias dos contatos. Extraído de Allen (1983).

A análise de elementos arquiteturais é descrita por Miall (1996) como uma alternativa à métodos convencionais de análise de fácies, conseguindo apreender informações que de outra forma seriam perdidas, como a natureza das superfícies de contato entre fácies. São necessárias várias etapas para se concluir as análises, desde a montagem do mosaico fotográfico, passando para reconhecimento de litofácies, tomada de medidas de paleocorrentes, hierarquização das superfícies limitantes e por fim, reconhecimento dos elementos arquiteturais e integração de todos os dados, a fim de se obter a interpretação mais precisa possível da evolução do sistema fluvial.

O primeiro passo na análise arquitetural de um afloramento, tal qual sugerido por Miall (1996), é a tomada do registro fotográfico. Para exposições rochosas de grande comprimento, sugere-se a confecção de um mosaico fotográfico com imagens que apresentam um mínimo de sobreposição. Atualmente, o uso de fotografias digitais, bem como o de *softwares* de edição de imagens permite a agilização desta fase, auxiliando também na precisão e correção de erros decorrentes de distorções da câmera.

A classificação das litofácies observadas em campo é uma das etapas de suma importância quando se realiza uma análise arquitetural de um afloramento. Miall (1996) aponta que o uso de conjuntos e classificações de litofácies previamente estabelecidos em trabalhos anteriores, pode ser de grande ajuda neste processo. A tabela 1 se trata de um sistema simples proposto em Miall (1996) para classificar as diferentes litofácies comumente encontradas em um sistema fluvial. Entretanto o autor ressalta que existem pesquisadores, como Bridge (1993), que são contra o uso de um sistema pré-estabelecido, afirmando que pode levar a aplicação sem senso crítico e a perda de informações que de outra forma seriam observadas. Miall (1996) sugere então a utilização de seu sistema, porém com atenção especial a detalhes e desvios do padrão, deixando sempre aberta a possibilidade de refinamento e adequações as unidades observadas em campo.

Tabela 1 - Litofácies propostas por Miall (1996), para classificação e individualização de elementos arquiteturais. Extraído de Figueiredo (2017), modificado de Miall (1996).

Código	Fácies	Estruturas sedimentares	Interpretação
Gmm	Suportado pela matriz, cascalho maciço	Gradação fraca	<i>Debris flow</i> plástico (viscoso)
Gmg	Suportado pela matriz, maciço	Gradação inversa a normal	Pseudoplástico <i>Debris flow</i> plástico (viscoso)
Gci	Suportado pelo arcabouço, maciço	Gradação inversa	<i>Debris flow</i> rico em clastos, ou pseudoplástico <i>debris flow</i>
Gcm	Clasto suportado, cascalho maciço	-	Pseudoplástico <i>debris flow</i> rico (carga de fundo inerte, fluxo turbulento)
Gh	Clasto suportado, acamamento cascalhoso	Acamamento horizontal, imbricação	Formas de leito longitudinais, depósitos de <i>lag</i> e <i>sieve</i>
Gt	Cascalho, estratificado	Cruzada acanalada	Preenchimento de canais pequenos
Gp	Cascalho, estratificado	Cruzada tabular	Formas de leito transversas, crescimentos deltaicos de barras remanescentes
St	Areia fina a muito grossa, pode ser seixosa	Cruzada acanalada solitária ou agrupada	Dunas linguoides sinuosas
Sp	Areia fina a muito grossa, pode ser seixosa	Cruzada tabular solitária ou agrupada	Formas de leito transversas e sinuosas
Sr	Areia muito fina a grossa	Marca ondulada	Regime de fluxo baixo
Sh	Areia fina a muito grossa, pode ser seixosa	Laminação plano paralela	Fluxo em leito plano (fluxo crítico)
Sl	Areia fina a muito grossa, pode ser seixosa	Cruzada de baixo ângulo (<15°)	Preenchimentos de escavações ou antidunas
Ss	Areia fina a muito grossa, pode ser seixosa	Escavações rasas	Preenchimentos de escavações
Sm	Areia fina a grossa	Maciça ou laminação insipiente	Depósitos de fluxo gravitacional
Fl	Areia, silte, argila	Laminação fina ou marcas onduladas muito pequenas	Planícies de inundação, canais abandonados ou depósitos de cheias
Fsm	Silte, argila	Maciço	<i>Back swamps</i> , ou canais abandonados
Fm	Silte, argila	Maciço, <i>cracks</i> de dessecação	<i>Drapes</i> , canais abandonados ou planícies de inundação
Fr	Silte, argila	Maciço, raízes, bioturbação	Solo incipiente

Seguinte a classificação de litofácies, Miall (1996) cita a importância da análise de paleocorrentes para elementos arquiteturais, informando que estes dados proporcionam informações relacionadas a estrutura interna dos afloramentos, ajudando na interpretação das mudanças do canal e de elementos associados. Enquanto a coleta de paleocorrente em grande escala, de diversos afloramento distintos ajuda a traçar a evolução regional do sistema fluvial, a coleta mais sistemática, mapeando as medidas tomadas nos elementos arquiteturais traçados de forma preliminar no afloramento, permitem a reconstrução das variações de canal e configuração das barras do rio que as formou. As medidas tomadas em um afloramento, se colocadas e documentadas de forma precisa, podem informar as variações sofridas pelo sistema fluvial estudado ao longo do tempo como resposta a mudanças paleogeográficas, bem como ajudam na reconstrução de paleofluxo tanto local como regional. As medidas podem mostrar grande variação até mesmo dentro de um mesmo elemento, contudo estas variações mostram a evolução do elemento em que estão inseridas ao longo do tempo e, se integradas com outras medidas de outros elementos, indicam a evolução e variação de todo o sistema fluvial estudado (Miall 1996).

O conceito de superfícies limitantes veio sendo trabalhado por diversos autores desde a década de 1970, com antecedentes, sem a utilização do termo, datando da década de 1950. Brookfield (1977) formalmente se utilizou do termo superfície limitante e as hierarquizou em três ordens distintas em depósitos eólicos, sendo as superfícies de primeira ordem as maiores, planas e convexas para cima, cortando através de estratificações cruzadas e outras estruturas de dunas; as superfícies de segunda ordem se caracterizam por limites de *sets* de estratificação cruzada e são comumente truncadas pelas de primeira ordem; os limites de terceira ordem são os menores e representam superfícies de reativação cuja origem pode ser atribuída por mudanças menores nos regimes de ventos devido a flutuações de velocidade e direção causadas pela interação entre forma de leito e fluxo de vento. Miall (1996) aponta o trabalho de Allen (1983) como o primeiro a hierarquizar superfícies limitantes em depósitos de origens fluviais, mais especificamente da Formação Brownstone, em Gales. As superfícies de primeira ordem, seguindo Allen (1983), englobam *sets* de estratificação cruzada e pacotes de laminações plano paralelas. Superfícies de segunda ordem abrangem os *sets* definidos pelas de primeira ordem, sendo estes

relacionados por características faciológicas e/ou direcionais de paleocorrente, podendo assim agrupar mais de um tipo litológico dentro das mesmas superfícies. As superfícies de terceira ordem compreendem os complexos formados pelas de segunda ordem, sendo comparadas a grandes superfícies erosivas e definem os maiores corpos estudados por Allen (1983).

Em Miall (1985), os conceitos e hierarquias de superfícies limitantes apresentados por Allen (1983) são aplicados e expandidos no desenvolvimento da análise de elementos arquiteturais. Em Miall (1996) se encontra todas as superfícies limitantes propostas e revisadas, chegando a um total de 8 ordens diferentes. As superfícies de primeira ordem de Miall (1996) são as mesmas propostas em Allen (1983). As superfícies de segunda até quarta ordem se encaixam na superfície de segunda ordem de Allen (1983), caracterizando-se por limitar *cosets* de estratificações cruzadas (2ª ordem de Miall (1996)); superfícies erosivas dentro de elementos (3ª ordem de Miall (1996)) e por delimitar os próprios elementos arquiteturais presentes em planícies de inundação e canal (4ª ordem de Miall (1996)). Por fim, as superfícies superiores à quinta ordem englobam processos atuantes ao longo de milhares a milhões de anos, muitas vezes impossíveis de se identificar em único afloramento.

A partir da identificação das superfícies limitantes, segue-se a interpretação e caracterização dos elementos arquiteturais presentes no afloramento. Em Miall (1996), elementos arquiteturais são definidos como elementos menores de preenchimento de canal, com geometria interna e externa definidas e assembleias faciológicas características, sendo compreendidos entre superfícies de terceira e quinta ordem na hierarquia por ele mesmo proposta.

Em Miall (1996), seus trabalhos anteriores (Miall, 1985; Miall, 1988) acerca de elementos arquiteturais são revisados. Foram descritos oito elementos arquiteturais cuja ocorrência se dá nos canais: canais (CH); formas de leito e/ou barras de cascalho (GB); depósitos sedimentares de fluxo gravitacional (SG); formas de leito arenosas (SB); depósitos de acreção jusante (DA); depósitos de acreção lateral (LA); depósitos de areia laminados (LS) e elementos de depressões em confluências (HO). Miall (1996) ainda adiciona elementos arquiteturais encontrados em regiões exteriores ao canal, na planície de inundação (*overbank*): *Levee* (LV); depósitos de canais de

crevasse (CR); leques de crevasse (CS) e sedimentos finos de planície de inundação (FF).

Canais (CH) são os elementos onde se encontram os sedimentos mais grossos de um sistema fluvial. Miall (1996) recomenda a designação de canal ao elemento arquitetural somente quando não se é possível dissecá-lo em outros elementos facilmente, devido à simplicidade de seu preenchimento e estruturas. Canais são limitados por uma superfície de quinta ordem, concava para cima, podendo existir em mais de uma escala dentro de um canal maior, resultando em um registro mais complexo. Devido à grande variedade de fácies encontradas em um canal, não existe um conjunto específico diagnóstico deste elemento arquitetural.

As barras de cascalho (GB) são formadas em rios em que a vazão é alta, portanto, a energia do transporte é suficiente para carregar sedimentos mais grossos. Durante episódios onde o fluxo de água é mais intenso e a descarga de sedimentos é maior, essas barras crescem, apresentando um afinamento para cima e para jusante (Miall, 1985). Tipicamente, barras de cascalho formam corpos empilhados com superfícies erosivas entre eles. É comum a intercalação destas barras com elementos do tipo fluxo gravitacional (SG). Depósitos de fluxo gravitacional (SG) ocorrem como elementos lobados, por vezes empilhados uns sobre os outros.

Formas de leito arenosas (SB) acomodam uma vasta gama de formas de leito, como campo de dunas de fundo, assembleia de preenchimento de canal raso, assembleia de topo de barra, ocorrendo em diversos estilos fluviais e em assembleias verticais diversas. Miall (1996) classifica estes depósitos nos quais o crescimento se deu por meio de processos predominantemente agradacionais, separando-os dos elementos de acreção lateral e jusante (LA e DA respectivamente), que também possuem caráter arenoso. O empilhamento de várias formas de leito arenosas distintas representa mudanças no regime de fluxo, tanto de curta quanto longa duração.

Miall (1996) descreve depósitos tanto de acreção jusante (DA) como os de acreção lateral (LA), como elementos arquiteturais formados onde processos de acreção predominam sobre os demais dentro de um canal. A análise arquitetural é essencial para estas formas de leito, uma vez que apresentam complexas estruturas internas tridimensionais. A característica comum aos depósitos de acreção jusante

(DA) são diversos *cosets* de formas de leito, geralmente arenosas, relacionados entre si através de superfícies limitantes, todos mergulhando gentilmente no sentido do fluxo

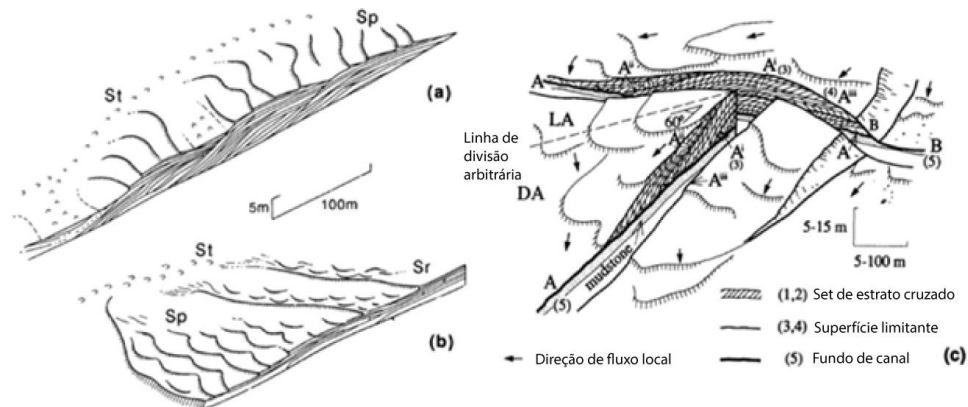


Figura 10 - Elementos de acreção jusante. a) e b) são cortes paralelos à direção da acreção. Em c) é mostrado a transição entre um DA e LA. Modificado de Miall (1996)

do canal que os formou, com alguma variação tolerada, podendo até mesmo ocorrer mergulhos à montante. Tais estruturas e características indicam a persistência passada de uma barra ativa e de forma irregular. É comum a existência em uma mesma barra, a transição entre depósitos acreção jusante para lateral, como indicado pela figura (10) de Miall (1996), sendo essa marcada por uma diferença angular de 60 entre a orientação da superfície de acreção e da estratificação cruzada das formas de leitos.

Depósitos de acreção lateral (LA), de acordo com Miall (1996), são formados – não exclusivamente – pelo crescimento de barras em pontal, cuja sentido se dá de forma oblíqua ao fluxo do canal, formando diversas superfícies de 3ª ordem que mergulham de maneira branda, correspondentes aos incrementos de acreção. A geometria interna e as litofácies que constituem os elementos de acreção lateral (LA) são variados e dependentes da geometria do canal e da carga sedimentar, podendo ocorrer tanto em sedimentos grossos e cascalhosos a até finos, na fração silte e argila, entretanto, a acreção lateral sempre se faz presente.

Os dois últimos elementos de canais descritos por Miall (1996) são depósitos de areia laminados (LS), depositados durante eventos de inundação rápida sobre superfícies erosivas, mostrando variação vertical quando as condições de fluxo começam a diminuir ao final da inundação; e elementos de depressões de confluências (HO), estes tendo geometria similar à de um canal, com uma curvatura

mais fechada que proporciona bordas mais inclinadas. São preenchidos por uma combinação de acreção lateral e vertical, com o mergulho dos estratos cruzados podendo ser paralelos ou oblíquos ao eixo do elemento. Por ser um depósito sedimentar mais profundo que a média do canal, seu potencial de preservação é maior do que de outros elementos de canal.

Os elementos formados na planície de inundação foram todos agrupados em um único elemento por Miall (1985), sendo posteriormente divididos em Miall (1996) em três grupos distintos, caracterizados pelos sedimentos depositados: elementos formados pelo extravasamento do fluxo do rio para a planície de inundação (relativamente grossos); elementos de granulação mais fina, depositados sob condições de mais baixa energia, durante inundações efêmeras, por exemplo; e sedimentos bioquímicos, derivados de processo de pedogênese, evaporação ou atividade orgânica.

Os elementos mais marginais ao canal, depositados pelo extravasamento do fluxo do rio, são constituídos por *levees* (LV), canais de crevasse (CR) e leques de crevasse (CS). *Levees* (LV) podem apresentar alguns metros de espessura e atingir poucos quilômetros de extensão, consistindo em intercalação rítmica entre siltitos e arenitos laminados com *ripples*, sendo cada par rítmico caracterizando um evento de inundação. Canais de crevasse (CR) são canais de extravasamento de fluxo do rio, preenchidos por areia fina a média com laminação cruzada *ripple* e estratificação cruzada; ao desconfinar o fluxo do canal, deposita-se o leque de crevasse (CS), formando corpos lenticulares pouco espessos, mas de grande extensão horizontal, com várias estruturas hidrodinâmicas e arenitos com estratos cruzados e laminação cruzada *ripple*.

Por fim, temos o elemento classificado como finos de planície de inundação (FF), podendo atingir vários quilômetros de extensão e depositados por meio de decantação de sedimentos mais finos se comparados com àqueles depositados por extravasamento direto de fluxo do canal.

3.4.2. Críticas a análise arquitetural

Não foi sem críticas que se estabeleceu a análise de elementos arquiteturais. Um de seus principais críticos, Bridge (1993), explicita que tal aproximação pode levar a confusões devido a proliferação de termos que misturam observações com interpretações, dificuldade de aplicabilidade na prática, uso inadequado de diagramas e interpretação incorreta das propriedades descritas. Bridge (1993) menciona principalmente a adoção de um padrão para a classificação de litofácies, afirmando que tal prática pode levar ao erro por parte de pesquisadores inexperientes, ao tentar encaixar o que se observa em um esquema pré-estabelecido, ignorando observações importantes que poderiam ser feitas em campo. Também propõe questionamentos acerca das classificações e hierarquizações de superfícies limitantes, afirmando grande dificuldade da individualização e reconhecimento das superfícies entre 2ª e 5ª ordem propostas por Miall (1985, 1996), no que Miall (1996) mostra que existe grande similaridade entre o que foi proposto em seu trabalho e por Bridge (1993) (figura 11). Por fim, Bridge (1993) faz considerações sobre os elementos arquiteturais em si, não criticando o conceito em si, mas a forma com a qual Miall (1996) a trabalha, como a mistura de termos descritivos com interpretativos e a coexistência e não exclusão entre muitos dos elementos, podendo gerar resultados confusos e equivocados. Por sua vez, Miall (1996, 2014) sugere a adequação por parte dos pesquisadores a seus sistemas estudados, de forma a ampliar e melhorar a abrangência dos elementos arquiteturais, tal como sugerido por Fielding (1993).

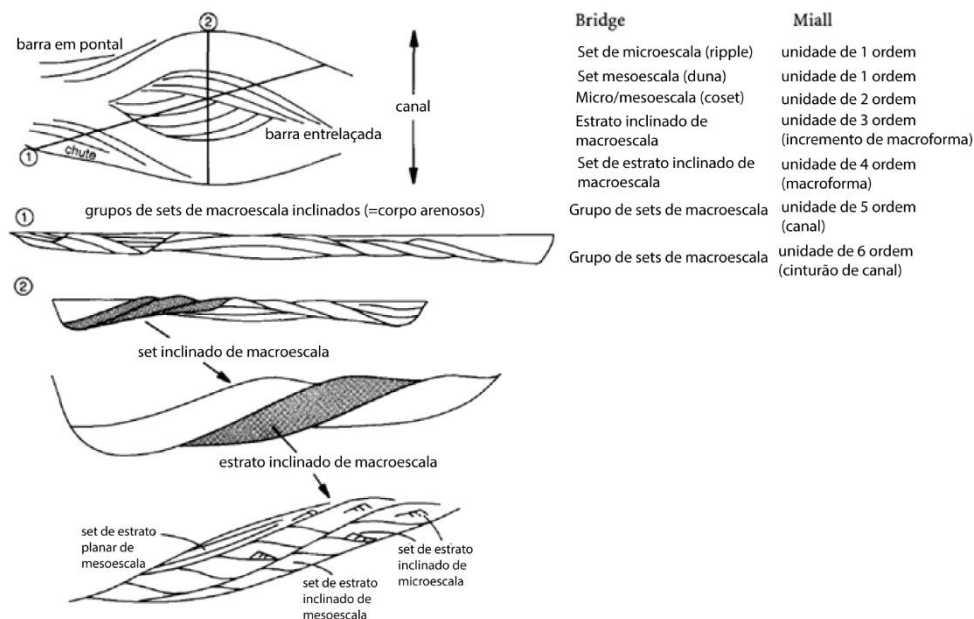


Figura 11 - Comparação entre as superfícies e corpos propostos por Miall (1996) e Bridge (1993) (a direita), e hierarquias propostas por Bridge (1993) (a esquerda).

Seguindo esta linha, Miall (1996, 2014) encoraja que seus oito elementos básicos não sejam empregados de maneira estrita, mas flexibilizados e adaptados, dando prioridade a observações e classificações sistemáticas como ferramentas essenciais em pesquisas futuras. A exemplo disso temos diversos trabalhos, desde alguns que fazem pequenas modificações ao que foi originalmente proposto por Miall (1996), como Hornung e Aigner (1999) e Li et al. (2015), os quais apenas acrescentaram algumas variações dos elementos arquiteturais originais (figura 12), ampliando, em ambos os casos, o número e detalhamento dos elementos do tipo canal, a até autores que se utilizam principalmente dos conceitos da análise de elementos arquiteturais modificando completamente os nomes empregados, como é o caso de Marconato et al. (2013) e Janikian et al. (2019), onde são utilizados as etapas da análise, porém as litofácies e elementos arquiteturais propostos são completamente diferentes dos proposto originalmente por Miall (1996).

simbolo:elemento	caracterização	geometria	litologia
CH(b)	Canal (carga de fundo) Formas de leito arenosas grossas, complexos de canais multiliterais e amalgamados. Fraca tendência de granodrecrescência ascendente.		
CH(m)	Canal (carga mista) Corpos arenosos sem estrutura. Alternância de camadas de silte e formas de leito de areia fina e grossa. Claras tendências de granodrecrescência ascendente.		
CH(s)	Canal (carga suspensa) Consiste principalmente de silte e argila. Raras formas de leito arenosas finas. Sem granodrecrescência ascendente observada.		
LA	Acreção lateral Alternância inclinada de camadas de lama e de areia fina a grossa, frequentemente os contatos são irregulares. Granodrecrescência ascendente clara.		
AC	Canal abandonado Consiste principalmente de silte e argila. Raras formas de leito de areia fina. Sem tendências visíveis de granodrecrescência ascendente. Pode ser reativado como canal.		
LV	Dique marginal Camadas inclinadas de areia, alternando com silte e areia fina. Tendência geral de granodrecrescência ascendente.		
CS	Leques de crevasse e inundações rasas Arenas grossas a finas. Podem ser pacotes espessos e amalgamados, estratificação ripple ou de baixo ângulo. Formas de leito raras. Clara tendência granodrecrescente.		
FF	Planície de inundação e paleossolos Camadas laminares horizontais. Contêm paleossolos desenvolvidos e gretos de contração.		
LC	Sedimentos lacustres Calcários dotomíticos, lamas escuras e lencóis arenosos de crevasse submersos.		

Elementos	Associação de fácies	Croqui	Descrição
Tipos de canais	CHm	Sp, St, Sm, Sh, Sl, Sr	Alta sinuosidade, superfície basal côncava para cima, corpos de arenitos assimétricos granodrecrescentes
	CHs	Sp, St, Sm, Sh, Sl, Sr	Baixa sinuosidade, superfície basal côncava para cima, possui ciclos com diminuição da espessura de sets e granulometria para o topo
	CHF	Sm, St, Sl, Sr, Fl	Consiste predominantemente por pelitos, raramente com intraclastos de lama
	HO	St, Sp	Forma côncava para cima, com superfície basal erosiva escavada, com tendência granodrecrescente, pode apresentar intraclastos argilosos
Tipos de barras	DA	Sp, St, Sh	Forma externa tabular, definida por superfícies acresionárias de Quarta ordem mergulhando na mesma direção que as cruzadas
	LA	Sp, St, Sr	Forma externa tabular, definida por superfícies acresionárias de Quarta ordem com séries únicas tangenciais na base
	UB	Sp, St, Sr	Sets de estratificação cruzada de grande porte, 1 a 5 m de espessura, maior que 10 m de continuidade lateral
	CB	Sp, St, Sh, Sr	Corpos de arenitos com cruzadas e ripples, dezenas a centenas de metros de cont. lateral e mais que dez metros de espessura
Planície de inun.	OF	Fm, Fl	Unidades do tipo <i>sheet</i> de coloração roxa, pouco espessas e muito contínuas lateralmente

Figura 12 - Elementos arquiteturais utilizados nos trabalhos de Li et al. (2015) e Hornung e Aigner (1999), modificando aqueles propostos por Miall (1996).

3.5. Reservatórios fluviais de hidrocarbonetos

Um volume significativo de hidrocarbonetos, sejam esses gás ou óleo, pode ser encontrado em rochas depositadas a partir de sistemas fluviais. Alguns dos grandes reservatórios incluem as areias betuminosas de Athabasca, a formação Statfjord no Mar do Norte, o campo Daqing na bacia Songliao, China, e a baía de Prudhoe no Alaska (Miall, 1996). Pode-se incluir também nesta lista a Faixa Petrolífera do Orinoco, Venezuela, uma vez que cerca de 65% do óleo produzido nesta região provém de depósitos fluviais (Martinius et al. 2012).

Uma classificação mais simples, separando os sistemas fluviais em apenas entrelaçado e meandrante já foi utilizada por alguns autores desde a década de 50, como Leopold e Wolman (1957), e mais atualmente por Slatt (2006). Entretanto, existem alguns trabalhos que criticam esta classificação, baseada na morfologia de rios modernos, argumentando a dificuldade de reconhecimento destes padrões geométricos em sistemas antigos. Com base nisso, Friend (1983) propõe um sistema classificativo que se utiliza da geometria dos corpos sedimentares e como estes se relacionam entre si, chegando a termos mais descritivos que, caso consiga se extrair informações suficientes, pode-se concluir o padrão do canal.

Em Miall (1996), tem-se a classificação de reservatórios fluviais, agrupados em 3 classes abrangentes, estas baseadas principalmente em 2 critérios: geometria e origem do sistema deposicional e geometria dos corpos de reservatório. Ambiente tectônico foi excluído como critério classificatório pois seu controle mostra grande variação, muito embora alguns dos tipos de reservatório propostos ocorram com maior frequência em certos ambientes do que outros.

No que diz respeito à geometria e origem do sistema deposicional Miall (1996) apresenta duas variantes: Cunhas clásticas e preenchimento de paleovales, exemplificados pela figura 13.

Cunhas clásticas são depósitos geralmente relacionados à declives e relevos íngremes, sendo comumente encontradas associadas a bacias bordeadas por montanhas, como *rift* e *foreland*. As cunhas clásticas possuem espessuras da ordem de alguns quilômetros e extensão lateral que abrangem algumas dezenas a centenas

de quilômetros, geralmente variando em sua porção distal para um sistema de delta lacustre ou marinho ou *strandplain* (Miall, 1996).

Preenchimento de paleovales representa uma geometria bastante distinta das cunhas clásticas. Nestes depósitos tem-se vales de algumas dezenas de quilômetros de largura, algumas dezenas de quilômetros de comprimento e alguns metros de profundidade, escavados por rios em regiões de baixo declive regional como em bacias cratônicas e regiões distais de bacias de *foreland*, durante períodos de queda de nível de base e preenchidos em períodos de transgressão (Miall, 1996).

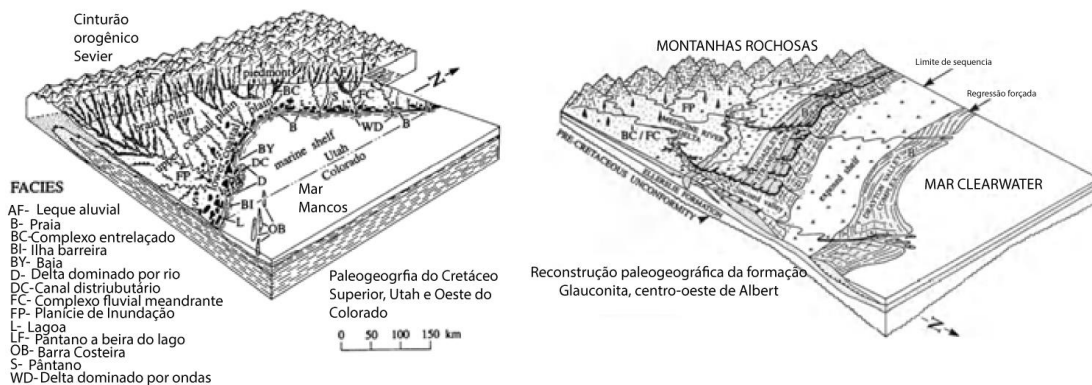


Figura 13 - Cunhas clásticas (direita) e preenchimento de paleovales (esquerda). Extraído de Miall (1996)

Quanto à geometria dos corpos de reservatório, Miall (1996) se utilizou das classificações propostas por Friend (1983) e Galloway (1981) ao construir sua própria. Observa-se uma aproximação com a classificação de Friend (1983) (figura 14) a qual distingue duas ocorrências principais de arenitos fluviais, uma restrita à canais (estes podendo ser fixos ou móveis, de migração lateral), formando geometrias do tipo *ribbon* e *sheet bodies* (quando ocorre migração de canais), e outra mais lateralmente distribuída, ao qual atribui o aspecto de *sheet flood*, onde não se reconhece a geometria do canal por variados motivos como intenso retrabalhamento, exposição de afloramento ruim ou simplesmente por fluxo não canalizado.

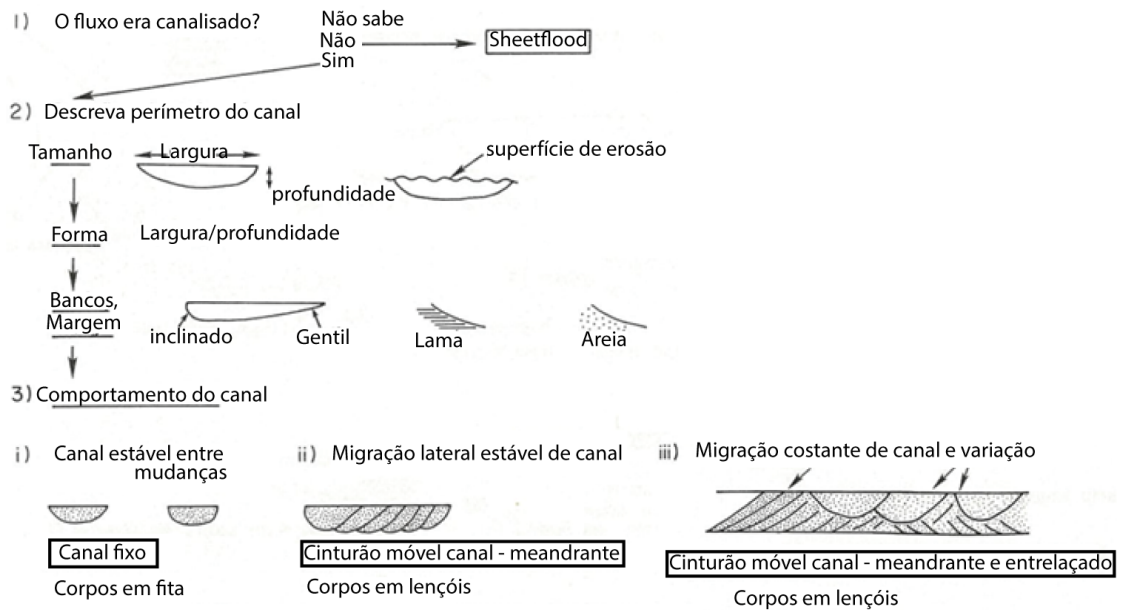


Figura 14 - Classificação de depósitos fluviais de Friend (1983). Modificado de Friend (1983)

A classificação de acordo com a geometria dos reservatórios de Miall (1996) foi utilizada para distinguir os estilos que ocorrem dentro das cunhas clásticas, separando-os em lençóis de arenito (*sheet sandstones*) e *ribbons* e lentes de arenito.

De acordo com Miall (1996), depósitos de lençóis de arenito ocorrem geralmente por rios de alto gradiente de inclinação e alta carga de fundo como rios entrelaçados, podendo também ocorrer em sistemas meandranes de baixa energia e baixa taxa de subsidência, onde os canais vão se sobrepondo e depósitos de planície de inundação são pouco preservados. O produto é um reservatório de grande extensão lateral, sendo necessária a atuação de um componente estrutural a fim de se formar uma armadilha para o sistema de hidrocarbonetos (Miall, 1996).

Define-se por depósitos de *ribbons* e lentes corpos de arenito acumulados em sistemas de canais, isolados uns dos outros (baixa conectividade entre os elementos arenosos) por camadas de material mais fino depositados em planície de inundação. Comumente esses depósitos são caracterizados por barras de pontal, indicando sedimentação por um canal sinuoso, entretanto podem ocorrer também depósitos por meio da ação de rios entrelaçados (Miall, 1996). A sobreposição de diversas barras de pontal pode levar a interpretação errônea de um padrão *ribbon*, neste caso um bom conhecimento dos elementos em subsuperfície permite a partição dos corpos de

reservatório, auxiliando no desenvolvimento da produção de hidrocarbonetos mais adequado e eficiente (Miall, 1996).

Através dos dois critérios propostos, Miall (1996) define três tipos de reservatórios fluviais: corpos de paleovale (*paleovalley bodies* – PV), corpos de lençóis (*sheet bodies* – SH) e corpos de barra e canal (*channel-and-bar bodies* – CB). O primeiro critério, acerca da origem deposicional do sistema, resulta na divisão em cunhas clásticas e preenchimento de paleovales e o segundo critério, sobre geometria do corpo de reservatório, divide os reservatórios encontrados em cunhas clásticas em corpos de lençóis e de barra e canal, como mostra a figura 15. Preenchimento de paleovale não é submetido ao segundo critério pois a geometria encontrada se caracteriza por *ribbons* e lentes.

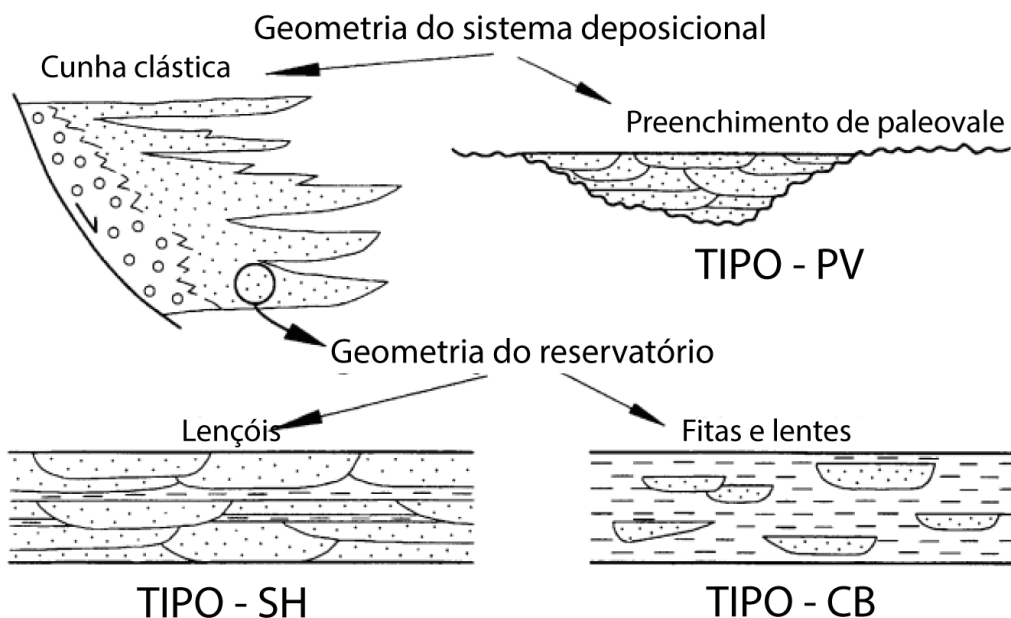


Figura 15 - Classificação dos reservatórios fluviais de hidrocarbonetos. Extraído de Miall (1996)

Corpos de paleovale (PV) são definidos pela geometria em *ribbons* dos reservatórios, podendo ser homogêneo internamente ou apresentar elementos encontrados no tipo barra e canal (CB). Geralmente representam cursos antigos de rios, com algum componente estuarino e quando forma campos produtores de hidrocarbonetos, estes estão inseridos em meio a camadas impermeáveis, com armadilhas estruturais (Miall, 1996).

Corpos de lençóis (SH) e de barra e canal (CB) embora ocorram em cunhas clásticas, são bastante distintos entre si. Corpos de lençóis formam reservatórios extensos, sendo necessário a participação de um componente estrutural para a formação da armadilha, enquanto corpos de barra e canal são mais restritos, seus reservatórios constituem-se de diversos corpos pequenos e armadilhas estratigráficas, podendo apresentar baixa interconectividade, dificultando a exploração de hidrocarbonetos e necessitando de grande conhecimento do sistema deposicional e suas heterogeneidades internas (Miall, 1996).

Faz-se a seguir uma breve revisão de quatro reservatórios de origem não-marinha: Areias betuminosas de Athabasca, na Bacia de Alberta, Canadá; Formação Statfjord, na Bacia do Mar do Norte; Campo Daqing, Bacia de Songliao, China e Faixa Petrolífera do Orinoco, Bacia do Leste da Venezuela, Venezuela.

3.5.1. Areias betuminosas de Athabasca

Um dos maiores e mais importantes reservatórios de óleo em sistema fluvial se encontra na bacia de Alberta, Canadá, nas areias betuminosas de Athabasca, contendo mais de 1,7 trilhões de barris de betume, com uma produção diária de 1,2 milhões de barris por dia (Fustic et al. 2012).

A maior parte do óleo acumulado em Athabasca se encontra na Formação McMurray, depositada durante o Cretáceo inferior, logo acima de uma superfície erosiva sobre calcários devonianos (Flach e Mossop, 1985). O consenso para a estratigrafia da Formação McMurray se inicia com uma unidade inferior de origem fluvial passando a um sistema fluvial-estuarino e por fim marinho raso (Fustic et al. 2012; Hassanpour, 2009; Carrigy e Kramers, 1973). Flach e Mossop (1985) descrevem o ambiente deposicional para a Formação McMurray como uma “planície costeira de baixo declive onde um grande rio corria para norte, assoreando rapidamente com o aumento do nível do mar, formou um mosaico de canais meandantes associados com lagos rasos e bacias salobras” e ao contrário do que outros autores como Hassanpour (2009) e Fustic et al. (2012) comunicam, Flach e Mossop (1985) descartam ambiente estuarino para a unidade do meio, afirmando que embora tenha ocorrido influência marinha no sistema, não existem evidências de

domínio da deposição por marés. Carrigy e Kramers (1973) ilustram a evolução da Formação McMurray em 3 estágios, alguns com sedimentação deltaica (figura 16).

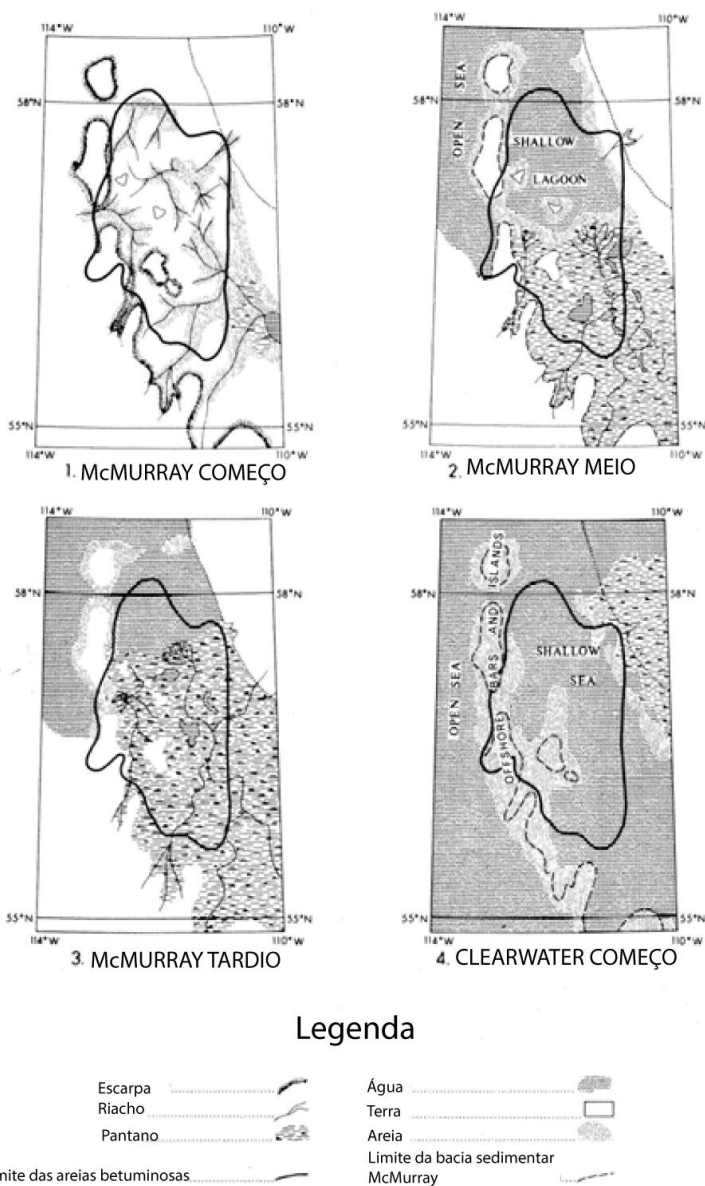


Figura 16 - Variação dos sistemas deposicionais da Formação McMurray. Extraído de Carrigy e Kramers (1973)

De acordo com Hassanpour (2009), o membro inferior da Formação McMurray apresenta areias finas a cascalhosas depositadas em sistema fluvial, com indicadores fósseis de influência marinha. Flach e Mossop (1985) observaram granodecrescência ascendente em uma unidade dominada por areia média a grossa, com presença de diversas outras litologias como areias argilosas e folhelhos escuros. Ao se aproximar do topo, marcas de raízes se tornam mais frequentes e a presença de uma assembleia

de palinomorfos típicos de água doce, com alguns raros de água salobra, corroboram para ambiente dominado por rios com alguma influência marinha.

A unidade do meio da Formação McMurray é, em termos volumétricos, a maior e mais importante fonte de betume do reservatório (Hassanpour, 2009; Hein, 2015). Consiste em depósitos fluviais influenciados por marés depositados de maneira discordante sobre o membro inferior, puramente fluvial, e gradando para um ambiente marinho marginal (Hein, 2015). Embora autores como Flach e Mossop (1985) afirmem não se tratar de ambiente estuarino por falta de estruturas que caracterizam a forte influência de marés, Hein (2015) aponta que tal confusão se deve à baixa quantidade de estudos detalhados que documentam os aspectos e estruturas sedimentares da Formação McMurray que indicam uma maior presença da ação de marés.

Hassanpour (2009) aponta duas associações de fácies que caracterizam os reservatórios da unidade do meio: areias com estratificação cruzada de grande porte e areias com estratificação heterolítica inclinada. Essas duas associações de fácies são equivalentes a associação proposta por Hein (2015) chamada de “canal estuarino influenciado por maré e barras em pontal”, descrita como sucessões de granodecrescência ascendente em canais meandantes estuarinos e barras em pontal, com predominância de arenitos finos a médios e *mudstones* de estratificação cruzada de grande porte, tabular e estratificação heterolítica inclinada. Nas estratificações heterolíticas inclinadas podem ser observadas estruturas típicas de influência de mares, além de fósseis traços. As outras duas associações de fácies descritas por Hein (2015) incluem “preenchimento de canais abandonados” e “margens marinhas dominadas por marés” e ou não constituem reservatórios (caso de preenchimento de canais abandonados) ou são reservatórios pouco expressivos.

O membro superior da Formação McMurray é constituído principalmente por folhelhos e areias argilosas bioturbadas, sendo a influência de águas marinhas indicada por assembleias de palinomorfos e de fósseis traços (Flach e Mossop, 1985). Em poços realizados na região mais a norte da bacia, encontra-se ambiente de mar aberto no mesmo nível do membro superior da Formação McMurray, indicando que a inundação desta foi diacrônica, iniciando primeiro nas porções mais setentrionais (Flach e Mossop, 1985). Hassanpour (2009) e Hein (2015) apontam que na literatura

existem autores que designam apenas membro inferior e superior para a Formação McMurray, afirmando problemas e dificuldades para mapeamento em escala regional.

Miall (1996) classifica o grupo Manville, o qual se encontra incluída a Formação McMurray, como reservatórios do tipo corpos de paleovale e corpos de barra e canal, este último designando as areias betuminosas de Athabasca.

3.5.2. Formação Statfjord

A Formação Statfjord é classificada por Miall (1996) como um reservatório do tipo corpos de lençóis (*sheet bodies* – SH), desenvolvida em ambiente fluvial entre o final do Triássico e começo do Jurássico, durante período de rift e pós-rift (MacDonald e Halland, 1993; Steel e Ryseth, 1990).

O campo petrolífero de Statfjord é o maior contido na região do Mar do Norte (figura 17), contendo mais de 6 bilhões de barris, com grande parte já recuperada em meados da década de 1990 (MacDonald e Halland, 1993). De acordo com Steel e Ryseth (1990) as sucessões do Mar do Norte depositadas durante o meio do Triássico ao meio do Jurássico ocorreram associadas à subsidência térmica pós-rift, ligadas à separação dos continentes iniciadas na região.

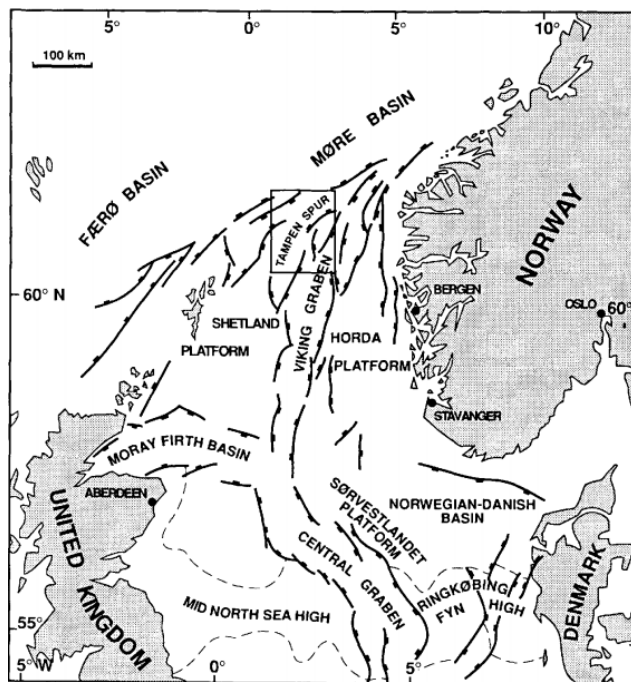


Figura 17 - Mar do Norte, localização do Campo Statfjord, no alto Tampen. Extraído de Hoymir (1992)

Segundo Ramm e Ryseth (1996) a Formação Statfjord se encontra soterrada entre 2 à 6 quilômetros de profundidade, sobre o Graben Viking, com espessuras que variam de 50 a 500 metros, variação esta atribuída à subsidência diferencial associada a sistemas de falhas ativas durante a fase termal pós-*rift* da região do Mar do Norte (Ryseth e Ramm, 1996).

Ryseth e Ramm (1996) interpretam, a partir de testemunhos, três associações de fácies dentro da Formação Statfjord. A primeira consiste em uma granodecrescência ascendente geral de arenitos conglomeráticos muito finos a muito grossos. A superfície mais basal é composta por conglomerados que passam para arenitos médios a grossos de estratificação cruzada ou sem estrutura, estes migrando verticalmente para arenitos finos com laminação *ripple* e plano paralela. O ambiente para esta primeira associação de fácies é interpretado como deposição dentro de canais fluviais, onde o material conglomerático foi transportado por correntes de tração, as estruturas sedimentares são associadas à migração de barras e dunas e a porção sem estrutura foi depositada em períodos de grande descarga sedimentar.

A segunda associação de fácies interpretada por Ryseth e Ramm (1996) é definida por fácies heterolíticas de intercalações entre arenitos médios à muito finos com horizontes lamosos de coloração vermelha e cinza, com presença de raízes e leitos de carvão. O ambiente deposicional interpretado, baseando nas presenças de raízes e leitos de carvão, é de planície de inundação vegetada. A coloração avermelhada sugere início do processo de pedogênese em local onde ocorre variação periódica do nível de água.

Para a terceira associação de fácies da Formação Statfjord, Ryseth e Ramm (1996) descrevem novamente fácies heterolíticas, com arenitos finos e lamitos bioturbados e arenitos grossos estruturados. A presença de laminações *ripple* simétricas, estratificações cruzadas de baixo ângulo e bioturbações de tocas acusam ambiente deposicional marinho marginal. Os arenitos mais grossos representariam canais influenciados por marés na desembocadura dos rios. Essa terceira associação marca a transição do ambiente fluvial da Formação Statfjord para o marinho raso. Steel e Ryseth (1990) ilustram a evolução da paisagem ao longo do final do Triássico

e começo do Jurássico na figura 18, mostrando a variação de canais fluviais para ambiente marinho.

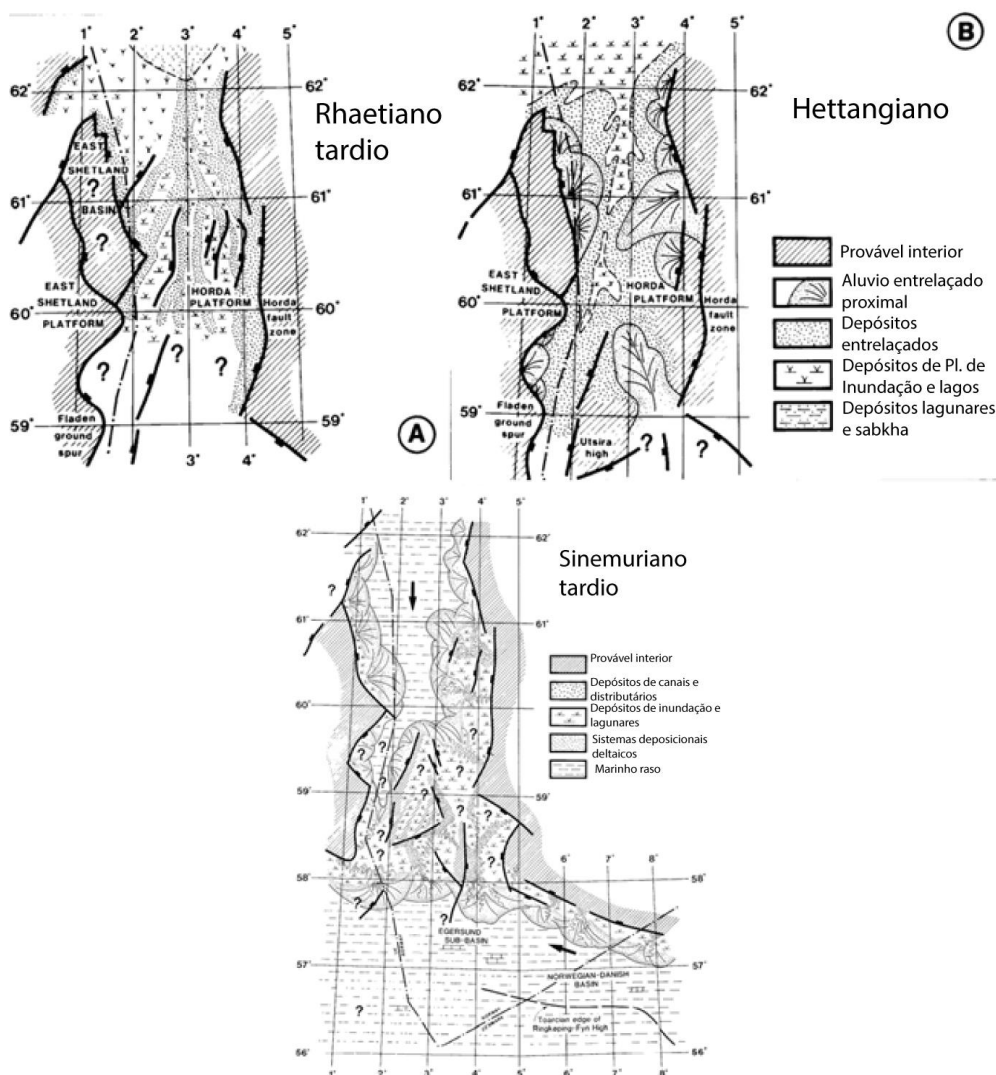


Figura 18 - Evolução dos sistemas deposicionais da Formação Statfjord. Extraído de Steel e Ryseth (1990)

A interpretação da morfologia dos canais que depositaram a Formação Statfjord foi bastante discutida. Autores como Ryseth (2001) e Hoymir et al. (1993) suportam interpretações de sistemas entrelaçados, utilizando para corroborar suas interpretações aspectos como predominância de estratificação cruzada acanalada, má seleção dos grãos e feições dos corpos de arenito empilhados em andares (*stacked multistorey*). Ryseth e Ramm (1996) também interpretam sistema entrelaçado para a Formação Statfjord, porém fazem ressalvas ao apontar características que poderiam representar um sistema meandrante estão presentes,

portanto, terminam por concordar com MacDonald e Halland (1993), que uma variedade de tipos de rios pode estar preservada no registro da Formação Staffjord.

De acordo com Miall (1996), a maior parte do petróleo desta região se encontra em armadilhas estruturais, com quase nenhuma armadilha estratigráfica de grande importância. Afirma ainda que trabalhos como Hoymir et al. (1993) e MacDonald e Halland (1993), que detalham e modelam as heterogeneidades do sistema são de extrema importância, uma vez que se trata de um campo petrolífero mais maduro e as técnicas de recuperação de óleo precisam ser mais eficientes a fim de extrair o máximo possível.

3.5.3. Campo Daqing

O campo de óleo Daqing é o maior campo petrolífero da China e um dos maiores do mundo que produz hidrocarbonetos a partir de reservatórios não marinhos (Yang, 1985). Localizado na bacia de Songliao, no noroeste da China, o campo Daqing compreende sete estruturas portadoras de óleo: Lamadian, Saertu, Xingshugang, Gaotaizi, Taipingtun, Putahoa e Aobaota (Jin et al. 1985; Yang 1985) (figura 19). O campo já produziu mais de 1,95 bilhão de toneladas, com uma média aproximada de mais de 50 milhões de toneladas por ano desde 1976, e produzia cerca de 25% de todo o óleo da China até 2010 (Tang et al. 2010).

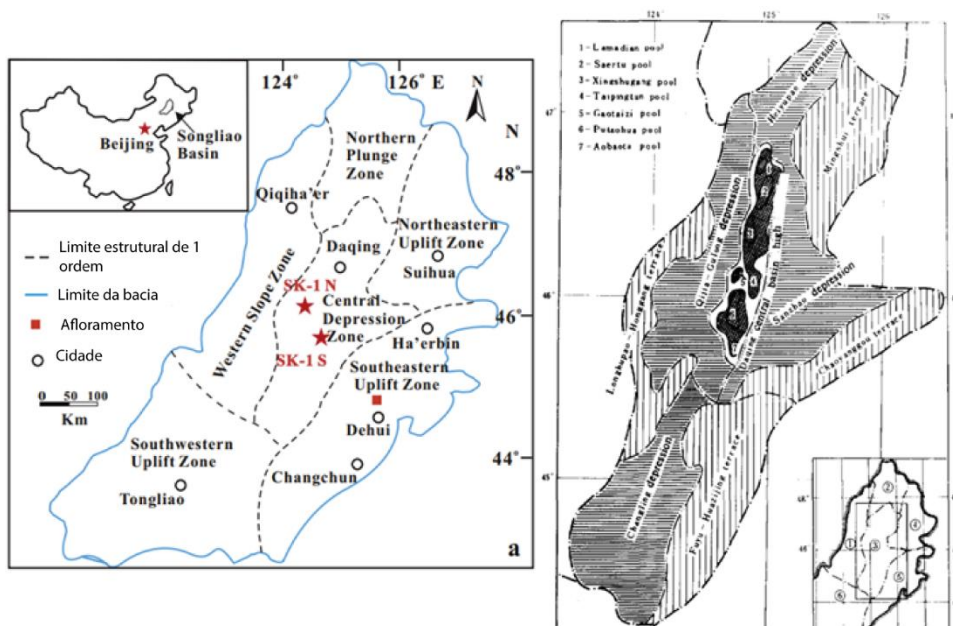


Figura 19 - Localização da Bacia de Songliao e do Campo Daqing. Extraído de Tong et al (2018) (direita) e Yang (1985) (esquerda).

A Bacia de Songliao é uma grande bacia de sedimentos de origem meso-cenozóica, com aproximadamente 750 quilômetros de comprimento e cerca de 350 quilômetros de largura, cobrindo uma área de 260000 quilômetros quadrados (Tong et al. 2018; Liu et al. 2017). Convém dividir a Bacia de Songliao em seis unidades tectônicas/estruturais: *Central depression*, *Northern Slope*, *Western slope*, *Northeastern Uplift*, *Southeastern Uplift* e *Southwestern Uplift*, (Liu et al. 2017). É uma bacia cuja gênese e evolução está associada a duas margens ativas durante o Mesozoico tardio, o cinturão Mongol-Okhotsk, que estabeleceu as falhas limitantes da bacia, e os cinturões orogênicos Sikhote-Alin, onde ocorreu subducção da Placa do Pacífico, cujos efeitos se manifestaram na forma de processos magmáticos e termais, com *upwelling* da astenosfera e processos extensionais também associados a esta margem (Wang et al. 2016).

Feng et al. (2010) reconhece quatro estágios de formação e preenchimento da bacia: *Upwelling* do manto (meio ao Jurássico tardio), fase *rift* (Jurássico tardio até Eo-Cretáceo), subsidência térmica pós-*rift* (Cretáceo inferior ao Cretáceo superior) e inversão estrutural (figura 20). De acordo com Tang (1982), o óleo na Bacia de Songliao se encontra no Mesozoico, mais especificamente nas formações cretáceas Quanton (ou Quantou/Qiantou), Qingshankou, Yaojia e Nenjiang, com alguns reservatórios de gás ocorrendo também nas formações Denglouku e Yingcheng (Feng et al. 2010).

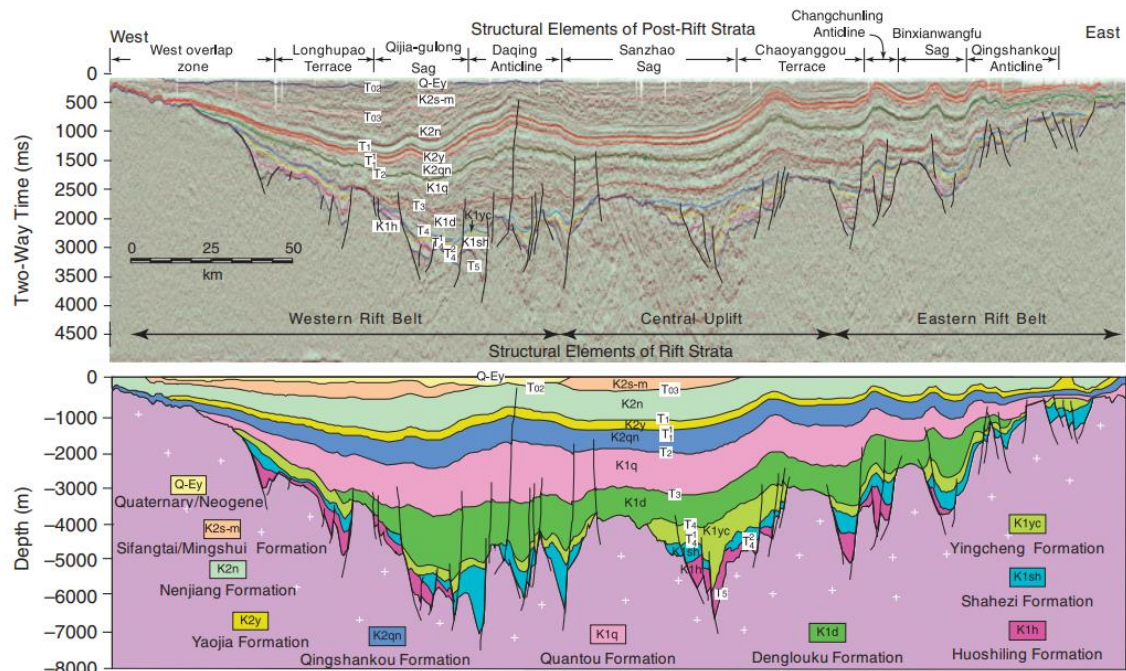


Figura 20 - Seção sísmica e estrutural da região central da Bacia de Songliao. Extraído de Feng et al. (2010).

As unidades portadoras de óleo foram depositadas durante o estágio de subsidência térmica da bacia e podem ser divididas em sequências do estágio inicial de subsidência térmica (Denglouku, Quantou e Qingshankou) e do estágio final (Yaojia, Nenjiang, Sifangtai e Mingshui, sendo apenas as duas primeiras portadoras de hidrocarbonetos) (Feng et al. 2010).

A Formação Denglouku consiste em intercalações de arenitos sem estruturas esbranquiçados, lamitos escuros ricos arenosos, conglomerados e argilitos, depositados na transição da subsidência mecânica para termal sob influência de leques aluviais que gradavam para planícies aluviais e ambiente de lago raso (Feng et al. 2010). A Formação Quantou, de acordo com Feng et al. (2010) tem sua litologia constituída por lamitos de diversas colorações, arenitos grossos e conglomerados, depositados em ambientes fluviais, cuja morfologia de canal varia de entrelaçado à meandrante, e lacustre próximo ao centro da bacia. Por fim, a última unidade depositada no estágio inicial de subsidência térmica, a Formação Qingshankou, foi sedimentada em ambientes deltaicos e lacustres, compreendendo litologias de intercalação de lamitos escuros, folhelhos ricos em óleo e arenitos e siltitos acinzentados. Na base da Formação Qingshankou foi observado transição de fácies representantes de sistema fluvial para lacustre (Feng et al. 2010).

As formações que compreendem o estágio final de subsidência térmica foram depositadas em ambientes semelhantes. A Formação Yaojia e a base da Formação Nenjiang consistem em lamitos avermelhados, acinzentados e esverdeados, arenitos e siltitos de origem fluvial e lacustre. A porção mais ao meio da Formação Nenjiang caracteriza-se por ambiente lacustre profundo, enquanto o topo apresenta feições de ambientes deltaicos e lacustre raso (Feng et al. 2010). As duas últimas formações do Cretáceo da Bacia de Songliao, Sifangtai e Mingshui foram depositadas em ambientes que variam de fluviais meandrante e entrelaçado, respectivamente, à deltaico e lacustre raso (Feng et al. 2010). Figura 21 mostra as variações das fácies ao longo do período de subsidência térmica durante o Cretáceo.

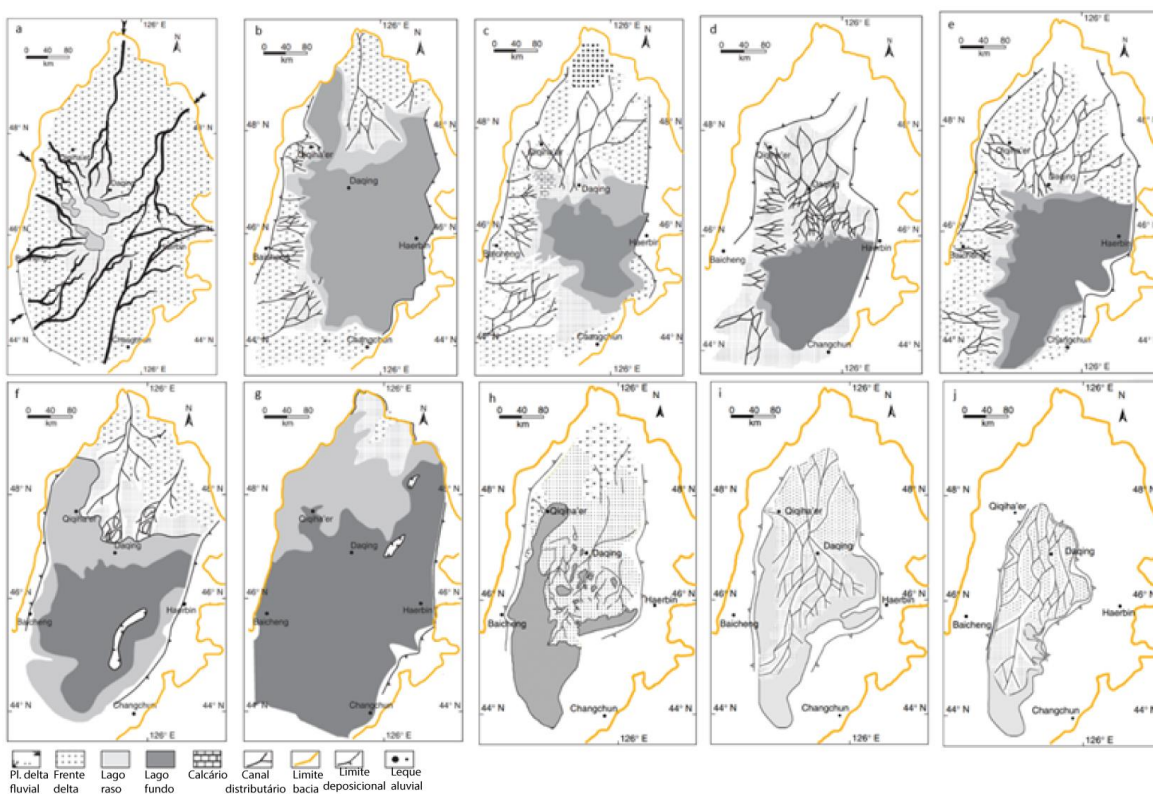


Figura 21 - Evolução dos sistemas deposicionais do Cretáceo da Bacia de Songliao. a) membro superior (3) da Fm. Quantou; b) 1, c) 2 e 3 mbs. da Fm. Qingshankou. d) 1, e) 2 e 3 mbs. da Fm. Yaojia. f) até j) 1 a 5 mbs. da Fm. Nenjiang. Mod. de Feng et al. (2010)

Tang et al. (2010) aponta o declínio da produção de óleo do campo Daqing. A figura 22 mostra que a produção de petróleo cairá para menos de 8 milhões de toneladas por ano por volta de 2060, enquanto a demanda da chinesa pelo recurso apenas aumenta. Tang et al. (2010) ainda informa que embora o investimento em cima do campo tenha sido alto, a descoberta de reservas recuperáveis continua a cair

(figura 22), sendo necessário a complementação da produção de gás e óleo a fim de se estender o tempo de produção do campo Daqing.

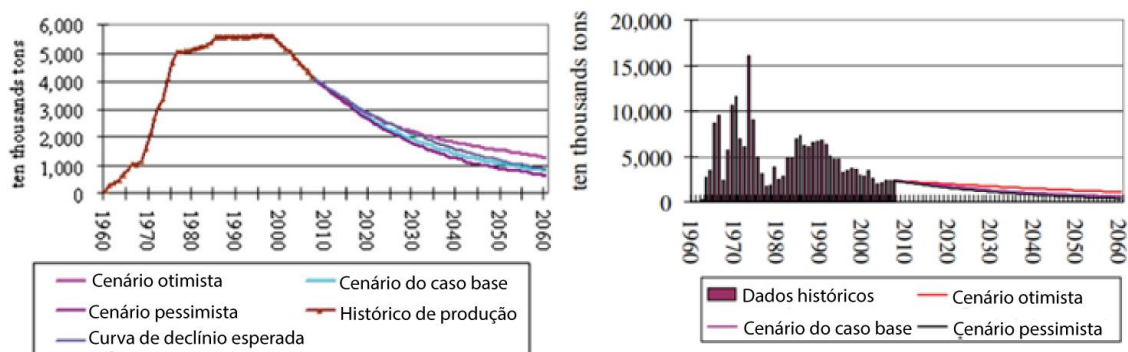


Figura 22 - Projeção do futuro da produção do Campo Daqing (direita) e projeção de novas reservas descobertas em Daqing (esquerda). Modificado de Tang et al. (2010)

3.5.4. Faixa Petrolífera do Orinoco

A Faixa Petrolífera do Orinoco (*Orinoco Heavy Oil belt*), localizada na porção sul da Bacia do Leste da Venezuela (figura 23), é uma grande região produtora de óleo pesado, contendo uma reserva estimada de 1,2 trilhão de barris de petróleo (Kopper et al. 2001). A Faixa Petrolífera, desenvolvida ao longo do sentido leste-oeste, paralela ao curso do rio Orinoco, é dividida em quatro regiões de características sedimentares e estratigráficas semelhantes, mas com características distintas em seu hidrocarboneto: Boyaca (antes Machete), Junín (antes Zuata), Ayacucho (antes Hamaca) e Carabobo (antes Cerro Negro) (Martinius et al. 2013).



Figura 23 - Localização da Faixa Petrolífera do Orinoco. Extraído de Martinus et al. (2012)

Hidrocarbonetos na Faixa Petrolífera do Orinoco ocorrem predominantemente em sedimentos clásticos terciários, principalmente na Formação Oficina, do Mioceno inferior (Kopper et al. 2001; Isea, 1987). Segundo Martinius et al. (2012), a Formação Oficina se sobrepõe de forma discordante sobre rochas do Grupo Trombador do Cretáceo e sobre rochas do embasamento mais a oeste (figura 24), formando depósitos de planícies fluviais com canais arenosos entrelaçados e sinuosos que variam a planícies deltaicas dominadas por rios com influência de marés, com presença de canais retilíneos e sinuosos. Posteriormente, um ambiente deltaico com partição mais igualitária de influências fluviais e marinhas é formado, este gradando para um ambiente essencialmente marinho que voltaria a formar delta, desta vez dominado por marés.

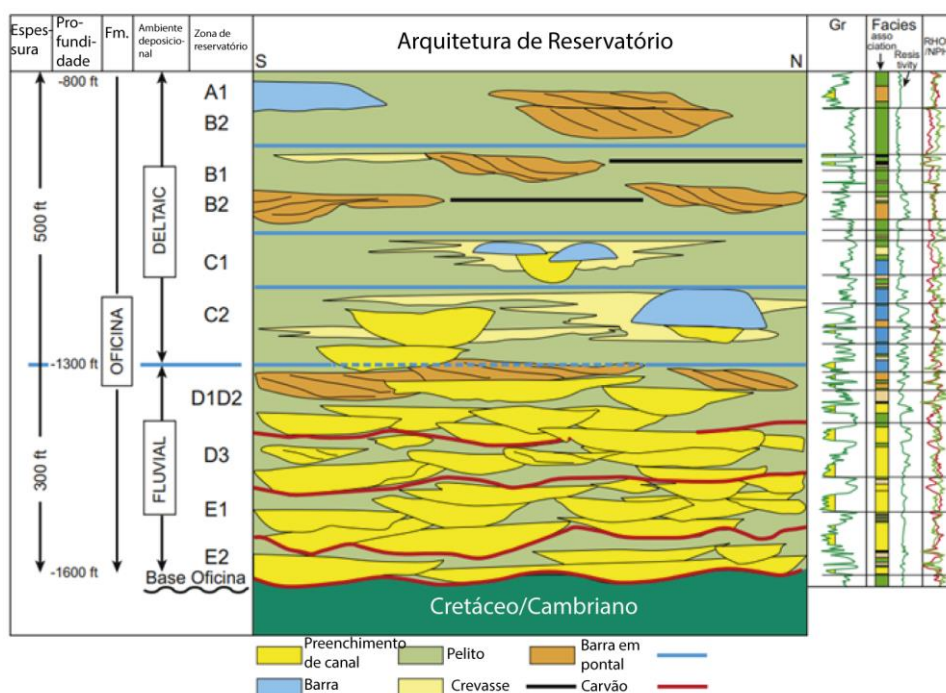


Figura 24 - Seção estratigráfica esquemática N-S da Formação Oficina na região de Petrocedeno. Extraído de Martinius et al. (2012)

Martinius et al. (2012) divide de maneira informal a Formação Oficina em sua área de estudo em parte inferior fluvial, responsável por cerca de 65% da produção de hidrocarbonetos, e parte superior deltaica, produzindo os restantes 35%, e interpreta oito associações de fácies para a Formação Oficina: 1 – Canais entrelaçados dominados por rios; 2 – Canais sinuosos dominados por rios; 3 – Canais

distributários dominados por marés; 4 – Canais meandantes de heterolíticas inclinadas (barras de submaré de acreção lateral e barras em pontal formadas em deltas dominados por maré); 5 – Barras de foz (*Mouth bars*); 6 – Leques de crevasse; 7 – Planícies interdistributárias e 8 – Planícies deltaicas e plataformas deltaicas. Esta variação de ambientes fluviais dominados por rios para ambientes deltaicos dominados por marés é observada também por outros autores, como Kopper et al. (2001) e Isea (1987).

O óleo na Faixa Petrolífera do Orinoco se encontra em armadilhas estratigráficas, com folhelhos miocênicos marinhos providenciando o selo do topo, enquanto o selo lateral é proporcionado por hidrocarbonetos biodegradados (Martinius et al. 2012; Martininus et al. 2013; Kopper et al. 2001). A grande maioria do óleo extraído na Faixa Petrolífera é proveniente do Grupo Querecual e da Formação San Antonio, ambos de idade cretácea, caracterizados por folhelhos marinhos e carbonatos betuminosos (Summa et al. 2003). De acordo com Summa et al. (2003), a migração secundária do óleo na bacia é complexa, uma vez que ocorre tanto paralela aos estratos e por meio das falhas de cavalgamento, e apresenta um sentido geral de norte a sul (figura 25). Variações na qualidade da rocha fonte, maturação e processos posteriores ao assentamento do hidrocarboneto contribuíram para uma grande variabilidade na qualidade do óleo venezuelano, onde se tem óleo de baixa qualidade do Cretáceo se misturando com óleos de alta qualidade do Terciário e processos como *water washing* e biodegradação, que afetam a qualidade do óleo após o assentamento (Summa et al. 2003).

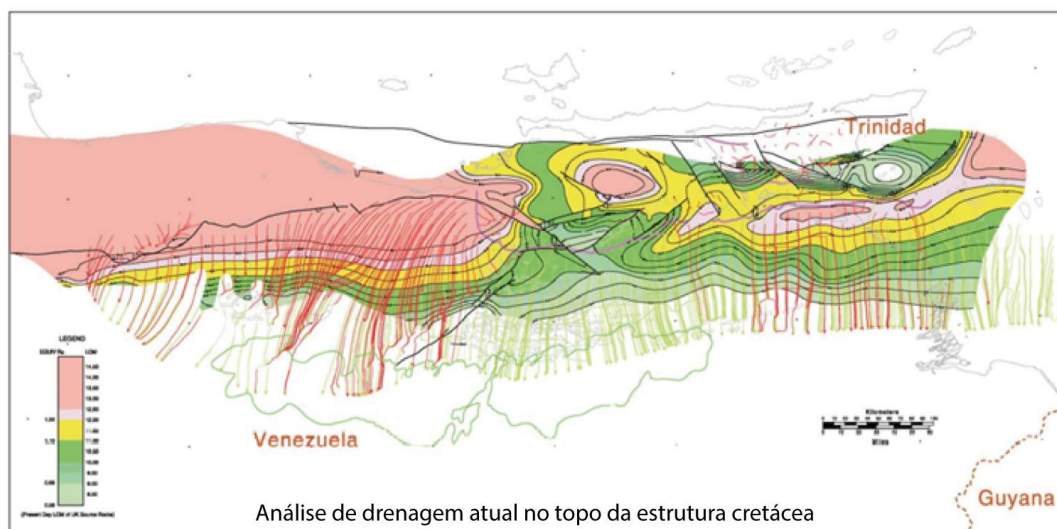


Figura 25 - Vetores de migração secundária de óleo (setas verdes) e de gás (setas vermelhas). Extraído de Summa et al. (2003)

3.6. Análogos de Reservatório e Elementos arquiteturais em reservatórios de HC

Análogos de reservatório vêm sendo usados há muito tempo como uma forma de complementar as lacunas deixadas por dados obtidos a partir de poços e sísmica, com a intenção de fornecer representações com o maior grau de acurácia possível. O uso mais comum é o de análogos em afloramento, com alguns casos mais raros utilizando dados em subsuperfície (Howell et al. 2014), o que vem mudando em anos mais recentes, com o desenvolvimento e uso de técnicas mais avançadas como o *Ground Penetrating Radar* (GPR) (Miall, 2014).

Um análogo de reservatório é definido por Howell et al. (2014) como um sistema que compartilha características similares com o objeto de estudo, sendo a semelhança entre eles utilizada para prever aspectos e comportamentos do sistema menos conhecido, providenciando que parâmetros pré-definidos com relação à similaridade entre os dois foram atendidos. Ainda é reforçado por Howell et al. (2014) que nenhum sistema deposicional possui um correspondente idêntico, portanto, o mais importante aspecto quando se utiliza análogos é a escolha correta deste. Se for feita de maneira errônea, pode levar a uma falha de modelo, onde este não prevê corretamente o resultado obtido, levando a gastos desnecessários, já que o uso de modelos é utilizado durante todas as fases de exploração de hidrocarbonetos.

São feitas, ainda por Howell et al. (2014), diversas considerações a respeito do uso de dados provenientes de análogos. Começando com a coleta destes dados, deve-se atentar para vários problemas como, por exemplo, a super-representatividade de corpos arenosos em relação aos mais finos, ou a dificuldade quando se encontra afloramentos mais complexos, com vários elementos amalgamados; problemas estes que podem levar a erros de interpretação. Embora as técnicas de coleta de dados tenham apresentado avanços consideráveis, passando a utilizar até mesmo LIDAR (*Light Detection and Ranging*), faz-se necessário precaução contra possíveis erros de coleta e medidas provenientes do afloramento do análogo, a fim de se evitar problemas durante a construção e refinamento do modelo. Outras considerações surgem a partir da limitação das informações que podem ser retiradas de afloramentos, como dados petrofísicos que podem diferir imensamente de seu

correspondente em subsuperfície, ou limitação nos afloramentos disponíveis, muitas vezes deformados ou com tamanho e faces que não permitem uma boa reconstrução da arquitetura interna dos elementos constituintes. Por fim, tem-se o problema que reside na escolha correta do análogo, já que não existem dois sistemas iguais. Este último foi discutido por Howell et al. (2014) e de forma mais extensiva por Alexander (1993), indicando que a escolha deve ser feita tendo em vista o propósito do modelo a ser construído, os principais objetivos e a base de dados disponível.

Quando se faz um estudo em análogos de reservatório, procura-se principalmente a compreensão e identificação de heterogeneidades que preencham a lacuna entre a escala dos dados de poços e a escala sísmica, representadas principalmente pelos elementos arquiteturais. Miall (1988) descreve que heterogeneidades dentro de um reservatório ocorrem em diversas escalas, todas as quais devem ser consideradas quando se parte para a modelagem do reservatório. As maiores apresentam dimensões baciais e podem ser modeladas e identificadas por meio de uma malha de poços mais espaçada. Quando a escala da heterogeneidade diminui para a escala de canais e elementos arquiteturais, é necessário um trabalho mais extenso, uma vez que muitas vezes essas estruturas e elementos não são observáveis em uma malha convencional de poços. Nesta etapa, a utilização de análogos expostos em superfície, dos elementos encontrados e suas distribuições, fornece restrições importantes para o modelamento de reservatórios fluviais, levando à elaboração mais fiel do sistema estudado.

No contexto de reservatórios de hidrocarbonetos fluviais, o conhecimento da arquitetura fluvial proporciona informações importantes acerca de características internas ao reservatório, tais como caminhos de maior permeabilidade e barreiras impermeáveis, que acabam por ditar as direções de fluxos dos fluídos contidos. Sistemas fluviais apresentam uma grande variabilidade faciológica lateral e de escalas, com elementos de geometrias distintas e incomuns que mudam drasticamente em poucos metros, dificultando a interpretação e modelamento destes reservatórios apenas com dados de subsuperfície, sendo imprescindível a complementação com dados obtidos por análogos em superfície, atuais ou não, fornecendo informações e características em três dimensões dos elementos arquiteturais e suas disposições no depósito (Miall, 1988).

A utilização de elementos arquiteturais na modelagem de reservatórios fluviais vem sendo utilizada continuamente por diversos autores como Laubourdette e Jones (2007); Colombera et al. (2012); Mitten et al. (2020) e Yue et al. (2019). A forma na qual se obtém os dados acerca dos elementos varia. Por exemplo, Yue et al. (2019) faz uso de uma combinação de técnicas sísmicas (*Spectral-decomposition seismic attributes*, *SDSA*, e *Forward seismic*) para a interpretação dos elementos arquiteturais em subsuperfície da Formação Minghuazhen na China, enquanto Labourdette e Jones (2007) se utilizam de fotografias aéreas e LIDAR, além de estudos de afloramento, para se obter dados em superfície da formação Escanilla na Espanha, que podem ser utilizados como parâmetros em modelos de reservatórios. Ambos produziram modelos em três dimensões dos sistemas fluviais estudados.

Em Mitten et al. (2020), elementos arquiteturais foram utilizados como parâmetros para a construção e comparação entre três métodos de modelagem de reservatórios: *Objects-based Model* (OBM); *Sequential indicator Simulations* (SIS); e *Multipoint Statistics* (MPS); bem como propor um método de construção de imagens de treinamento, o dado de entrada em modelagens MPS, facilmente aplicável em diversos reservatórios fluviais. O foco do trabalho consistiu na identificação de heterogeneidades na escala mesoscópica, constituída pela interação e conectividade entre os diversos elementos arquiteturais, em dois sistemas fluviais, o rio Jamuna, no noroeste da Índia, ainda ativo, e afloramentos do Cretáceo de Tuscher Canyon, nos Estados Unidos. Nos afloramentos do Cretáceo, foi utilizado fotogrametria digital, com 85% de sobreposição, para a construção tridimensional do mesmo em computador, onde foram analisados, de acordo com o método proposto em Miall (1996), as superfícies limitantes e elementos arquiteturais. O rio Jamuna foi analisado a partir de imagens de satélites e interpretado do mesmo modo que Tuscher Canyon. Foram identificados 4 elementos arquiteturais principais em Tuscher Canyon: Preenchimento de canal, barras de acreção jusante, barras de acreção lateral e complexos de talvegue, sendo considerado como reservatório apenas os elementos de acreção jusante, os quais também se mostraram como predominantes. A combinação dos dados obtidos nos dois sistemas foi utilizada para a construção das imagens de treinamento, providenciando os dados de entradas dos métodos de análise comparados, fornecendo as informações necessárias para restringir as heterogeneidades e conectividade dos modelos.

Como dito anteriormente, existem hoje várias formas de se adquirir dados acerca elementos arquiteturais, uma delas sendo a de Yue et al. (2019), que se utiliza de sísmica, em conjunto com outros dados, para mapear as heterogeneidades de escala mesoscópica da Formação Minghuazhen, na Bacia Bohai Bay, noroeste da China. O estudo foi feito em uma região onde já existiam 91 poços, a maioria com informações como raios gama, potencial espontâneo, densidade e acústico. Óleo já era extraído desta região, que começou a enfrentar problemas de produção em 2016 quando água do reservatório atingiu cerca de 85% da cota. Foi conduzido um estudo de sísmica 3D para uma melhor caracterização do reservatório e suas heterogeneidades, com o objetivo de otimizar a produção. Utilizou-se a técnica SDSA, fundidas por meio de algoritmo de *Support Vector Machine* (SVM), em combinação com modelamento sísmico avançado e em conjunto com os dados de poços, para interpretar e mapear os elementos arquiteturais, a fim de integrar um modelo tridimensional do reservatório. Foram identificados 5 elementos arquiteturais encontrados em rios meandantes, a acurácia da predição da distribuição espacial destes elementos foi aumentada pelo método proposto e como consequência, a produção de hidrocarbonetos da Formação Minghuazhen foi melhorada por meio de uma melhor colocação de poços horizontais, os quais 94% do comprimento se encontrava perfurando corpos arenosos de reservatório.

Labourdette e Jones (2007) estudam a Formação Escanilla, localizada na Bacia de Ainsa, Espanha, depositada durante o Eoceno tardio por sistemas de rios entrelaçados. O problema abordado é a caracterização tridimensional das geometrias dos elementos arquiteturais fluviais por meio da descrição de afloramentos mais simples. Desta forma, Labourdette e Jones (2007) escolhem a região em questão por apresentar morfologia irregular, indentada, onde a observação em vários ângulos distintos da arquitetura é possível. A aquisição dos dados foi feita por meio Escaneamento Laser Terrestre, que emprega LiDAR (*Light Detection and Ranging*), e observações convencionais dos afloramentos, que quando combinadas, possibilitaram a confecção de um modelo determinístico da área, que inclui cerca de 30 canais individuais, com suas fácies devidamente identificadas. A nuvem de pontos e o modelo feito permitiram o mapeamento, quantificação e caracterização extremamente precisas das heterogeneidades e elementos arquiteturais, sendo canais, leques de crevasse e planície de inundação todos medidos a diretamente

através de processamento da nuvem de pontos. A principal vantagem do uso de LiDAR apontado por Labourdette e Jones (2007) é a rápida e precisa aquisição dos dados de arquitetura e heterogeneidades, que podem ser prontamente incorporados em modelos mais fiéis à realidade estudada, aumentando a acurácia das previsões dos reservatórios em subsuperfície por providenciar grande quantidade de dados quantitativos de alta precisão.

Os trabalhos brevemente descritos acima mostram como as heterogeneidades na escala de canais, ou seja, causadas por diferentes elementos arquiteturais, podem ser adquiridas de formas distintas, ou através de análogos ou até mesmo do próprio reservatório, por meio de diferentes métodos, desde observações convencionais de campo à utilização de técnicas complexas de sísmica, e como o conhecimento destas é de extrema importância para a criação de modelos cada vez mais preciso, que permitam o máximo do aproveitamento durante todas as fases da exploração de reservatórios fluviais.

4. MÉTODOS

Com o objetivo de se estabelecer aspectos sedimentológicos e arquiteturais das exposições ao longo dos 300 quilômetros percorridos do Rio Japurá, o presente trabalho se utiliza da integração de dados estratigráficos e fotográficos coletados em campo, incluindo medidas de paleocorrente e dados advindos de imagens de satélite, utilizados para a discriminação dos terraços fluviais seccionados pelo Rio Japurá.

4.1. Mapeamento de Terraços e Viagem de Campo

A primeira etapa, antecipando até mesmo a viagem de campo, foi a separação e determinação dos terraços fluviais perpassados pelo Rio Japurá. Tal qual Rossetti et al. (2005) fez com toda a região da Amazônia central, Almeida (2023) identificou e separou os terraços nos interflúvios dos principais rios da região, em uma escala de maior detalhe. Para tanto foram utilizadas imagens Landsat, disponibilizadas gratuitamente pelo USGS (*Unites States Geologic Survey*) e modelos digitais de terreno (MDE) gerados a partir de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com 30 metros de resolução espacial, produzindo um mapeamento de relevos, o qual permitiu a divisão dos terraços da região, com os mais velhos ocorrendo em maior

altitude e caindo gentilmente em direção aos rios Solimões e Negro. No presente trabalho, os mesmos critérios topográficos de separação dos terraços foram seguidos.

A viagem de campo foi realizada em janeiro de 2020 pelo grupo de pesquisa e teve como objetivos coletar dados sedimentares de pontos previamente selecionados por meio do mapa de terraços, e dados para análises geoquímicas e geocronológicas, ao longo de 9 dias, entre 10 e 19 de janeiro e cerca de 300 quilômetros do Rio Japurá, entre os municípios de Maraã, próximo a confluência com o Rio Solimões, e Japurá.

4.2. Análise de Elementos Arquiteturais

A análise de elementos arquiteturais, tal como proposta por Miall (1985,1996), tem como finalidade a criação de um método alternativo a análise de fácies, até então a forma mais comum de se estudar e documentar seções sedimentares. O principal diferencial é a coleta de informações e dados relacionados a variação lateral das camadas, depreendendo noções das geometrias dos corpos sedimentares, outrora perdidas por uma análise convencional de fácies. Para a conclusão do método de Miall (1996), são necessárias diversas etapas, desde a montagem do mosaico até a interpretação das sucessões e geometrias.

O primeiro passo a ser realizado quando se inicia a análise arquitetural de um afloramento é o registro fotográfico do mesmo. Pode-se capturar toda a seção em uma única fotografia, dependendo das dimensões do afloramento, mas para aqueles que superam as dezenas de metros de comprimento, Miall (1996) sugere a construção de um mosaico em que se tem um mínimo de sobreposição entre as imagens e uma distância fixa do afloramento, preservando assim uma escala onde se é possível observar os detalhes e superfícies a serem documentadas. Algumas observações feitas por Miall (1996) tomam como norma fotografias analógicas, porém o uso de fotografias digitais permite a manipulação e construção de mosaicos por meio de *softwares* de edição de imagens, permitindo uma agilização de todos os processos envolvidos nas próximas etapas da análise de elementos arquiteturais.

A aquisição em campo das fotografias utilizadas na montagem dos mosaicos foi feita mantendo-se uma distância fixa e realizando o caminhamento de barco ao longo de todo o comprimento do afloramento, tendo em mente as sugestões de Miall (1996) acerca de ângulo e distância constantes do afloramento, a fim de se evitar

grandes distorções nas imagens. Foram então agrupadas e processadas pelo *software* Autopano Giga, onde, de forma automatizada, por meio da utilização de pontos em comum na imagem e pelos metadados das fotografias, os mosaicos são montados, e por esse motivo a tomada de fotografias foi feita preferencialmente em sequência temporal ao longo do caminhamento. É de suma importância o controle de qualidade do produto, eliminando imagens e pontos (feitos no céu ou na água automaticamente pelo *software*, por exemplo) que comprometem a precisão e a resolução, bem como a adição de pontos, de forma manual ou semiautomática, a fim de se melhorar a quantidade da junção das fotos.

Seguindo a confecção dos mosaicos, se sucedeu a montagem das colunas estratigráficas e de uma tabela de litofácies, utilizando para tanto os dados de caderneta de campo, referentes a estruturas sedimentares, granulação, espessura das camadas e conteúdo fossilífero, enquanto a tabela de litofácies foi feita simplificando e agrupando as diversas fácies descritas nos pontos realizados na viagem de campo, resultando em 7 fácies distintas e em duas associações de litofácies, uma para canal, com duas subassociações, e uma outra para sedimentos de planície de inundação. Buscou-se nesta etapa seguir a orientação de Miall (1996), que sugere que os próprios pesquisadores montem e adequem a classificação de litofácies aos próprios sistemas fluviais estudados, se assemelhando a trabalhos como os de Marconato et al. (2013) e Janikian et al. (2019), os quais se utilizam de litofácies diferentes daquelas encontradas em Miall (1996) para a análise de arquiteturas.

A etapa seguinte consiste na identificação de estruturas e camadas sedimentares presentes nos afloramentos, caminhando para a identificação e individualização das associações de fácies presentes, utilizando os mosaicos para tanto. Pelo método de Miall (1996), é nesta etapa onde as superfícies limitantes são identificadas e marcadas, dando maior importância para aquelas de 3ª ordem e superior, pois são as que definem os elementos arquiteturais. É nesta etapa também onde as litofácies são atribuídas às geometrias observadas nos mosaicos. De acordo com Miall (1996), esta fase tem começo no campo, onde observações e dúvidas com relação ao afloramento, superfícies e fácies presentes podem ser tiradas, aumentando assim a acurácia das interpretações posteriores.

Em trabalhos mais recentes, Miall (2014) aponta para métodos mais apurados de se fazer a análise de elementos arquiteturais, envolvendo tecnologias mais recentes com GPR (*Ground Penetrating Radar*) e LiDAR (*Light Detection and Ranging*), capazes de gerar modelos tridimensionais e até mesmo em subsuperfície dos elementos de um sistema. Entretanto, ressalta que as mesmas diretrizes para o cumprimento da análise ainda se aplicam.

4.3. Paleocorrentes

A análise de paleocorrentes se traduz na identificação de estruturas e aspectos da rocha, como estratificação cruzada, fósseis e grãos imbricados, que permitem a determinação do paleofluxo, por meio da medição sistemática dessas características cuja origem se relaciona diretamente com fluxo de água, indicando direção azimutal de movimentação (Miall, 1974; Potter e Pettijohn, 1977; Ponte, 2019).

Em um sistema fluvial as estruturas comumente utilizadas para a determinação de paleocorrentes são estratos cruzados e laminações *ripple*, fornecendo informações acerca da direção do curso de água do rio gerador. Quanto mais medidas forem tomadas, maior a acurácia da paleocorrente medida, sendo necessário um menor número de medições em casos em que os azimutes se apresentam de forma mais unimodal (Tucker, 1982).

Por se tratar de dados vetoriais, foi escolhida a linguagem python de programação como auxiliar no tratamento e processamento estatístico das medidas de paleocorrente, por existir bibliotecas pré-existentes que facilitam esses processamentos, incluindo a plotagem em diagramas de roseta para a representação gráfica das medidas coletadas em cada afloramento, onde a área hachurada (em azul, no caso deste trabalho) representa o que seriam as classes de um histograma, com os raios sendo proporcionais a raiz quadrada da frequência (Ponte, 2019).

A direção média de cada um dos pontos onde foram coletadas medidas de paleocorrente é calculada por meio da aplicação de estatística de dados angulares. Fisher (1993) determina o cálculo do vetor médio de um conjunto de dados circulares

decompondo as medidas em senos e cossenos, seguido da aplicação da radiciação da soma quadrática destes valores, tal qual a fórmula:

$$C = \sum_{i=1}^n \cos \theta_i$$
$$S = \sum_{i=1}^n \sin \theta_i$$
$$R^2 = C^2 + S^2 \text{ sendo } (R \geq 0)$$

Onde θ_i = ângulos/azimutes medidos e n = número de medidas

A direção do vetor médio é dada por:

$$\sin \bar{\theta} = S/R \quad \cos \bar{\theta} = C/R$$

Em estatística, valores referentes à variância e desvio padrão são medidas de dispersão em torno de um valor. Contudo, os métodos de cálculo da estatística linear não podem ser aplicados à dados de paleocorrente, por serem medidas circulares. Quando se trata dados circulares, medidas da variância e/ou desvio padrão também medem a dispersão das medidas ao redor do sentido médio, porém o vetor médio é o resultado da soma vetorial dos dados coletados (Fisher, 1993).

Faz-se necessário a aplicação do método de Bootstrapping nas medidas, a fim de se estimar o erro do vetor médio. Bootstrapping consiste em um método no qual subamostras são selecionadas de maneira aleatória, apresentando repetição dos dados, a partir da amostra original coletada. As médias direcionais destas subamostras são em seguida calculadas, armazenadas e plotadas em histogramas, cujo resultado é uma distribuição normal de uma possível população original e hipotética, da qual se coletou as amostras. Se extrai então o erro padrão da média dessas novas distribuições, sendo estas medidas vinculadas ao erro do vetor médio. Dessa forma a avaliação do erro de toda uma população de medidas é possibilitada, mediante um único conjunto de amostra.

De forma similar à plotagem das paleocorrentes, o resultado do cálculo do vetor médio e de seu erro é exibido em um diagrama circular, com uma direção representando o vetor e uma área sombreada representando o erro, com um intervalo de confiança de 95%, em um diagrama simples.

5. RESULTADOS

Ao longo dos 20 pontos realizados nos aproximadamente 300 quilômetros, foi possível coletar informações relacionadas a estratigrafia de 16 deles, possibilitando a confecção de suas colunas estratigráficas. Aqueles com fotografias de qualidade suficiente para a montagem de mosaicos foram apenas 10. As medidas de paleocorrente foram coletadas em 13 dos 20 pontos.

5.1. Mapeamento de Terraços

O mapeamento de terraços foi uma etapa essencial para a determinação da visita de pontos de interesse nas margens do Rio Japurá quando na viagem de campo. O mapa foi produzido ao se sobrepor MDE, gerado a partir de dados SRTM, o que permitiu a identificação de feições morfológicas, principalmente diferentes altitudes de grandes áreas, correspondentes aos terraços. Em Almeida (2023), os mapas foram refinados com dados de afloramentos nas margens dos rios Solimões, Içá, Purus e Japurá, com a finalidade de reconstruir a paisagem pleistocênica e estabelecer um novo modelo de evolução da paleogeografia dos sistemas deposicionais fluviais da região central da Amazônia.

Foram estabelecidos, na bacia de drenagem do Rio Japurá, 4 hierarquias de terraços (figura 26), depositados pelos sistemas fluviais Japurá, Solimões, Negro, Juruá e Jutai. Os terraços foram individualizados em Almeida (2023) por conjuntos de informações, como a diferença altimétrica entre eles, levando em consideração variações na declividade e texturais encontradas no MDE, dados de cronologia e sedimentológicos de trabalhos anteriores e das viagens de campo realizadas. Os interflúvios estudados (terraços) foram interpretados como deposição sob regime avulsivo nodal de megaleques durante período no qual o nível de base se encontrava mais alto, com 4 estágios de incisão de vales durante queda de nível de base, gerando os diferentes terraços em diferentes níveis altimétricos. Outro aspecto importante abordado por Almeida (2023) no tocante a atribuição de sistema fluvial gerador ao seu terraço gerado durante o Pleistoceno, foi a comparação do tamanho dos raios de curvatura dos *scroll bars* identificados sobre os terraços com aqueles formados pelos

grandes rios amazônicos atuais, permitindo a correlação entre cada rio e seu leque deposicional.

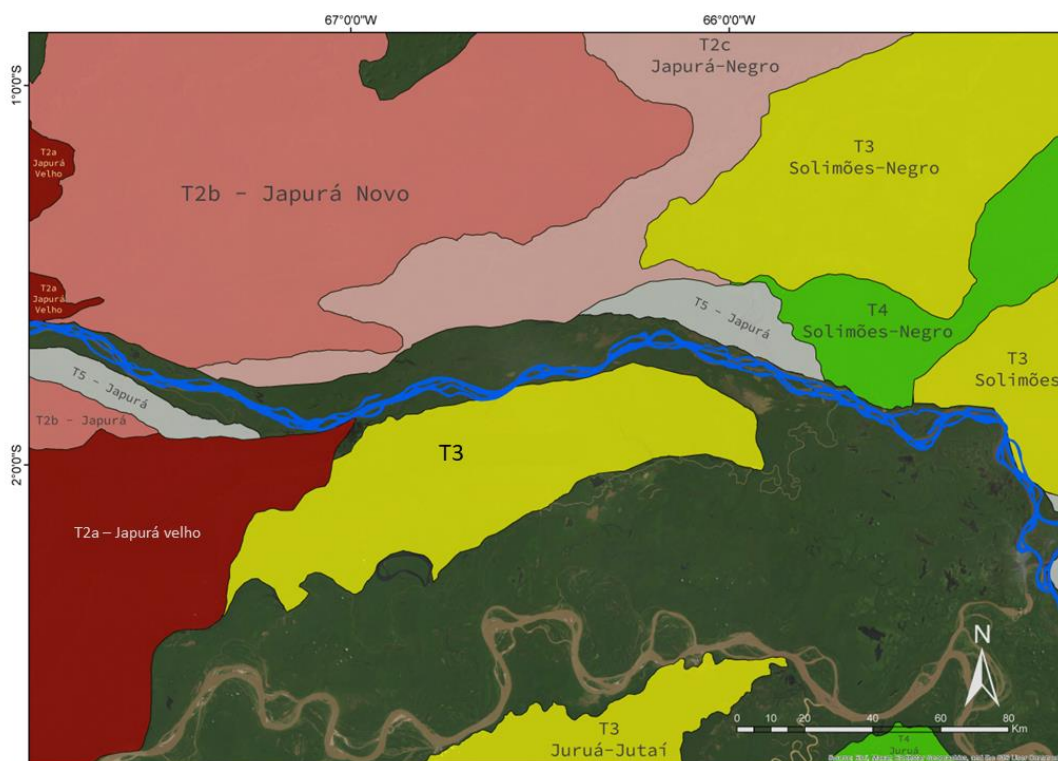


Figura 26 - Mapeamento de terraços na área de estudo.

5.2. Fácies

Das informações de caderneta de campo e colunas estratigráficas, foi possível a identificação de 7 fácies distintas, apresentadas na tabela 2. Grande parte das fácies observadas ocorrem em vários dos pontos visitados, com exceção de conglomerados, observado apenas no ALC 104. Algumas peculiaridades também são exclusivas de pontos individuais, como a ocorrência de icnofósseis, descrita na fácies L1, estes verificando-se apenas no ponto ALC 102.

Tabela 2 – Tabela das fácies observadas em campo.

Código	Fácies	Descrição	Interpretação
L1	Lamas sem estruturas laminadas	Sedimentos na fração argila ou silte, podendo conter areia muito fina. Sem estrutura ou laminada, podendo conter em alguns casos icnofósseis.	Deposição por decantação de material fino em suspensão em ambientes de baixa energia.
L2	Silte arenoso, podendo conter	Sedimentos finos, geralmente na fração silte, podendo conter areia fina e	Migração de <i>ripples</i> de cristas sinuosas. <i>Ripples</i> cavalgantes são formadas onde

	argila, com laminação cruzada acanalada	lama, em sets que não superam 25 centímetros, com estratificação cruzada acanalada.	predominam tanto processos de decantação quanto de presença de corrente, em regime de fluxo inferior. Para que tais estruturas se formem em materiais finos como lama, é necessário que as partículas estejam floculadas em grãos na fração areia (Bridge, 2003).
A1	Areia com estratificação cruzada acanalada	Material arenoso, variando desde fino a grosso, em sets decimétricos a métricos de estratificação cruzada acanalada. Pode conter grânulos e seixos.	Migração de dunas subaquáticas de cristas sinuosas, geradas em condições de maior velocidade de fluxo (Ashley, 1990).
A2	Areia com ou sem intraclastos, siltosa, sem estrutura ou laminada	Areia fina a média, em alguns pontos apresenta fração silte e por vezes grande quantidade de mica. Sem estruturas ou laminado, com ou sem a presença de intraclastos.	Areia sem estrutura, gerada a partir da destruição das estruturas por processo de liquefação (Marconato et al. 2013).
A3	Areia com ou sem grânulos e estratificação cruzada tabular	Fácies arenosa, variando de granulação fina a grossa e ocorrendo em diversos pontos geograficamente bem separados ao longo das margens do Rio Japurá. A estratificação cruzada tabular se faz sempre presente, podendo apresentar grânulos de forma esparsa e em alguns casos fração silte junto da areia.	Migração de dunas subaquáticas de cristas retas., geradas quando a velocidade de fluxo é menor (Ashley, 1990). Quando apresenta grânulos segregados nos <i>foresets</i> , indica escorregamento de material mais grosso levado por meio da migração de <i>ripples</i> .
H	Areia e silte com heterolítica.	Areia fina intercalada com silte em estratificação heterolítica, podendo ocorrer <i>ripples</i> em alguns locais.	Heterolíticas se formam onde existe a alternância da deposição por suspensão e por ação de corrente em ambientes de relativa baixa energia, causada geralmente por fluxos intermitentes (Marconato et al. 2013).
C	Conglomerado	Conglomerado de grânulos e seixos pequenos. Pode variar lateralmente para areia conglomerática com grânulos e seixos.	Sedimento de carga de fundo, mais pesado, transportado no talvegue do rio por arraste ou rolamento (Galeazzi et al. 2018)

5.2.1. Fácies L1 e L2 – Lamas sem estruturas e laminadas; Lama siltosa com laminações cruzadas acanaladas.

A fácies L1 é composta por argilas e siltes, sem estruturas ou laminados (figura 27). Essa litofácies ocorre em diversos dos pontos feitos, mostrando principalmente variação no volume de sedimentos depositados. Pode apresentar metros de espessura, como é o caso observado no ALC 96, ou apenas alguns centímetros, colocado em meio a grandes pacotes arenosos. Em apenas um dos pontos, ALC 102,

ocorre em meio a lama abundância de icnofósseis (figura 27 C), estes se apresentando como tubos verticais ou inclinados em alto ângulo, raramente sub-horizontais e sutilmente sinuosos, atingindo comprimentos de até 25 centímetros e larguras em torno de 2 centímetros de diâmetro. O preenchimento destes tubos se traduz em areia fina avermelhada, com uma laminação interna levemente concava para cima. A fácies L2 é mais restrita em sua ocorrência, sendo observada principalmente nos pontos ALC 97 em uma única camada de 12 centímetros de espessura, localizada entre duas camadas arenosas, ALC 98 e no ALC 99, onde tem uma expressiva ocorrência em diversas camadas tabulares

Em termos de gênese, a fácies L1 foi gerada onde predominam processos de deposição por decantação, ou seja, em corpos de águas predominantemente estagnadas, com pouco ou nenhum influxo de sedimentos ou corrente para a perturbação dos sedimentos, enquanto a L2 foi depositada onde processos de migração de formas de leito sob condições de baixa energia, sob regime de fluxo inferior, predominam. As *ripples* se formam onde existe a codominância de deposição de sedimentos por corrente e por decantação. Se a decantação supera a migração da forma de leito, são geradas formas de leito cavalgantes supercríticas (*climbing ripple*), contudo, a ocorrência em regime de fluxo subcrítico também pode ser observada (Bridge e Demicco, 2008). Bridge (2003) afirma que estratificações cruzadas não ocorrem em sedimentos cuja granulometria é inferior a fração de areia fina, entretanto, pode ser que se forme em lama caso os grãos estejam flocoados em partículas maiores, permitindo que se comportem com sedimentos mais grossos.

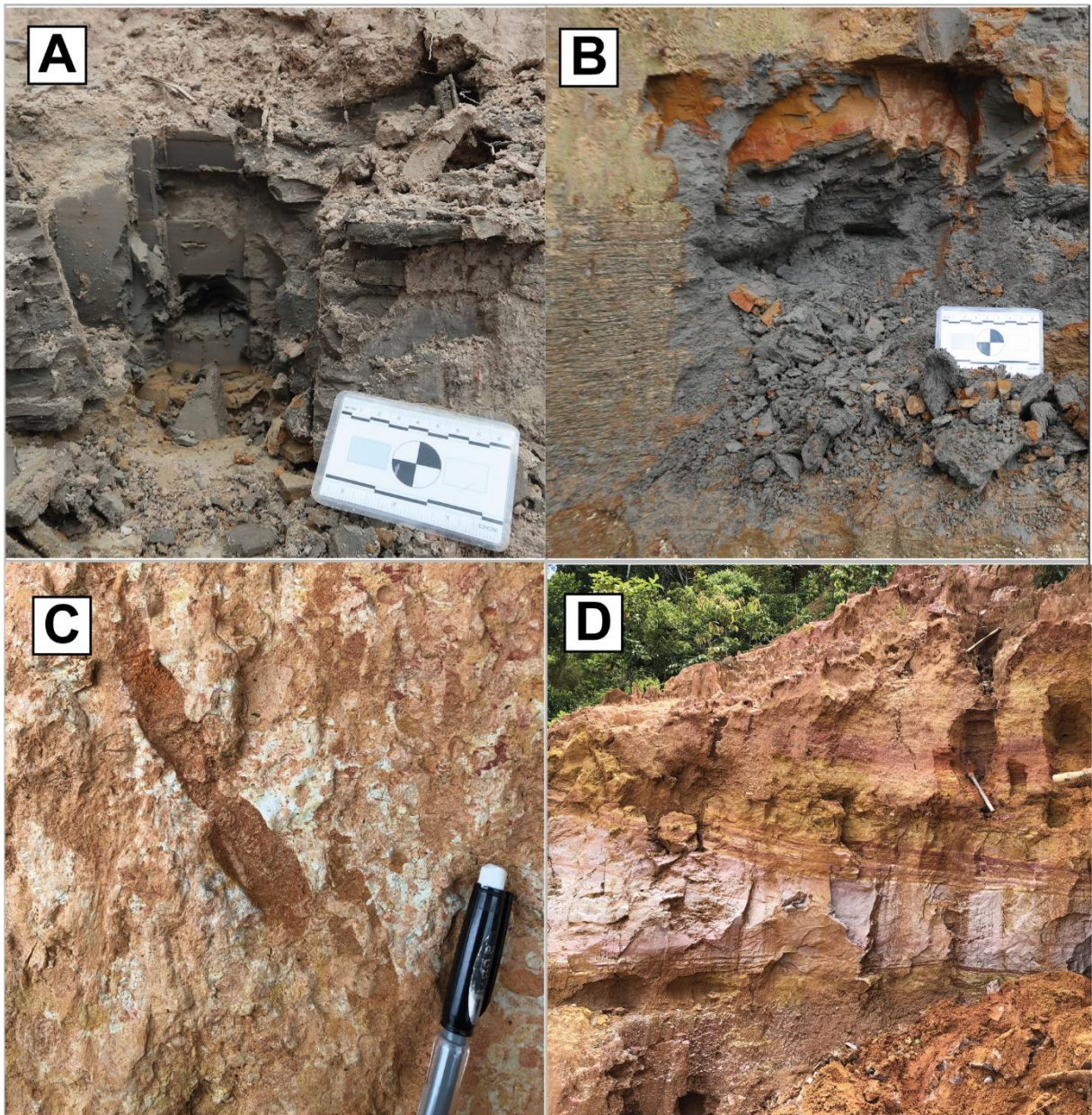


Figura 27 - Fácies L1. A - Lama sem estrutura. B - Lama laminada. C - Icnofósseis em meio a lama do ponto ALC 102. D - Camada delgada de lama sem estrutura.

5.2.2. Fácies A1 – Areias com estratificação cruzada acanalada, com ou sem intraclastos.

Composta por areia fina, média ou grossa com estratificação cruzada acanalada, tangencial na base (figura 28). É uma das fácies mais recorrentes ao longo dos afloramentos visitados. Assim como a fácies L1, mostra grande variação de espessura entre afloramentos distintos e até mesmo dentro de um mesmo ponto. Pode acontecer como um conjunto de sets decimétricos a métricos, em meio a outros

pacotes arenosos (com estratificação cruzada tabular e sem estrutura), adjacente à pacotes de lama e em alternância com sedimentos mais finos. No ponto ALC 111, uma camada de 50 centímetros de espessura mostra estratificação acanalada composta e com intraclastos segregados nos *foresets*, configurando o exemplo mais complexo desta fácies observado nos terraços do Rio Japurá. No ALC 104, existe abundância de camadas com estratificação cruzada acanalada de areia média a muito grossa com grânulos e seixos pequenos esparsos.

Estratificações cruzadas acanaladas são registros de migração de dunas subaquáticas cuja crista é sinuosa. Se formam pelo transporte de sedimentos por meio de saltação, indicando energia moderada do meio, e migram através da erosão das costas e deposição de sedimentos na frente da duna por decantação, na região protegida da ação do fluxo de água. Formas de leito sinuosas são geradas quando a velocidade de fluxo é maior, se comparadas com formas de leito tabulares (Ashley, 1990). A formação de estratificação cruzada composta implica em uma alteração da direção do fluxo e/ou da intensidade do fluxo, formando estruturas de escalas maiores e com diferentes direções de migração (Miall, 1996).

5.2.3. Fácies A2 – Areias sem estruturas ou laminadas, com ou sem intraclastos.

Constitui-se de areia muito fina com porção siltosa a até média, sem estrutura ou laminada, ilustrado pela figura 29. Das fácies arenosas é a menos expressiva, ocorrendo em pontos mais esparsos e raramente apresentando espessuras acima de 1 metro, com a maior parte se dando na forma de camadas delgadas que não superam poucos decímetros

Areias sem estrutura e de laminação horizontal podem ocorrer em alguns casos distintos. De acordo com Bridge e Demicco (2008), laminações em arenitos podem se configurar a partir da migração de formas de leito com um grande comprimento de onda, o que dificulta a identificação de formas cruzadas, sob regime de fluxo superior. Pode ter também sua origem pela obliteração das estruturas por processos de liquefação (Marconato et al. 2013)

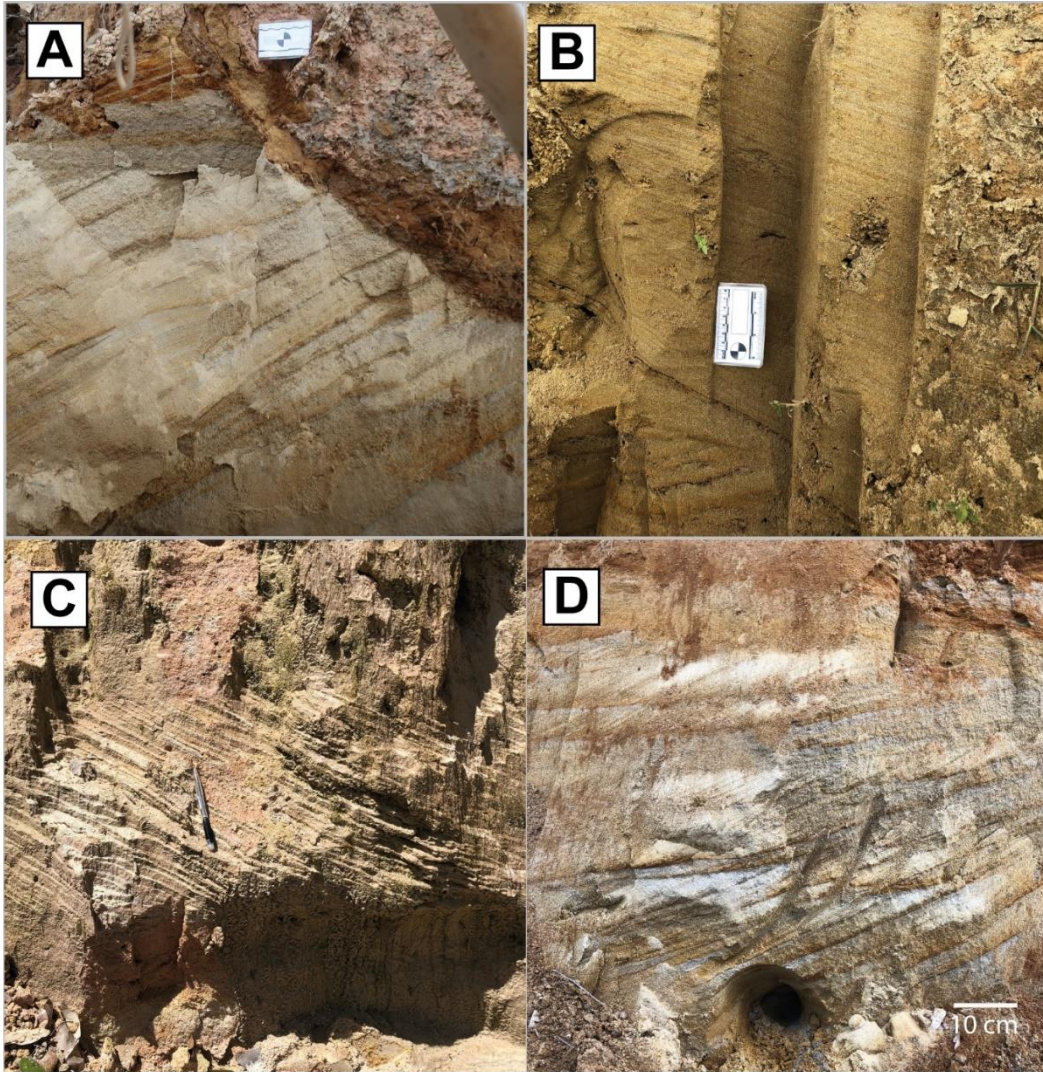


Figura 28 - Fácies A1. A - areia acanalada, ponto ALC 96. B - Areia acanalada, ponto ALC 98. C - Areia acanalada, ponto ALC 104. D - Areia acanalada abaixo de camadas com cruzada tabular.

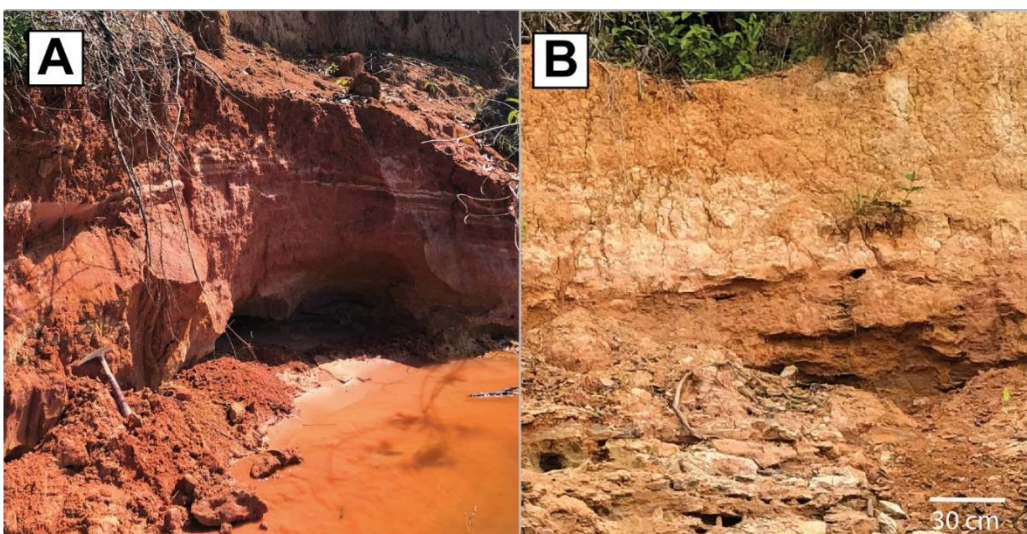


Figura 29 - Fácies A2. A - areia sem estrutura, ponto ALC 110. B - Areia sem estrutura, ponto ALC 97

5.2.4. Fácies A3 – Areias com estratificação cruzada tabular, com ou sem intraclastos.

Nesta fácies ocorrem areias desde fina a muito grossa, por vezes com intraclastos esparsos ou segregado nos *foresets*, apresentando estratificação cruzada tabular (figura 30). Juntamente com a A1, compõe uma das fácies mais abundantes dos afloramentos visitados, mas ao contrário daquela, mostra menor variação volumétrica, com pacotes entre poucos centímetros a alguns decímetros, nunca superando 1 metro de espessura. A presença de intraclastos, embora não mandatória, é relativamente comum se comparado com as fácies A1 e A2, culminando no ponto ALC 107, onde grande parte das litologias se traduz em areias com estratificação cruzada tabular, com algumas estratificações acanaladas subordinadas, e presença significativa de intraclastos tanto segregados nos *foresets* quanto esparsos (figura 30 A).

Em termos de gênese, estratificações cruzadas tabulares se assemelham às acanaladas, com a principal diferença se manifestando em um fluxo mais lento quando comparado com o formador de dunas sinuosas para uma mesma espessura de lamina de água (Ashley, 1990), produzindo cristas retas. A presença de intraclastos em meio aos sedimentos arenosos é indicativo de um sistema mais energético, com capacidade de transporte maior e suficiente para carregar e saltar grãos maiores e mais pesados. Os grãos segregados nos *foresets* por sua vez são registros de

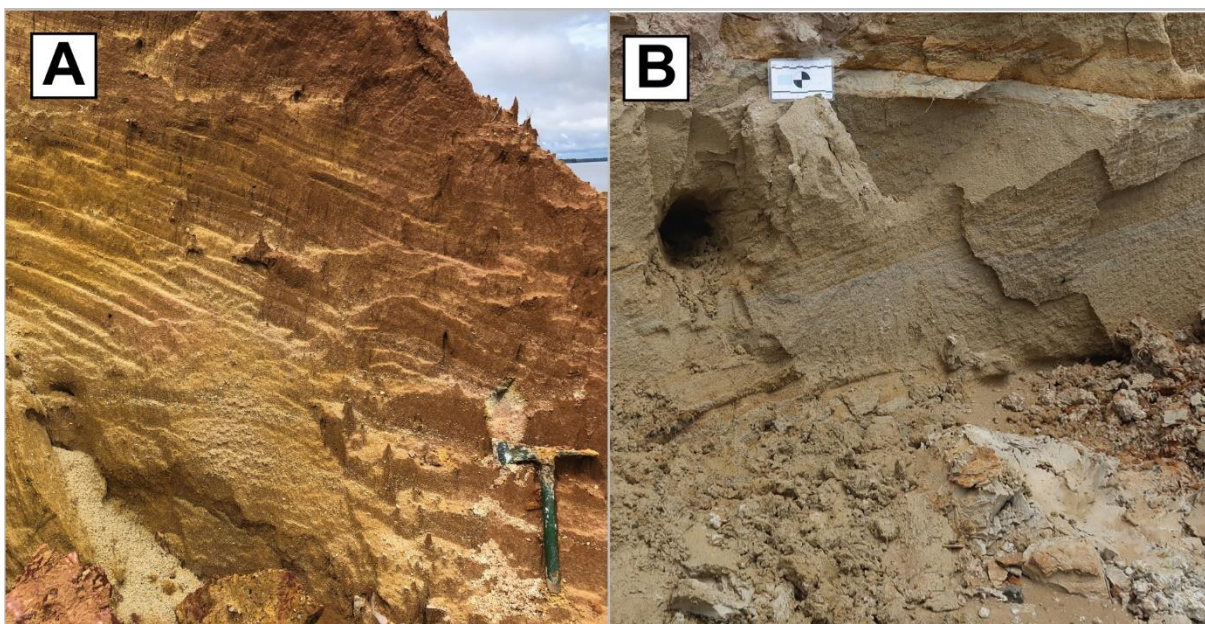


Figura 30 - Fácies A3. A - Areia com estratificação cruzada tabular, com intraclastos nos *foresets*, ponto ALC 107. B - Areia com estratificação cruzada tabular, ponto ALC 111.

escorregamento de material mais grosso levado pela migração de *ripples* pelo flanco longo das formas de leitos maiores.

5.2.5. Fácies H – Heterolíticas de areia e silte, podendo apresentar ripples.

Uma das fácies com menor ocorrência. Caracteriza-se por uma alternância sistemática entre materiais mais finos e grossos, no caso de heterolíticas (figura 31 A e D), e de formas de leitos de pequenas dimensões no caso de *ripples* (figura 31 B e C). Ocorrem principalmente nos afloramentos da região mais a leste, próximo à confluência do Rio Japurá com o Rio Solimões, verificando-se abundância destas estruturas nos pontos ALC 96 e ALC 99, onde se sucedem camadas seguidas ou intercaladas com heterolíticas e *ripples* ao longo de alguns metros de espessura.

Tanto *ripples* quanto heterolíticas são estruturas formadas sob fluxo subcrítico e por processos de decantação e trativos. Heterolíticas são formadas pela alternância entre processos de decantação e de tração. Quando se instala tração, são criadas formas de leito como *ripples*, e de granulação mais grossa. Quando cessa a tração ou passa a dominância de decantação, sedimentos mais finos passam a ser depositados, o produto formado é uma intercalação entre sedimentos finos e mais grossos, com alguma estrutura de migração nos mais grossos. Estruturas heterolíticas indicam a presença de fluxo intermitente, como em uma região periodicamente inundada (Marconato et al. 2013).

5.2.6. Fácies C – Conglomerados.

Esta fácies se manifesta apenas no ponto ALC 104. Trata-se de um conglomerado de grânulos e seixos pequenos, sem estrutura aparente, podendo variar para areia muito grossa com grânulos e seixos (figura 32). Se encontra entre camadas de areia com estratificação cruzada acanalada com grânulos e seixos pequenos.

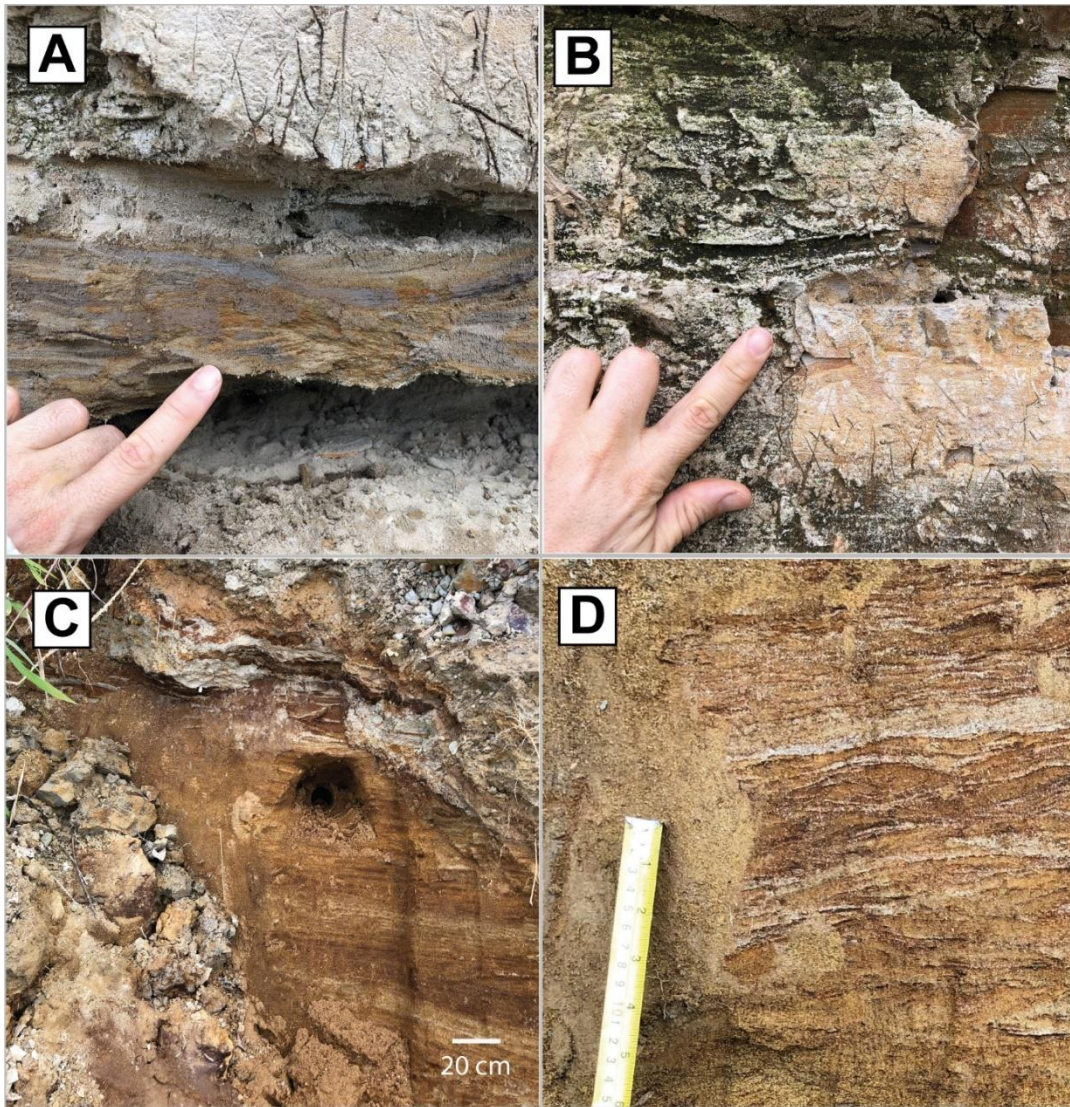


Figura 31 – Fácies H. A - Estratificação heterolítica de seria fina e silte, ponto ALC 99. B - ripples em silte, ponto ALC 99. C - ripple em areia fina, ponto ALC 96. D - Estratificação heterolítica de areia fina e lama, ponto ALC 96. Fácies C.

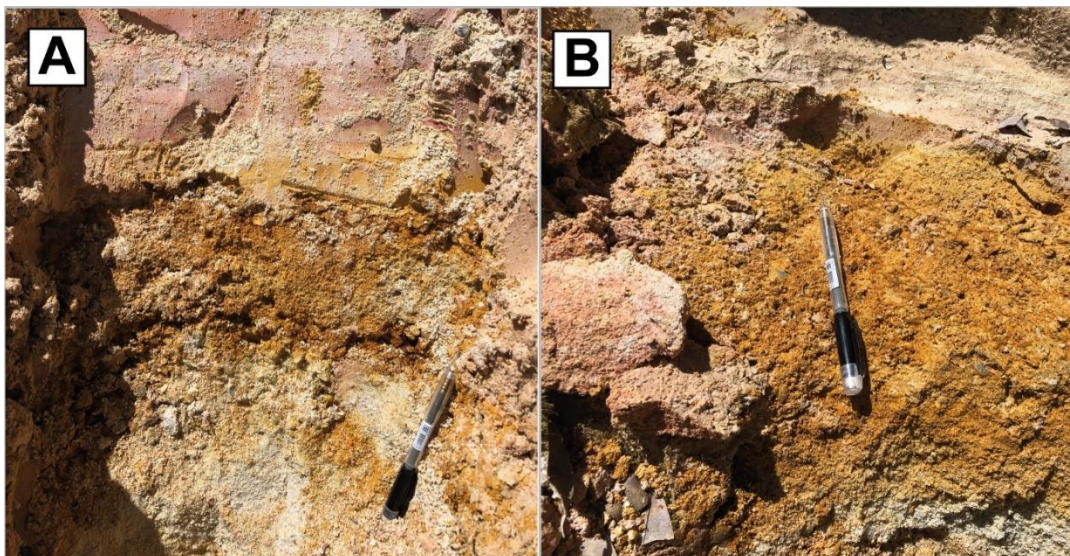


Figura 32 - Diferentes camadas conglomeráticas do ponto ALC 104.

Estes conglomerados são sedimentos mais grossos retirados das serras que

se encontram na Amazônia, principalmente na porção colombiana, entre a área de estudo e a Cordilheira dos Andes. Por serem mais grossos, são sedimentos carregados como carga de fundo, transportados por arraste e rolamento através da porção mais profunda do rio (Galeazzi et al. 2018), no talvegue do Rio Japurá, gerando os depósitos conglomeráticos e sem estrutura aparente observados em campo. O único ponto em que ocorrem trata-se do único ponto onde se foi amostrado a parte mais profundo do rio.

5.3. Associações de Fácies

A partir da identificação das fácies e da análise de elementos arquiteturais, duas associações de fácies foram estabelecidas, uma representando depósitos fluviais relacionados a canais, agrupando as fácies mais arenosas e grossas dos afloramentos, e outra representando depósitos de planície de inundação, caracterizada por material mais fino e estruturas típicas deste tipo de sistema. Procura-se utilizar estas associações para a compreensão das condições paleoambientais e padrões de sedimentação com o passar do tempo.

5.3.1. Associação de fácies de barras e canais (AFC)

São fácies com potencial de terem sido geradas pela ação direta do canal do rio, portanto sob condições nas quais o fluxo apresenta influência de forma perene. Relacionam-se nesta associação as fácies de areia com estratificação acanalada (A1), areias sem estrutura (A2), areia de estratificação cruzada tabular (A3), conglomerado (C) e lamas sem estrutura a laminadas (L1). Não há coexistência das 4 fácies selecionadas para esta associação em um mesmo afloramento, sendo mais comum a presença simultânea de duas ou de apenas uma isolada.

Os depósitos de conglomerado (C) (figura 33 A), como explicitado na descrição de fácies, foram apenas observados no ponto mais a oeste feito. Ocorrem em meio a sucessões arenosas, médias a grossas, com estratificação cruzada acanalada e grânulos e seixos esparsos (A1). É comum a variação do conglomerado para uma areia grossa a muito grossa, sem estrutura e rica em seixos. A sucessão de conglomerados e areias com cruzada se traduz em um fundo de canal seguido por construção de barra.

Os depósitos arenosos (A1 e A3), ilustrados pela figura 33 B e C, manifestam-se em quase todos os afloramentos feitos, tendo certa prevalência nos pontos localizados mais a oeste. Geralmente se encontram em meio a outras camadas arenosas, separadas por *cosets* que podem atingir alguns poucos metros de espessura e embora exista variação no tamanho dos grãos, dificilmente existe grande discrepância em um mesmo afloramento, podendo observar uma tendência geral de afinamento granulométrico para leste.

É possível estabelecer duas ramificações de sucessões arenosas nas fácies associadas de canal: Uma de espessos pacotes arenosos, atingindo alguns metros de espessura, representando a deposição e crescimento de barras subaquosas. Geralmente são empilhamentos de sedimentos estruturados, das fácies A1 e A3, podendo ocorrer A2, entretanto nos afloramentos visitados, areia sem estrutura ocorre de forma mais esparsa e em pacotes que não superam 2 metros de espessura. A outra ramificação consiste em uma alternância entre sedimentos finos da fácies L1 (figura 33 D), podendo acontecer fácies H (estratificação heterolíticas), e camadas arenosas (A1, A2 e A3), em sucessões de alguns centímetros a poucos decímetros. Essas intercalações são construções típicas de topo de barras, onde em situações de elevação do nível d'água depositam sedimentos mais grossos em formas de leito e quando em baixa, a energia diminui e permite a deposição de sedimentos finos.

Pode-se dividir a associação de fácies de canal (AFC) em duas subclassificações, as quais se atribuem as ramificações acima comentadas: Uma sub associação de construção de barras (AFB), constituída por grandes pacotes de areia de fácies variadas (A1, A2 e A3) e a outra de construção de topo barra (AFT), onde se encontram sucessões de lama e areia (L1 e H; A1, A2 e A3) em camadas que podem atingir alguns decímetros de espessura.

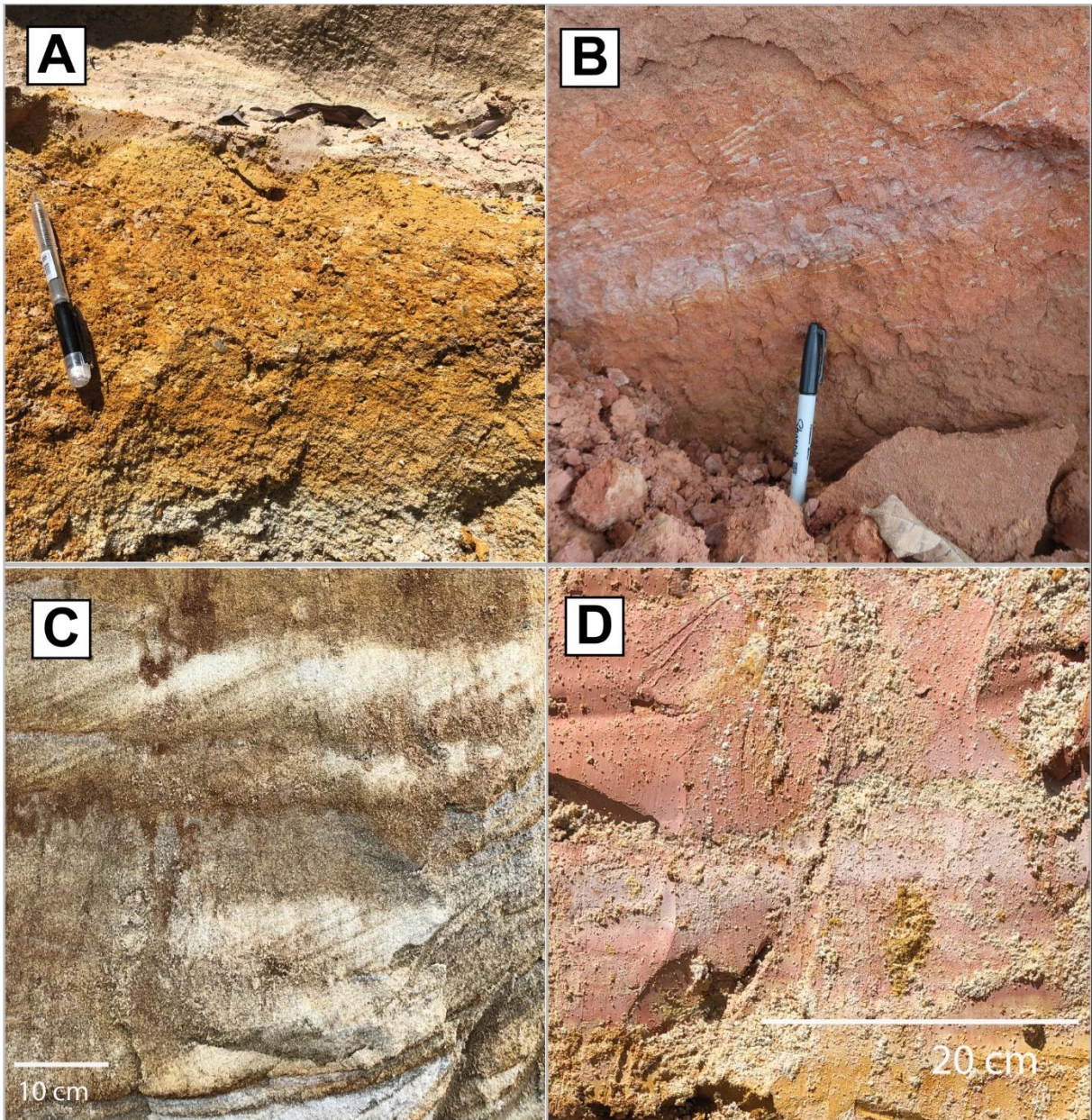


Figura 33 - Associação de fácies AFC. A - Conglomerado de granulos e seixos pequenos. B - Areia com estratificação cruzada acanalada. C - Areia com estratificação cruzada tabular. D – Lama sem estrutura, podendo ser laminada ou até mesmo heterolítica.

5.3.2. Associação de fácies externa ao canal (AFP)

As fácies selecionadas nesta associação são compostas por sedimentos finos e alguns mais grossos sem estrutura ou com laminação plano paralela, apontando para um ambiente de mais baixa energia, sem influência direta e contínua de fluxo constante. Relacionam-se nesta associação as fácies de lama (conteúdo de argila e silte) sem estrutura a laminadas (L1), fácies de silte com areia fina, podendo conter

sedimentos na fração argila de estratificação cruzada acanalada (L2) e areia e silte com heterolíticas, podendo apresentar *ripples* (H). De um modo geral, as fácies de planície de inundação ocorrem de forma quase inversamente proporcional às fácies de canal, com uma proporção volumétrica maior a Leste do que Oeste, com os pontos que melhor representam esta associação concentradas quase na confluência do Rio Japurá com o Rio Solimões.

A mais comum destas fácies é a de lamas sem estruturas e laminadas (L1), ilustradas pelas figuras 34 A e B, se apresentando tanto associada com as outras fácies desta associação como sozinha, o que configura sua ocorrência mais comum. Esta fácies indica uma queda na energia de transporte do sistema, permitindo a deposição de partículas antes em suspensão. Quando localizada imediatamente acima de depósitos arenosos típicos de canal, como estratificações cruzadas e em um pacote de grande espessura, atingindo alguns metros de espessura, aponta para um abandono de canal e construção de planície de inundação.

A fácies de silte arenoso com estratificação cruzada acanalada (L2) (figura 34 C e D), embora mais restrita que a L1, providencia informações importantes, principalmente uma vez que se encontra por diversas vezes associada a esta fácies de lama sem estrutura. Em um dos pontos, mais especificamente o ALC 99, existe uma intercalação entre L2 e L1, com uma ocorrência menor de heterolíticas, denotando ciclos de influxo de água com períodos de baixa energia onde se depositam materiais finos por decantação. Tal periodicidade é típica de uma planície de inundação, onde quando do extravasamento das águas do canal leva fluxo e sedimentos para a planície, com subsequente acomodação da lâmina de água (queda de velocidade) e deposição de sedimentos finos antes em suspensão.

Estratificações heterolíticas representam fluxo intermitente (Marconato et al. 2013), com períodos de deposição por corrente, gerando formas de leito, e períodos de deposição por decantação de sedimentos finos, formando depósitos laminados ou sem estrutura de material mais fino. Nesta associação, indica a ocorrência deste processo em regiões de planície de inundação, com deposição das formas de leito durante uma inundação e de finos durante a queda de energia da inundação.

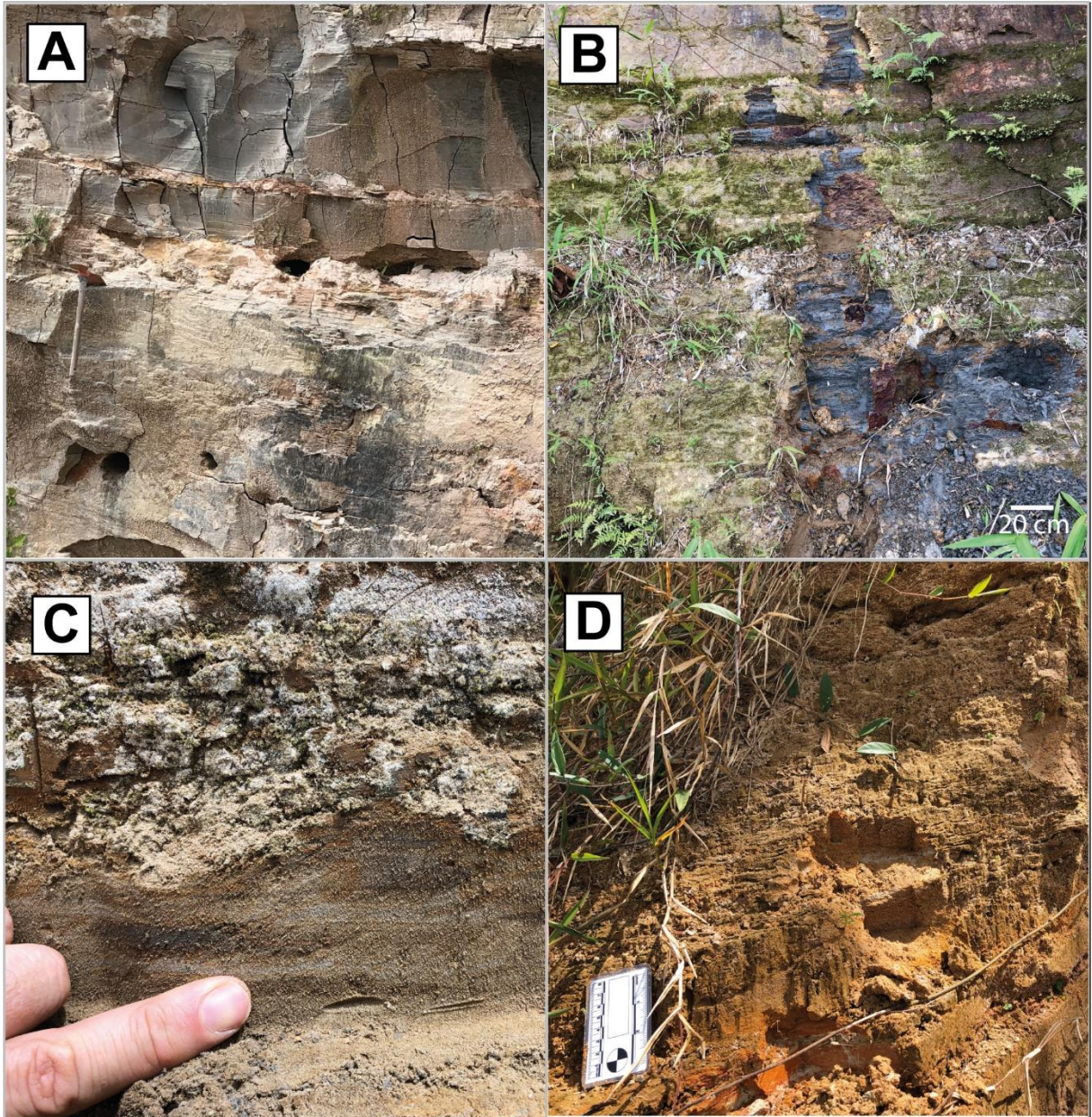


Figura 34 - Associação de Fácies AFP. A - Silte laminado. B - Lama laminada. C - Silte com estratificação cruzada acanalada. D - Areia siltosa com ripples.

5.4. Análise arquitetural

Nesta seção foram analisadas as geometrias e elementos arquitetônicos observáveis nos mosaicos, seguindo o método proposto por Miall (1996). Contudo, optou-se por utilizar a tabela 2 de litofácies, montada neste trabalho, ao invés daquela fornecida por Miall (1996) para a individualização dos elementos arquiteturais. Cada uma das litofácies foi gerada por um processo deposicional diferente, com as associações de fácies representando diversos processos atuantes no sistema

deposicional. Busca-se com as associações de fácies auxiliar na reconstrução do histórico deposicional registrado nos terraços fluviais seccionados pelo Rio Japurá.

Ao longo dos afloramentos visitados, foram observadas tanto as associações de fácies de barras e canal (AFC), definidas neste trabalho como associação de barra (AFB) e associação de topo de barra (AFT), quanto a associação de fácies externa ao canal (AFP), em alguns casos ocorrendo uma sobre a outra, ocorrendo até mesmo as três em sequência.

Em termos dos elementos arquiteturais propostos por Miall (1996), é possível afirmar a presença de 4 distintos nos terraços visitados, sendo 2 encontrados na associação AFC, ambas variações do SB (*sand bedforms*) e 2 encontrados na AFP, discutidos a seguir, FF (*floodplain fines*) e CS (*crevasse splay*). A escolha do elemento SB foi deliberada e feita por falta de um elemento que melhor representasse as feições observadas. Em Miall (1996) o uso do elemento SB pode ser feito quando não se documentam superfícies acrecionárias. Nos terraços visitados foi optado por não se aplicar as superfícies limitantes propostas em Allen (1966) e Miall (1996), uma vez que a escala das formas é extremamente grande, o que dificulta e muitas impossibilita o reconhecimento e a hierarquização de superfícies limitantes. A identificação dos elementos seguiu uma abordagem similar a de Bridge (1993), onde pelo conjunto das fácies e geometrias se identificam os corpos sedimentares.

Na subassociação de barra (AFB) são atribuídos espessos depósitos arenosos, constituídos por areia de granulação fina a grossa, com estratificação cruzada tanto acanalada quanto tabular (fácies A1 e A3). Levando em conta Miall (1996), tais depósitos podem ser identificados pelo elemento de formas de leito arenosa (SB), mais especificamente, o que Miall (1996) chama de campos de dunas de fundo de canal. Tais elementos ocorrem no fundo de canais ativos, com predominância de carga de fundo de areia, com diferentes *sets* indicando pequenas variações no fluxo. Caso fossem identificadas superfícies acrecionárias, elementos de acreção jusante (DA) ou acreção lateral (LA) poderiam ser atribuídos a estes depósitos. No Rio Japurá, em um dos pontos encontram-se conglomerados nesta associação de fácies, típicos de depósitos de talvegue do rio (Galeazzi et al. 2018), onde a corrente mostra maior competência para transporte de sedimentos mais grossos. De modo geral, depósitos de AFB (elemento de campos de dunas de fundo de canal de Miall (1996)) ocorrem,

não exclusivamente, na região mais a oeste, representados por partes das seções dos pontos ALC 98, ALC 107, ALC 112, ALC 113, ALC 100 e ALC 104 (figuras 35 a 40).

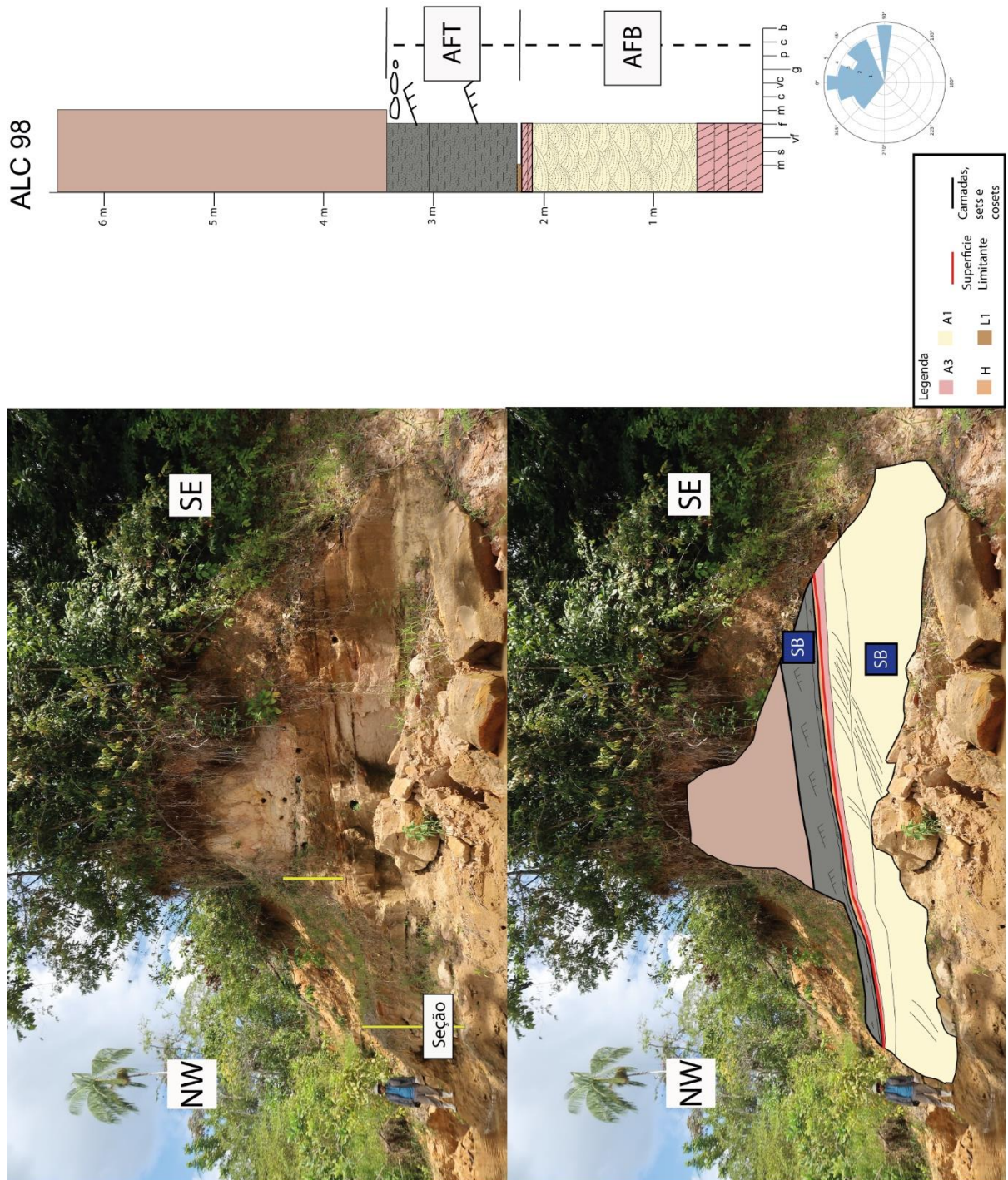


Figura 35 - ALC 98, com elementos e associações de fácies traçados. Os elementos SB são campo de dunas (embaixo) e topo de barra (em cima).

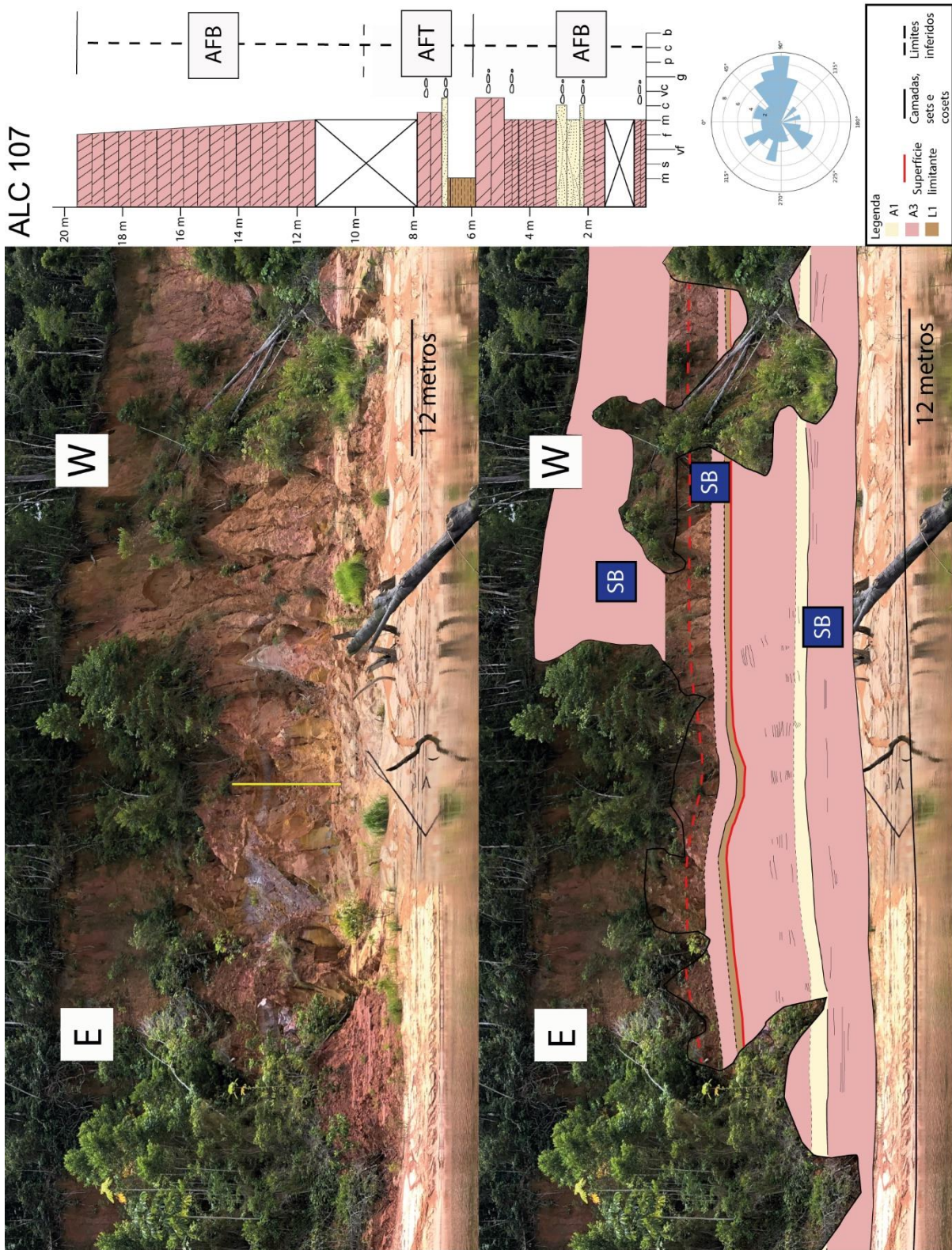


Figura 36 - Ponto ALC 107 com elementos arquiteturais e associações traçados. Tem aqui um topo de barra (SB) entre dois elementos de campos de dunas (SB embaixo e SB em cima).

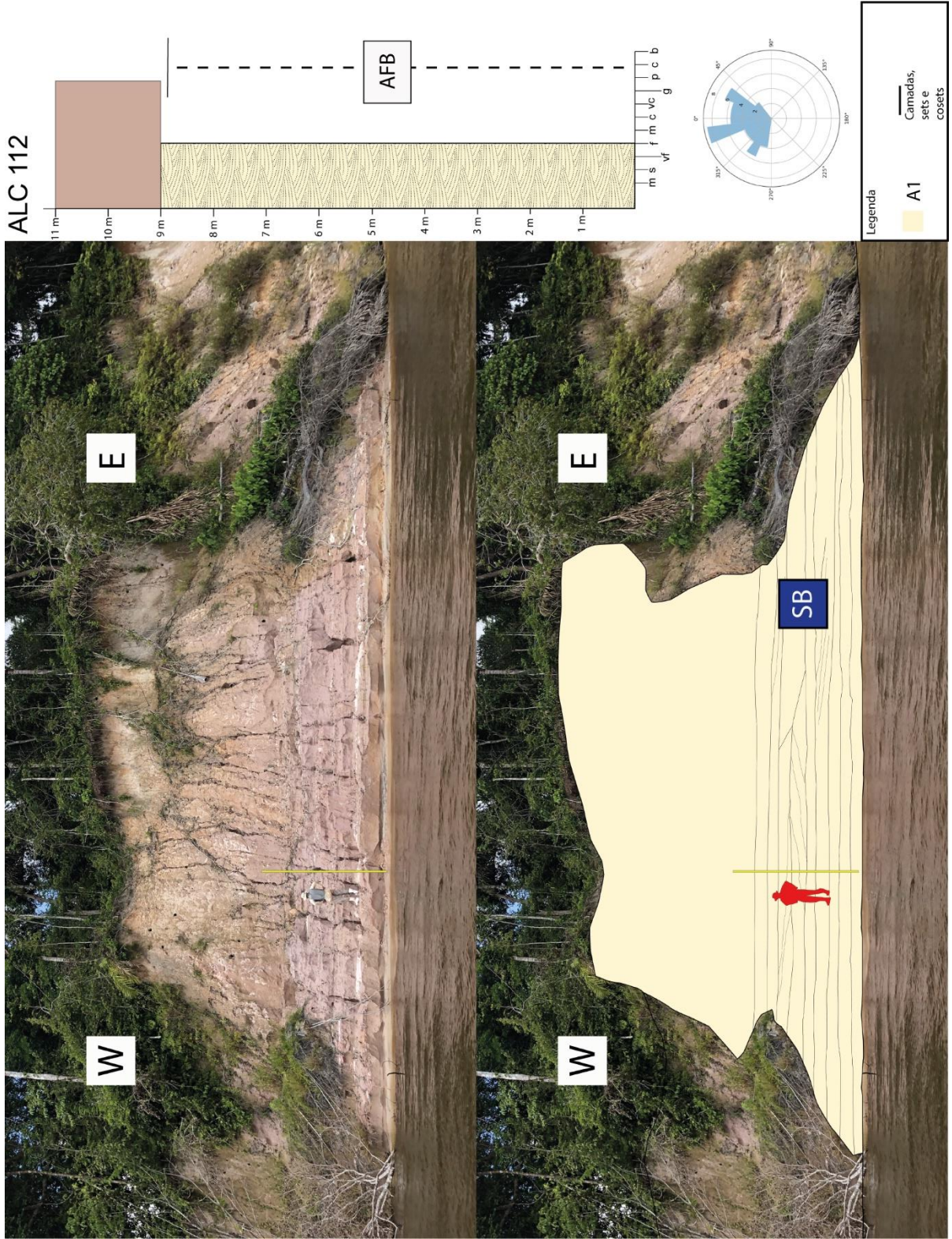


Figura 37 - Ponto ALC 112 com elemento e associação identificados. Trata-se de um grande afloramento de campo de dunas (SB).

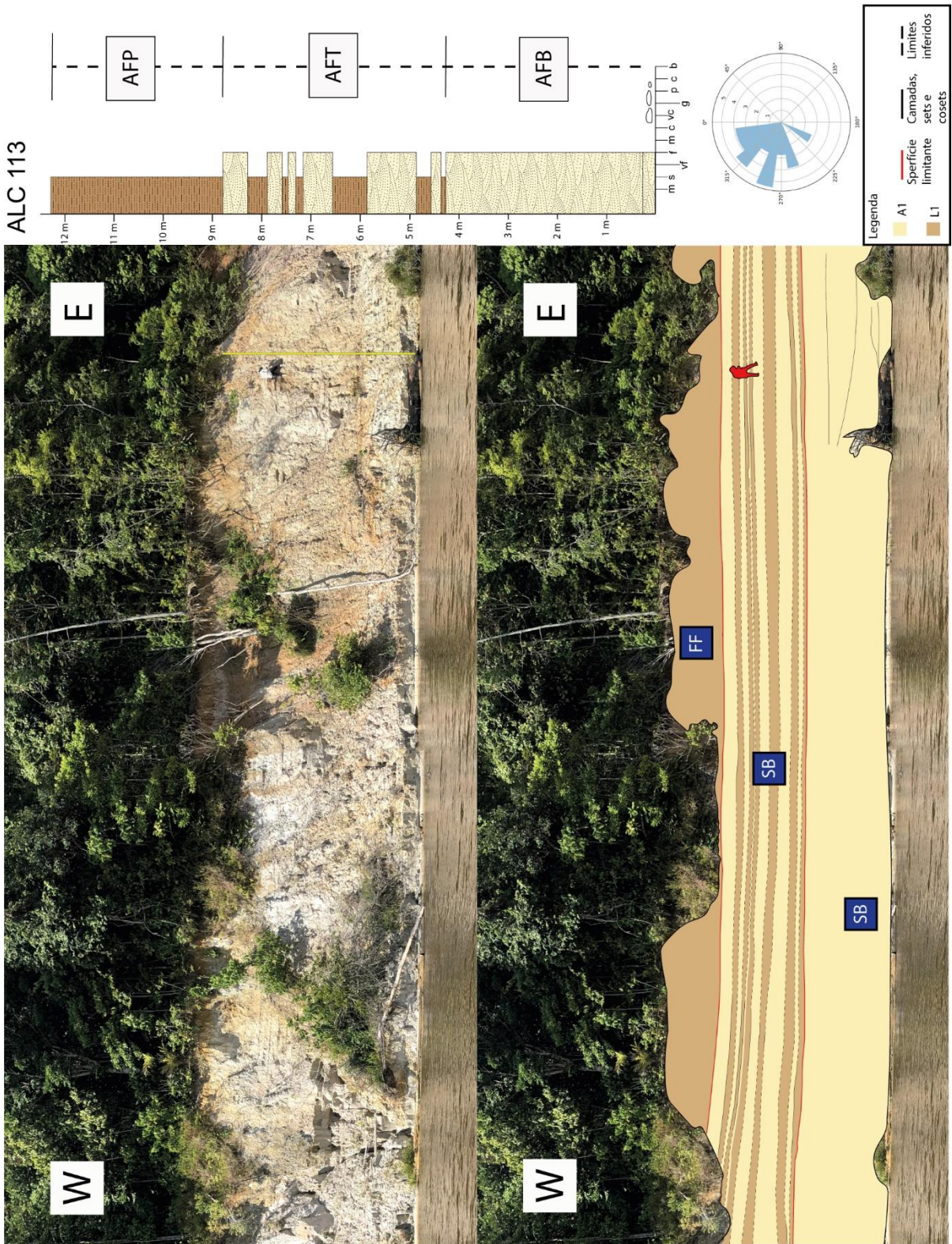


Figura 38 - Ponto ALC 113 com elementos e associações identificados. Neste afloramento ocorrem as três associações de fácies (AFB, AFT, ambas pertencentes à associação de fácies de barras e canais (AFC) e AFP). Os elementos são campo de dunas (SB inferior), topo. de barra (SB superior) e sedimentos finos de superfície (FF).

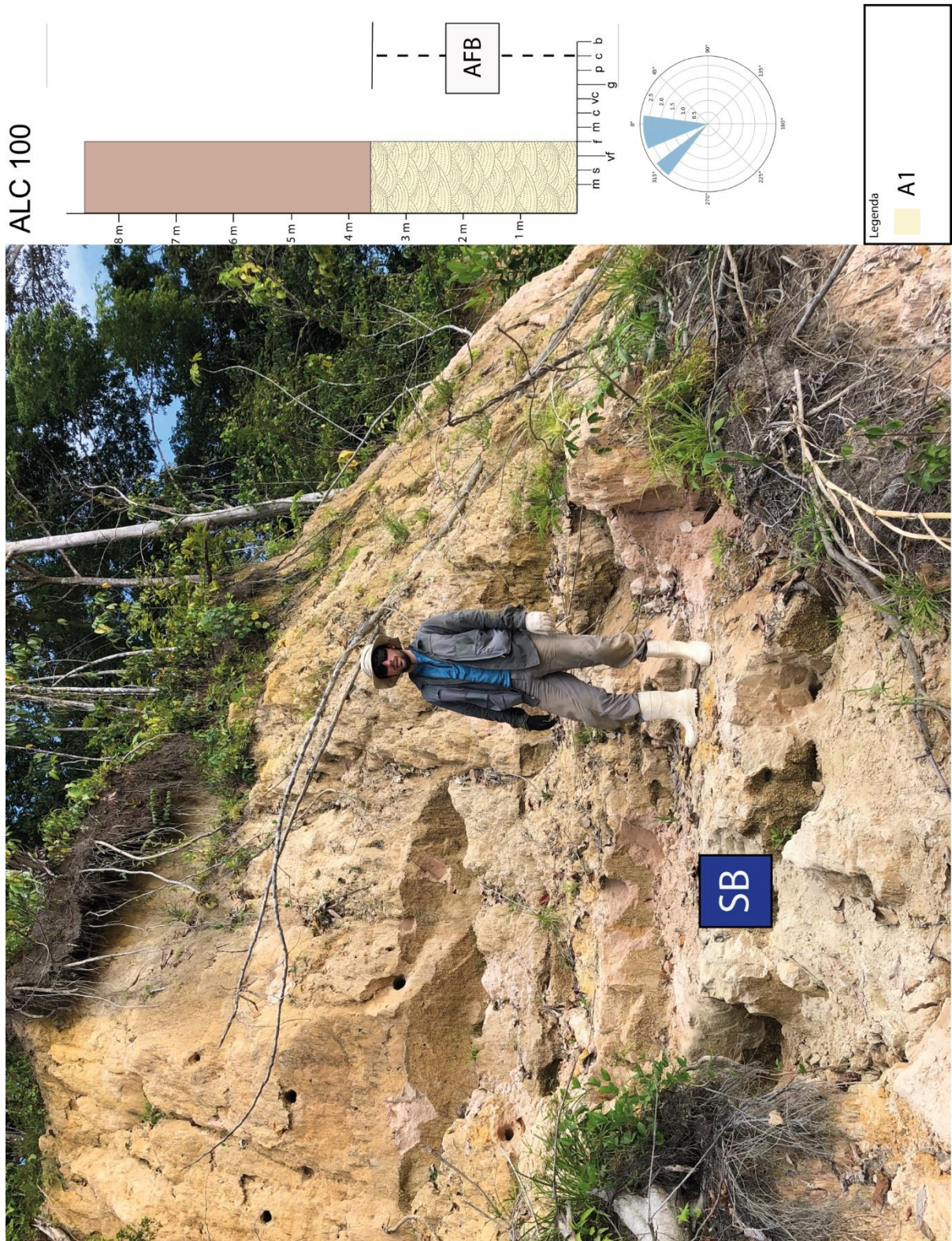


Figura 39 - Ponto ALC 100. Exposição não permitiu identificação de estruturas pela foto, entretanto trata-se de um campo de dunas (SB).

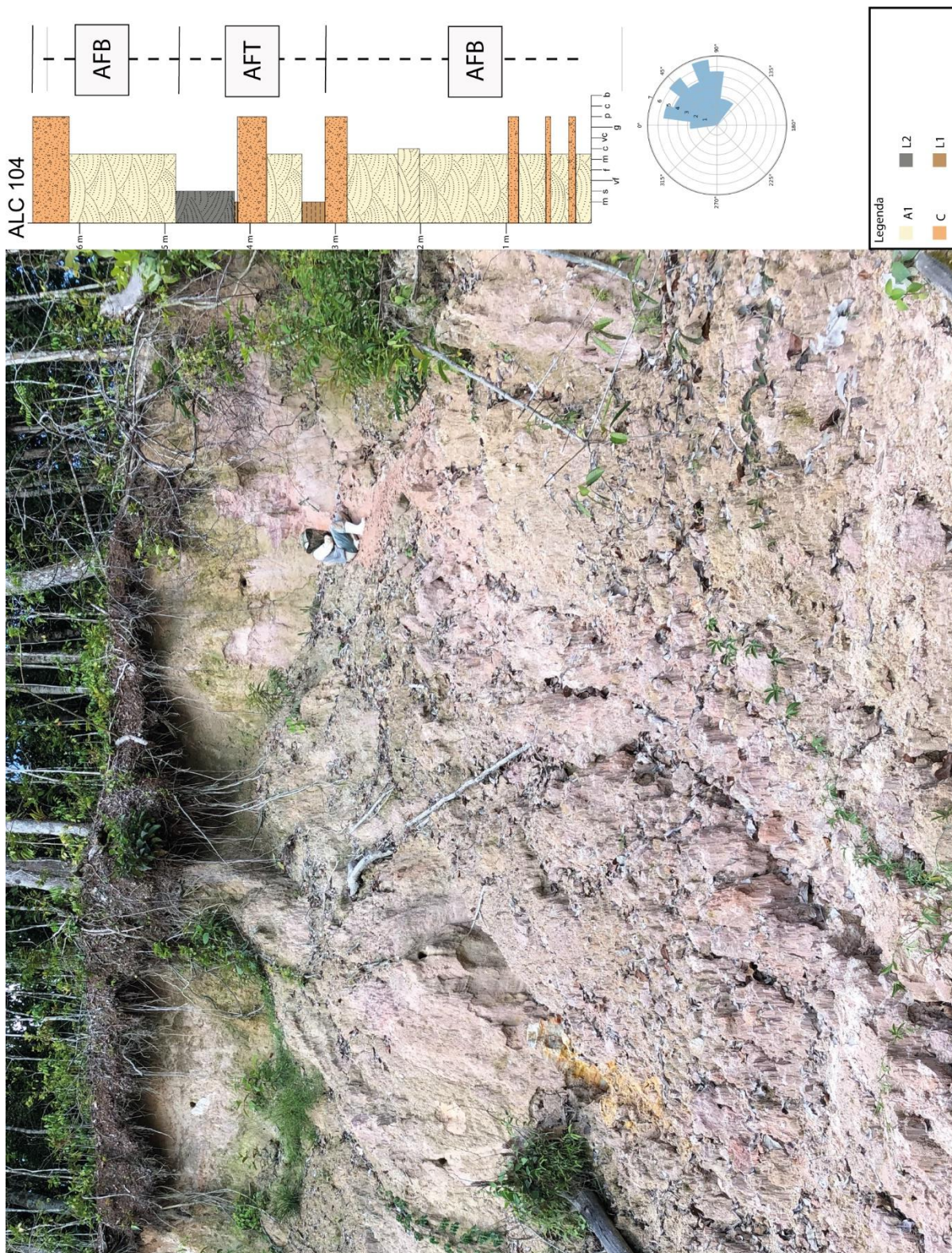


Figura 40 - Ponto ALC 104. A exposição do afloramento não permitiu a montagem de mosaico para análise arquitetural. Contudo, pelas litologias identificadas, pode-se observar uma associação de topo de barra entre duas associações de barra.

A outra subassociação de fácies que compõe a AFC é a de topo de barra, constituída por alternância entre fácies arenosas diversas (A1, A2 e A3) e fácies lamosas (L1), com uma menor ocorrência de heterolíticas (H). Miall (1996) apresenta outra variação do elemento de formas de leito arenosa (SB), o qual chama de assembleia de topo de barra, que consiste de formas de leito de pequena escala, formadas geralmente em areia, em pequenos ciclos de granodecrescência ascendente, culminando em lama. Janikian et al. (2019), em um dos afloramentos estudados aponta para uma sucessão típica de topo de barra, quando encontra uma sequência de areia intercalada com sedimentos siltsosos. Esta sucessão é consequência da deposição de sedimentos mais grossos, em períodos de cheia, com deposição de finos durante a queda do nível de água, em regiões relativamente rasas do canal (e.g. topo e flancos próximos a superfície da água de uma barra subaquosa). A ocorrência desta subassociação se encontra comumente em conjunto com AFB, como nos pontos ALC 98, ALC 104, ALC 107 e ALC 113 (figuras 35, 40, 36 e 38), mas pode se manifestar em afloramentos onde não se observam barras (campos de dunas de fundo de canal de Miall (1996)), como nos pontos ALC 96, ALC 97, ALC 102, ALC 110 e ALC 111 (figuras 41 a 45).

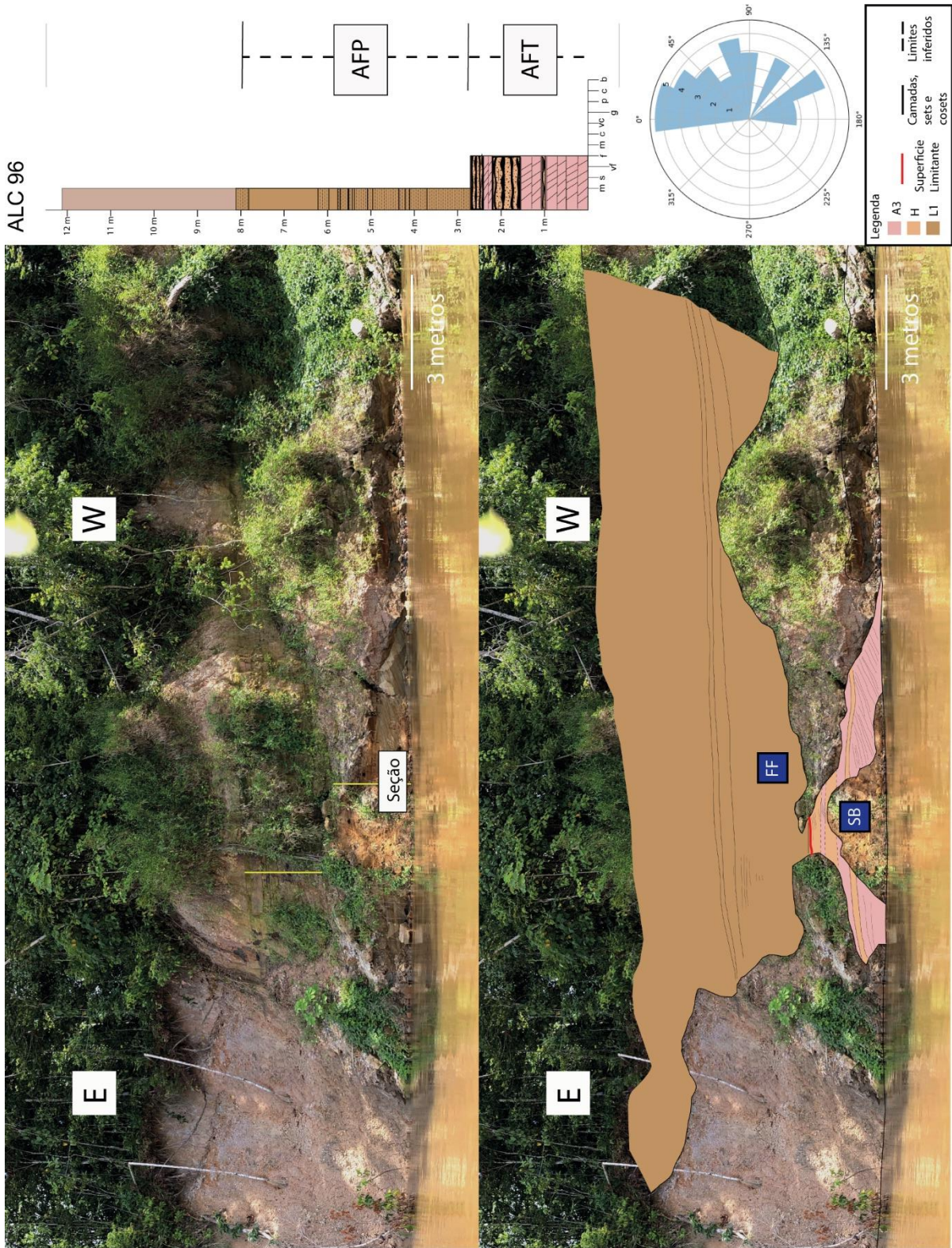


Figura 41 - Ponto ALC 96 com elementos arquiteturais e associações de fácies identificados. Ocorre aqui um topo de barra (SB) abaixo de sedimentos finos de planície de inundação (FF).

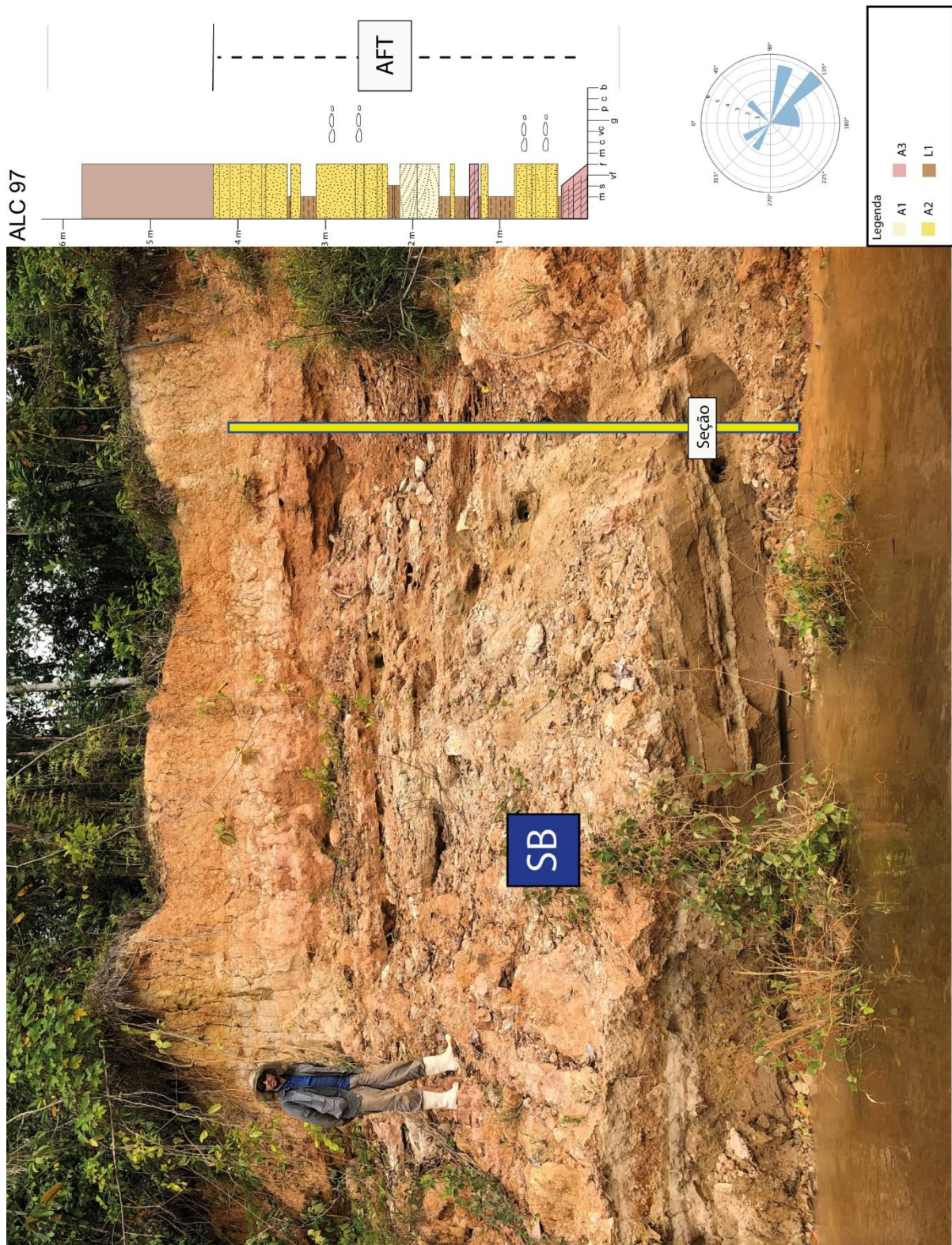


Figura 42 - Ponto ALC 97. A associação toda se enquadra em uma assembleia de topo de barra (SB).

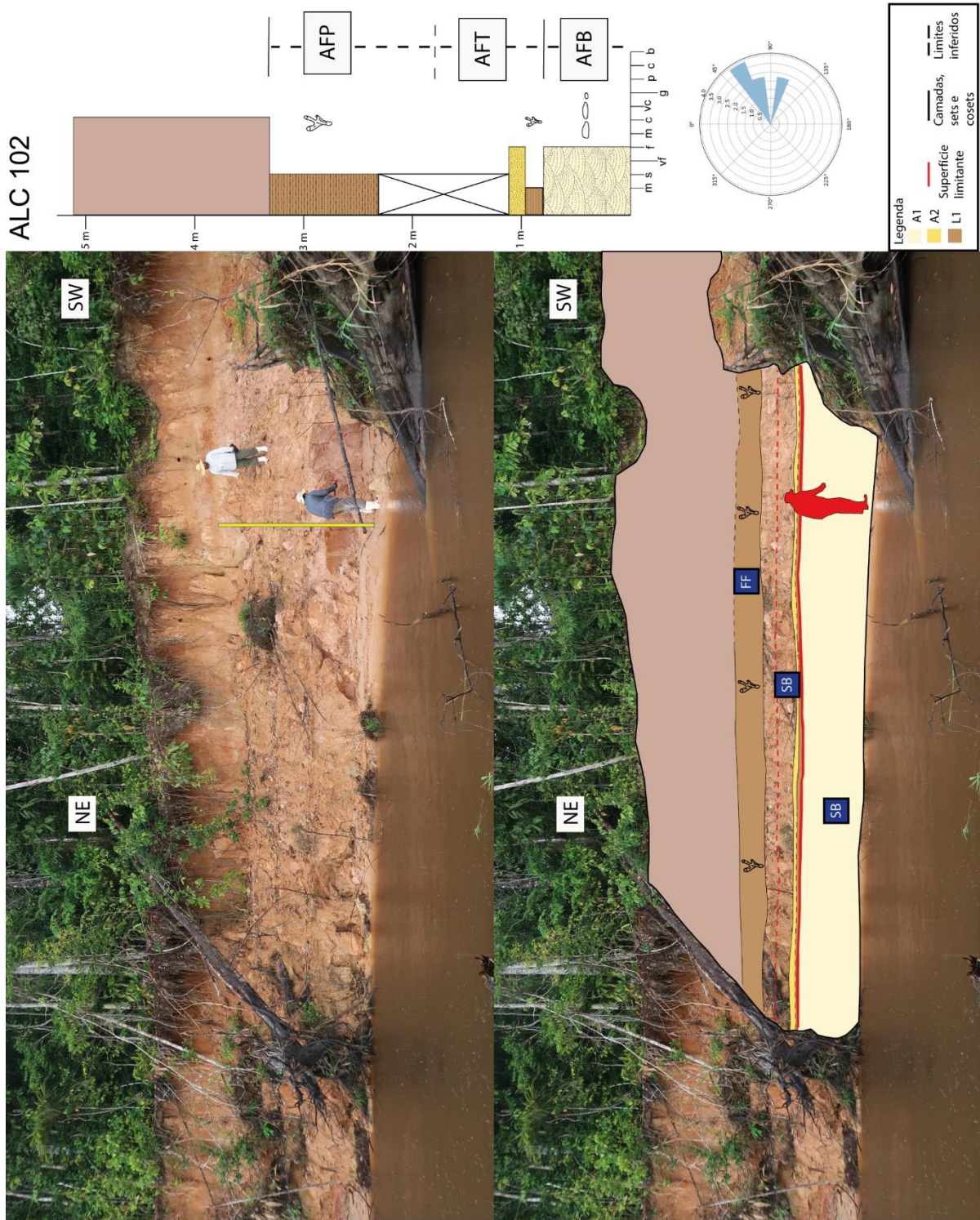


Figura 43 - Ponto ALC 102 com elementos arquiteturais e associações de fácies identificadas. Campo de dunas na base (SB), seguido de topo de barra (SB) e sedimentos finos de planície de inundação (FF). Icnofósseis *Taenidium Barretti* foram encontrados tanto no topo de barra quanto na planície de inundação interpretados.

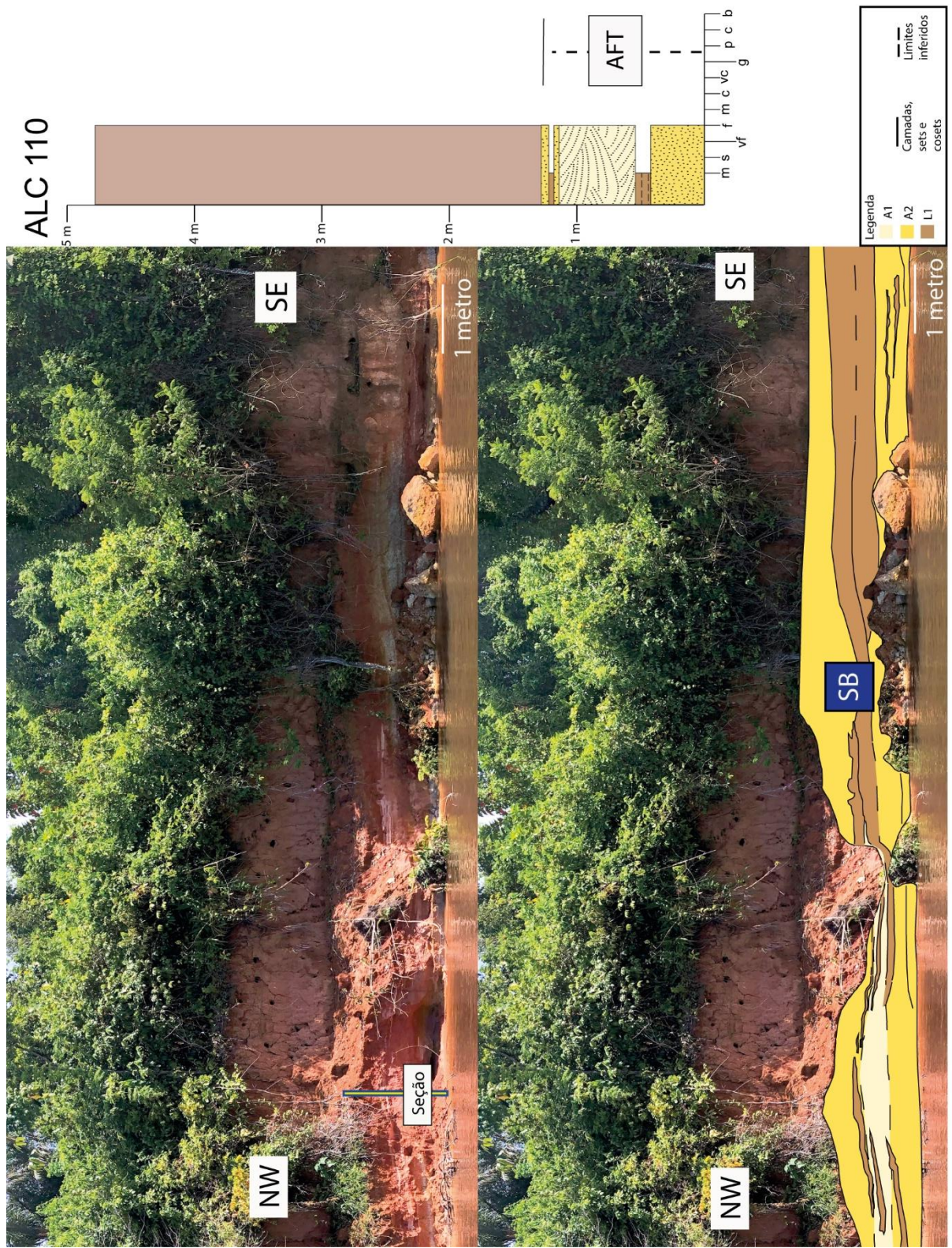


Figura 44 - Ponto ALC 110 com elementos arquiteturas e associações de fácies identificados. O elemento SB neste afloramento consiste em um topo de barra.

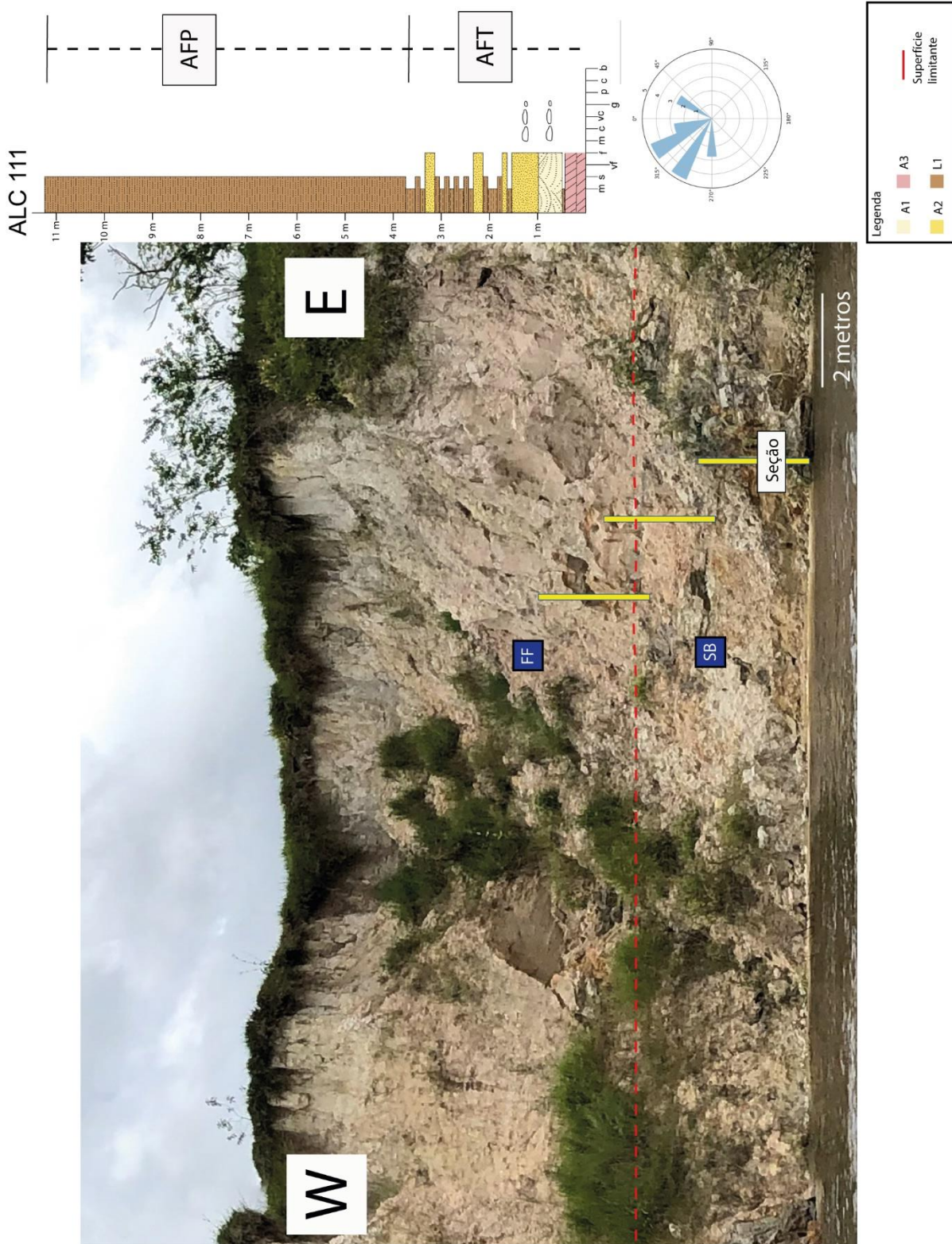


Figura 45 - Ponto ALC 111. Novamente não foi possível identificar estruturas e geometrias pelo mosaico. O elemento SB é referente a topo de barra e o FF a sedimentos finos de planície de inundação.

A associação de fácies externa ao canal (AFP) é constituída por fácies de sedimentos finos (L1, L2 e H), e assim como a AFB, em pacotes espessos de lama. Os elementos de Miall (1996) identificados nesta associação são 2: Leques de cravasse (CS) e sedimentos finos de planície de inundação (FF). Depósitos de leques de crevasse, segundo Miall (1996), consistem em sedimentos mais finos, podendo atingir até areia média, com grande quantidade de estruturas hidrodinâmicas e afinamento granulométrico em sua porção mais distal, se assemelhando muito a deltas lacustres. Exemplos deste elemento no Rio Japurá podem ser encontrados nos pontos ALC 99 e ALC 101 (figuras 46 e 47).

O elemento de sedimentos finos de planície de inundação é mais comum nos afloramentos se comparados com leques de crevasse e representam sedimentos depositados sob condições de baixa energia, em regiões mais distais ao canal, em meio a planície de inundação, em lagos ou canais abandonados. O influxo de sedimentos decorre das inundações periódicas do canal principal, levando água e energia para estas regiões. A presença de fósseis é comum nestes ambientes, tanto de vertebrados, invertebrados e vegetais, indicando exposição subaérea. No ponto ALC 102 (figura 43), em uma porção de fácies L1, uma abundância de icnofósseis do tipo *Taenidium Barretti* é observada, indicando uma zona transicional entre ambiente subaquoso e subaéreo, típico de ambientes fluvio-lacustres (Moreira et al. 2018). Nos afloramentos visitados no Rio Japurá, esta associação de fácies com frequência se encontra acima de AFT, como é o caso dos pontos ALC 96, ALC 102, ALC 111 e ALC 113 (figuras 41, 43, 45 e 38).

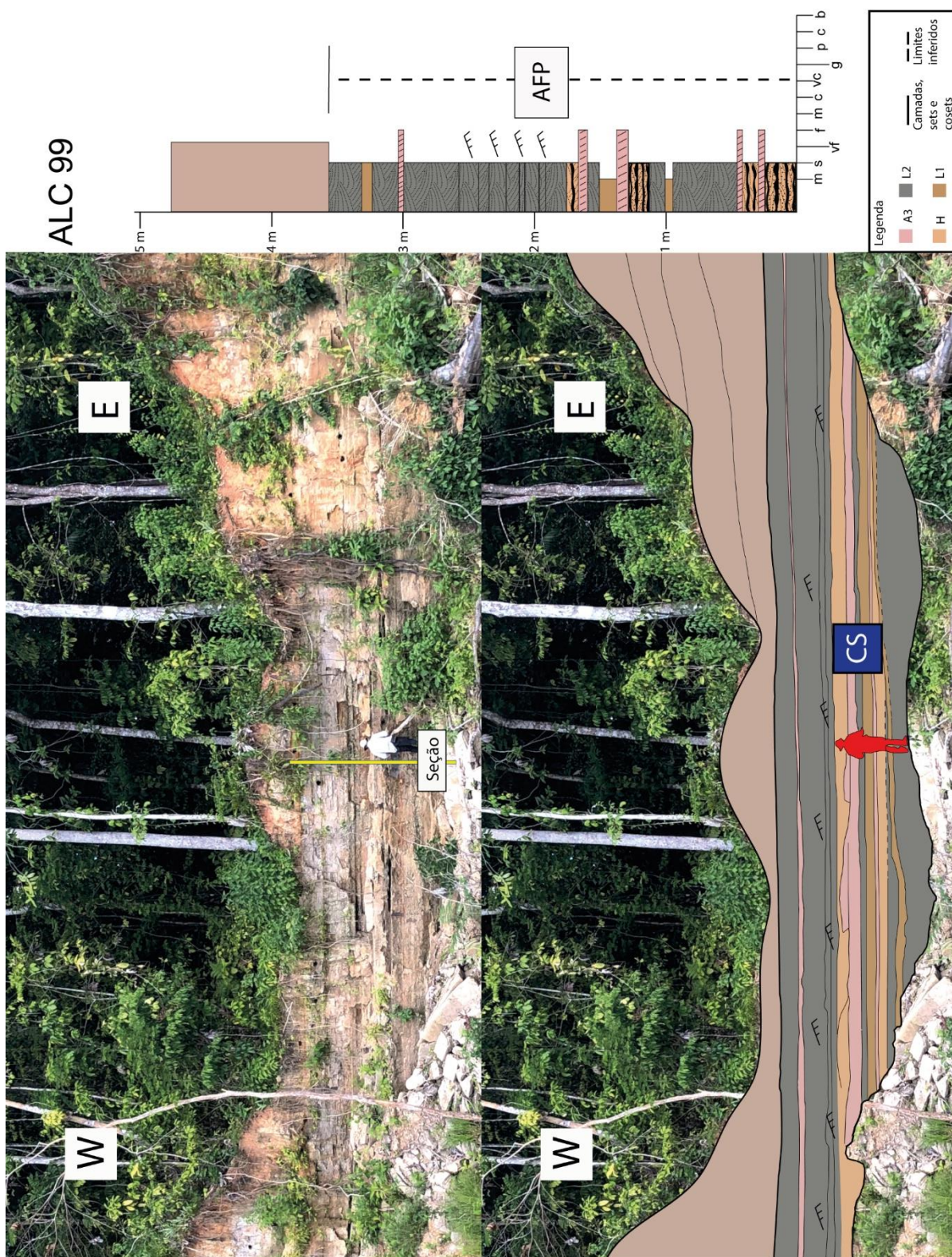


Figura 46 - Ponto ALC 99 com elementos arquiteturais e associações de fácies identificados. Trata-se de um elemento do tipo leque de crevasse, encontrado em planície de inundação. As camadas apresentam leve caimento para leste.

ALC 101

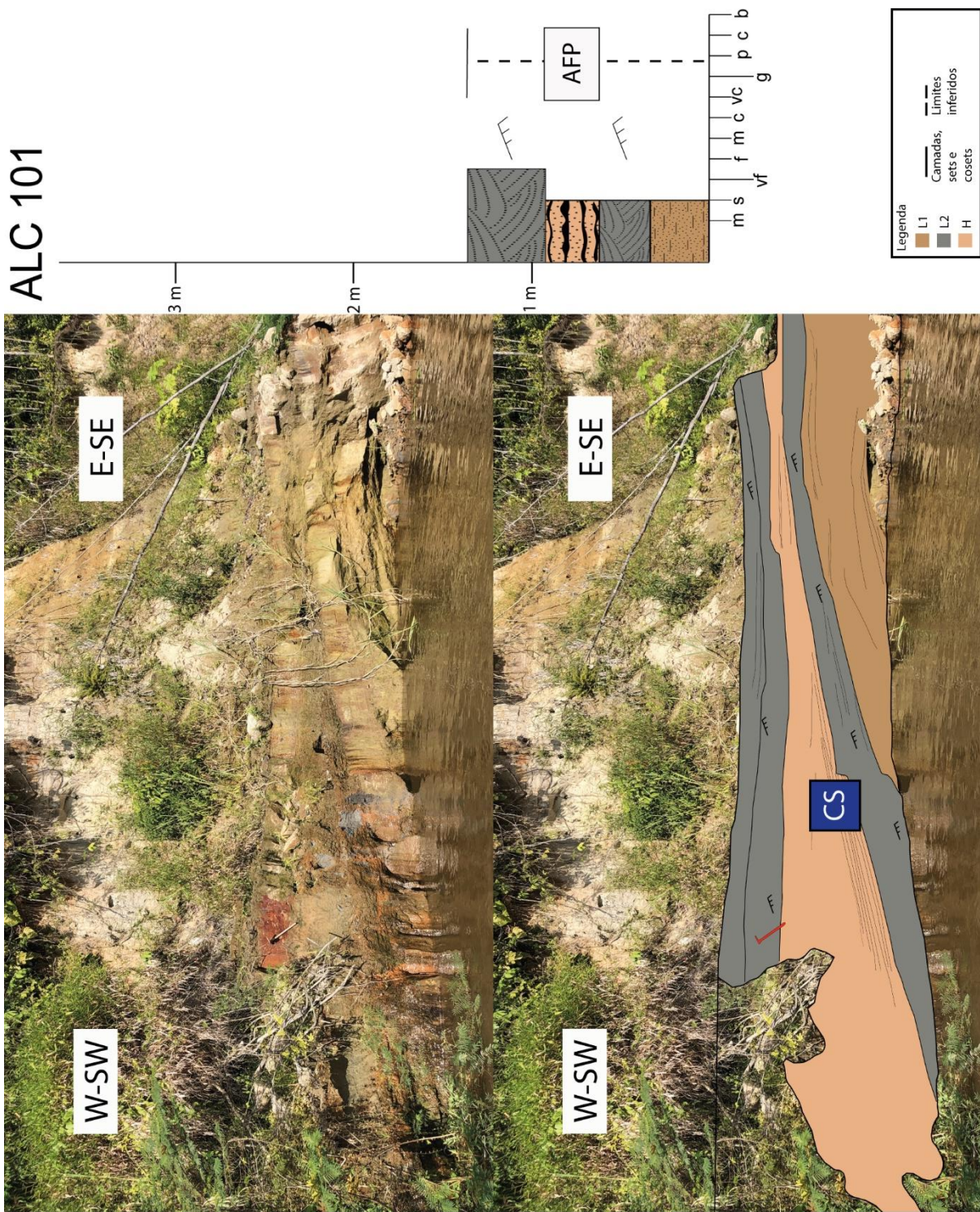


Figura 47 - Ponto ALC 101 com elemento arquitetural e associação de fácies identificados. Trata-se de um elemento do tipo leque de crevasse, encontrado em planície de inundação.

5.5. Paleocorrentes

As medidas de paleocorrentes tomadas em 13 dos 20 pontos visitados no Rio Japurá, foram plotadas em diagramas de roseta e colocadas no mapa de pontos (figura 48), para uma melhor apresentação gráfica, facilitando assim interpretações e conclusões. Grande parte das paleocorrentes foram tiradas de estruturas direcionais presentes em areias com estratificação cruzada, tanto acanalada quanto tabular, com uma menor participação de medidas em estruturas direcionais em frações de sedimento mais finos.

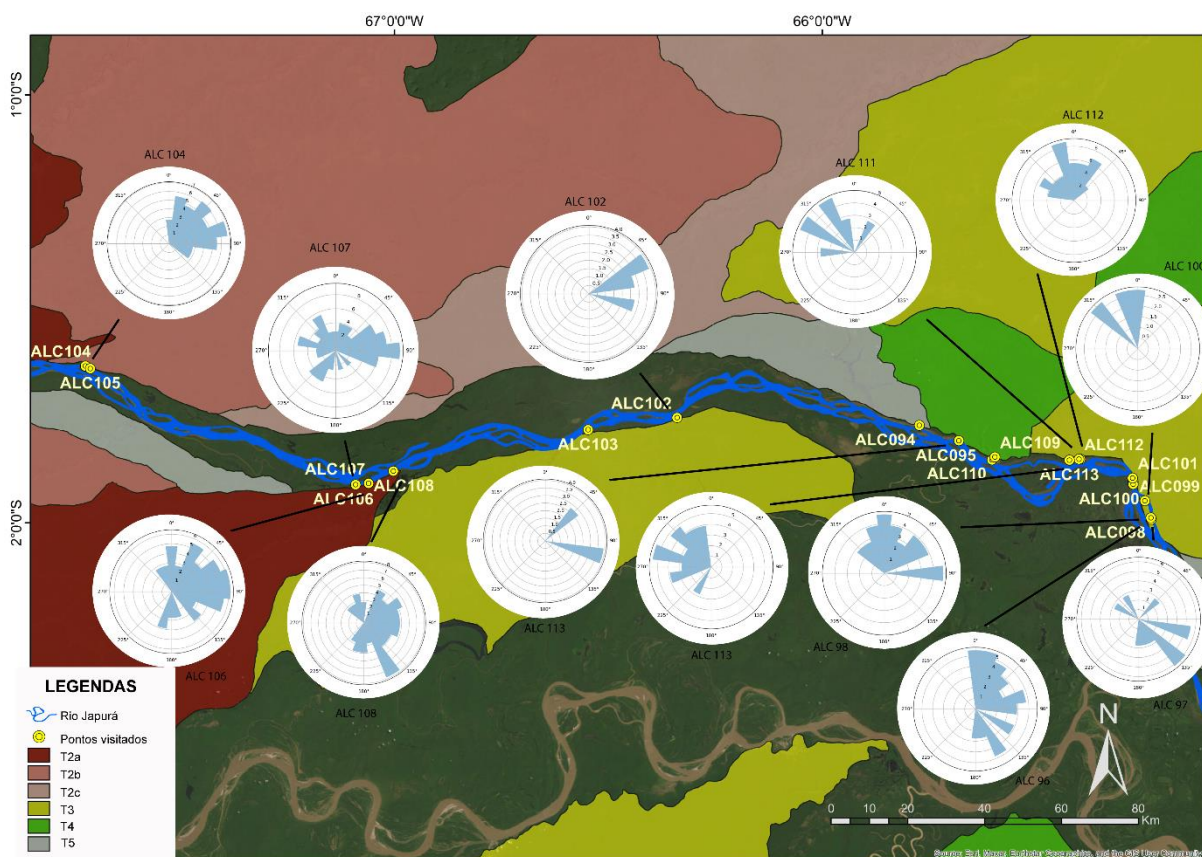


Figura 48 - Mapa de pontos com diagramas de roseta referente às medidas de paleocorrente.

Os mesmos dados foram então tratados pelo método Bootstrapping, gerando novos diagramas de roseta, mas estes com apenas o vetor médio e o erro do vetor médio, com intervalo de confiança de 95%. Os valores dos de medidas, vetor médio e erro e variância circular são apresentados na tabela 3. Todos estes dados foram gerados a partir do tratamento Bootstrapping. Assim como as rosetas de

paleocorrente, as de vetor médio também foram alinhadas com os pontos onde foram tomadas, conforme mostra a figura 49.

Tabela 3 – Tabela apresentando o número de amostras, vetor médio, erro médio e variância circular das medidas de paleocorrente.

Ponto	Número de amostras	Vetor Médio (°)	Erro do vetor médio (°)	Variância circular	Intervalo de confiança
ALC 95	3	92	+21 -36	0,094	95%
ALC 96	26	66	+32 -26	0,415	95%
ALC 97	15	133	+20 -26	0,375	95%
ALC 98	17	30	+22 -21	0,246	95%
ALC 100	3	351	+15 -21	0,035	95%
ALC 102	4	83	+21 -15	0,053	95%
ALC 104	28	66	+12 -12	0,134	95%
ALC 106	37	80	+18 -17	0,369	95%
ALC 107	57	70	+26 -35	0,676	95%
ALC 108	41	110	+24 -25	0,498	95%
ALC 111	9	326	+22 -19	0,141	95%
ALC 112	35	357	+11 -12	0,153	95%
ALC 113	16	303	+17 -18	0,177	95%

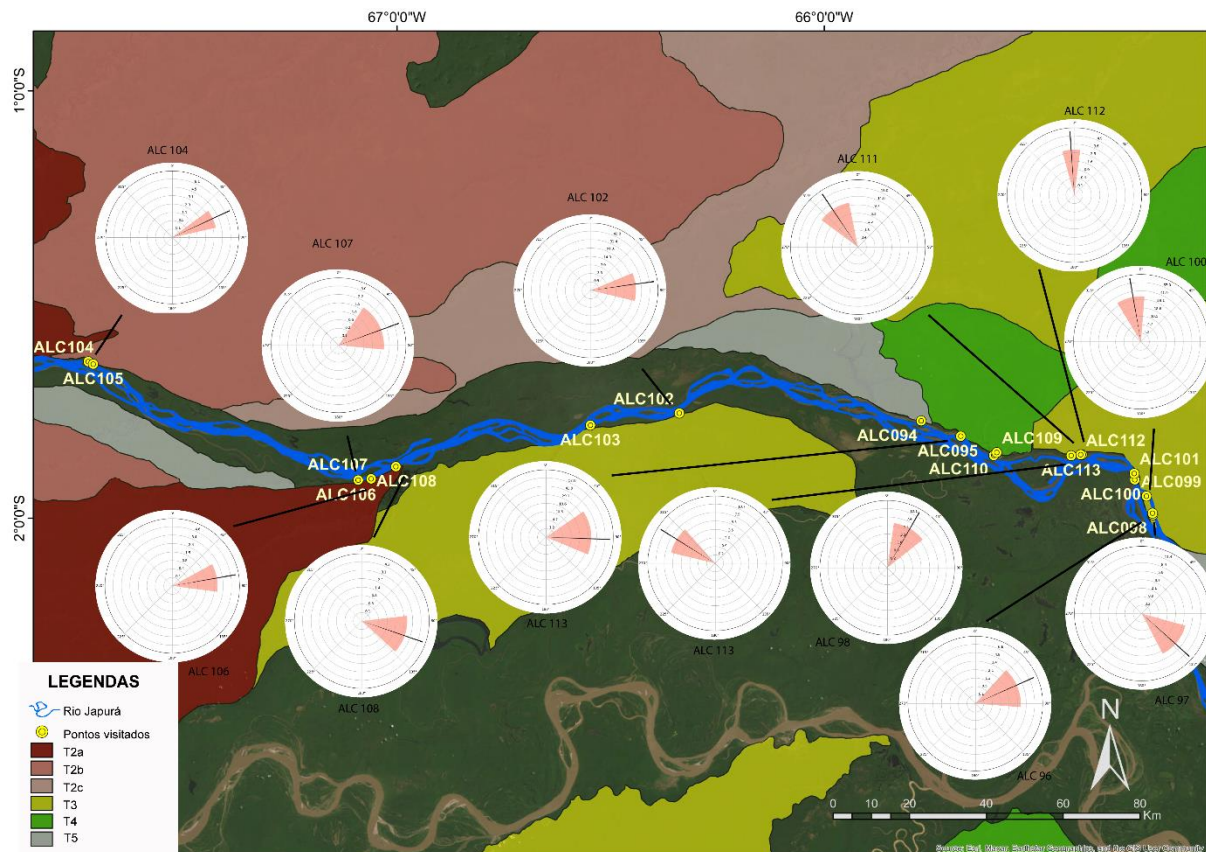


Figura 49 - Mapa de pontos com diagramas contendo o vetor médio de cada ponto e o erro do vetor médio (em rosa nos diagramas)

Ao se analisar os mapas gerados com os diagramas de roseta, é possível observar dois padrões distintos no conjunto de dados obtidos nos pontos, um que engloba os pontos mais a oeste feitos (ALC 102, 104, 106, 107 e 108) e outro abrangendo os pontos à leste (ALC 95, 96, 97, 98, 100, 111, 112 e 113), próximo à cidade de Maraã e à confluência com o Rio Solimões (figura 50). As medidas referentes ao oeste mostram uma orientação geral para leste, com azimuth médio em torno de 81° , enquanto as medidas referentes ao leste apresentam vetor médio para norte, de azimuth por volta de 12° . A partir desta observação, realizou-se um teste de hipótese, procedimento estatístico onde são avaliadas inferências, ou hipóteses, a respeito de uma população a partir das amostras coletadas, com a finalidade de angariar base para uma tomada de decisão. De modo geral, é debatida a veracidade de duas hipóteses, a nula; hipótese representante da ideia contrária a suposição feita; e a alternativa; hipótese proposta pelo pesquisador. São avaliadas com base em testes e cálculos estatísticos, como por exemplo, teste probabilístico de duas amostras de paleocorrentes, que apresentam uma discrepância de vetor médio, terem sido depositadas por sistemas fluviais com diferentes direções de jusante.

No caso das paleocorrentes dos terraços estudados, a hipótese nula consiste que as amostras do oeste pertencem a mesma população das amostras leste, geradas pelo mesmo sistema fluvial, enquanto a hipótese alternativa supõe que se trata de populações diferentes, formadas por dois sistemas fluviais distintos. O teste de hipótese foi realizado também utilizando a linguagem de programação python, e resultou em descarte da hipótese nula, apontando para duas populações distintas de paleocorrentes, cuja gênese se relaciona a dois sistemas fluviais, um com jusante para leste e outro para norte.

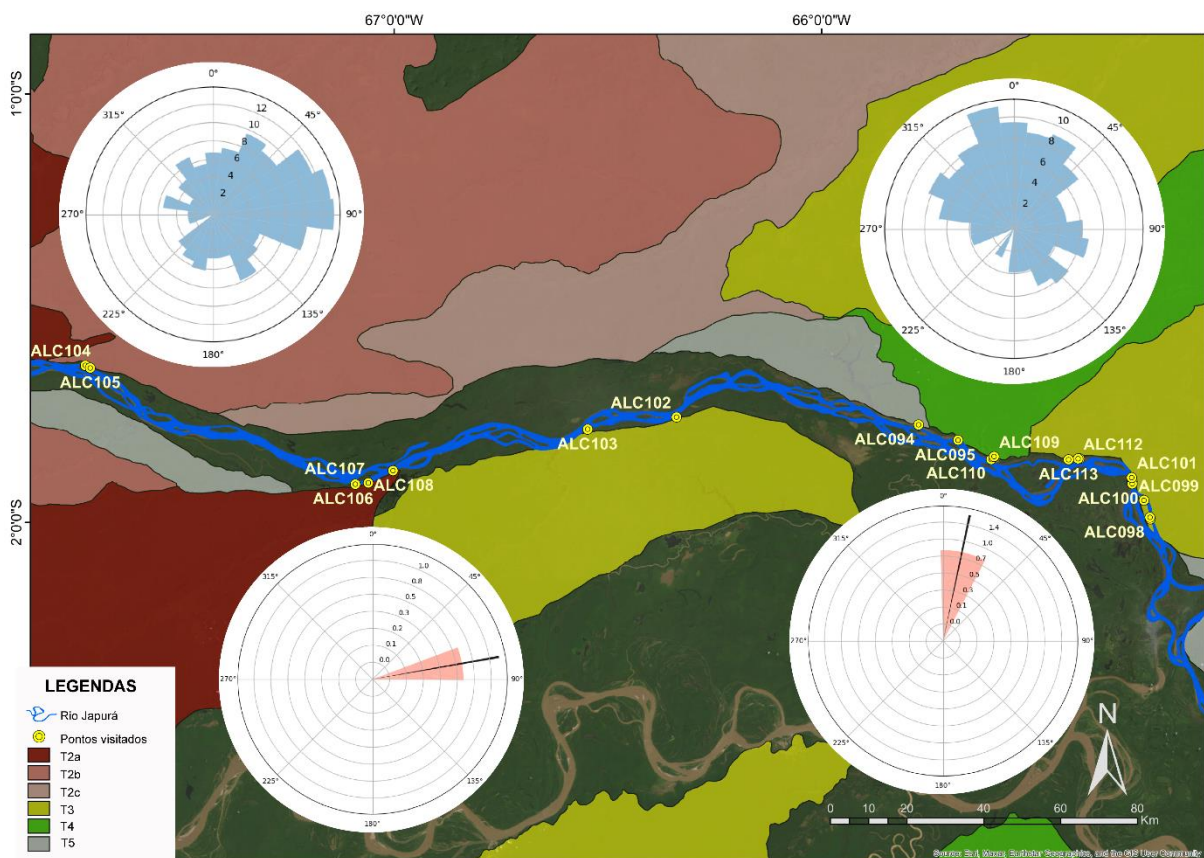


Figura 50 - Padrões regionais das paleocorrentes a Leste (direita, diagrama de roseta e de vetor médio) e Oeste (a esquerda, diagrama de roseta e de vetor médio), utilizados no teste de hipótese.

6. DISCUSSÕES

O estudo dos afloramentos dos terraços seccionados pelo Rio Japurá permite traçar semelhanças com trabalhos anteriores feitos na região. Nas pesquisas feitas recentemente na região, como os de Pupim et al. (2019) e Rossetti et al. (2014b), os terraços mapeados são descritos como sucessões construídas por meio de agradação

de barras fluviais e planícies de inundação, seguido por períodos de incisão de vales que formaram a paisagem atual (Pupim et al. 2019).

Ao longo dos pontos visitados, pode-se observar em alguns afloramentos a gradação completa de uma barra fluvial (marcado como elemento SB, de campos de dunas de fundo de canal, de Miall (1996)) para um topo de barra (elemento SB, de assembleia de topo de barra, de Miall (1996)) e finalmente para uma associação de fácies típica de planície de inundação (elemento FF de Miall (1996)), encontrado nos pontos ALC 113 e ALC 102. Tal sucessão de associações de fácies e elementos arquiteturais indica o surgimento e crescimento de uma barra subaquática seguida de mudança de posição do canal e desenvolvimento de planície de inundação, apontando para uma possível migração de canal. Outra possibilidade decorre apenas da construção de uma barra central, onde após atingir dimensões grandes suficiente, passa a se comportar como um ilha no meio do canal sujeita a inundações periódicas do rio, processo típico que ocorre em rios do tipo *anabranching*.

O mais comum nos afloramentos visitados é a presença de duas ou apenas uma associação de fácies. Nos pontos na região mais a leste, próximos à confluência com o Rio Solimões, é mais recorrente a sucessão de topo de barras gradando para sedimentos finos de planície de inundação (e.g. ALC 96, 98, 111), indicando um episódio de migração de canal ou de construção de barra. Os outros pontos apresentam somente sucessões únicas de topos de barras (ALC 110 e 97) ou de canais e barra (ALC 100 e 112), sem a preservação de mais associações que permitem a inferência de outros processos de evolução do depósito, como ocorrem com os pontos ALC 102, 104, 107 e 113, o que está de acordo com Miall (2014), onde é observado que o comum quando se trata de sedimentos fluviais é a não preservação de corpos e estruturas.

Apenas nos dois pontos mais a oeste, ALC 104 e ALC 107, existe a repetição de sucessões. Em ambos os casos, os afloramentos apresentam em sua base uma associação de barra, seguido de sucessão típica de topo de barra e finalizando em seu topo com sucessão de barra novamente. Tal sequência é esperada em casos de mudança na posição do canal para um posterior retorno, depositando novamente sedimentos arenosos de canal onde antes se depositavam as parcelas finas de uma

planície de inundação. Pode-se esperar esta sequência também em condições em que houve um aumento no nível de base.

Em dois dos pontos visitados, ALC 99 e ALC 101, pode-se observar somente associações de fácies de planície de inundação, mais especificamente, do elemento leque de crevasse (CS) de Miall (1996). Embora muito distintos entre si em termos de geometria dos elementos, ambos apresentam grande quantidade de estruturas hidrodinâmicas em sedimentos finos que atingem a granulação de areia fina, como camadas siltosas ricas em *ripples* e por vezes estratificações heterolíticas de areia fina e silte, que de acordo com Miall (1996), são características comumente encontradas em depósitos de leques de crevasse.

Com relação aos terraços mapeados, foram utilizadas as informações de Almeida (2023), onde modelos digitais de elevação, gerados por meio de SRTM, auxiliaram na individualização de cada um dos terraços a partir de diferenças altimétricas entre eles. Em Almeida (2023), a medição dos raios de *scroll bars* encontrados nas superfícies dos terraços e dados geoquímicos de proveniência permitiu atribuir um sistema fluvial gerador ao se comparar os valores medidos com os raios encontrados nos rios modernos. De acordo com os autores, as feições da região central da Amazônia são consequência de 4 eventos de incisão de vales distintos, após o estabelecimento de sistemas de megaleques, onde predominavam deposição e avulsão de canais durante período de alta do nível de base.

O sistema de terraços depositados pelo megaleque do Rio Japurá concentra-se a oeste e norte da região visitada neste trabalho, com os terraços depositados pelo megaleque do Rio Solimões concentrados a leste e norte da região, próximos à confluência entre os rios Japurá e Solimões, nos arredores da cidade de Marã (Almeida, 2023). Dos pontos visitados, apenas dois deles foram realizados em terraços mapeados como originados pelo Rio Japurá, os dois mais a oeste, ALC 104 e 107, enquanto todos os outros foram coletados em terraços cuja origem se aponta para o sistema do Rio Solimões. Pode-se observar que os sedimentos depositados pelo Rio Japurá são expressivamente mais grossos, contendo conglomerado de grânulos e seixos pequenos, característicos de sedimentos carregados como carga de fundo do talvegue de um rio (Galeazzi et al. 2018) em meio a areias médias a grossas, no caso do ALC 104, e grandes sucessões arenosas típicas de barras,

contendo areias médias a grossas em *sets* de estratificação cruzada planar e acanalada, no caso do ALC 107. Nos outros pontos visitados, todos concentrados em terraços mapeados como gerados a partir do megaleque do Rio Solimões, há o predomínio de areias finas a muito finas, por vezes siltosas em sucessões típicas de barras. Tais evidências apontam que existe uma dicotomia entre as medidas de granulometria coletadas como sendo do Rio Japurá (mais grosso) e do Rio Solimões (mais fino) nos terraços estudados.

Ainda na questão dos terraços, é possível estabelecer alguns padrões ao se observar as medidas de paleocorrente. Durante o tratamento estatístico desses dados, pode-se observar duas tendências distintas nas medidas coletadas, uma para Leste, observada nos pontos encontrados mais a Oeste, nos terraços previamente interpretados com depositados durante o Pleistoceno pelo Rio Japurá, e outra tendência para Norte, encontrada nos pontos mais a leste, nos terraços interpretados como depositados pelo Rio Solimões (terraços a norte do atual curso do Rio Japurá) (Almeida, 2023), como ilustrado pelas figuras 49 e 50.

Foi realizado um teste de hipóteses, procedimento estatístico no qual se testa a probabilidade de duas amostras terem sido geradas por populações distintas ou não, onde se testou a possibilidade de ambas as tendências terem sido geradas por um mesmo regime fluvial (hipótese nula) ou por sistemas fluviais diferentes (hipótese alternativa). A média vetorial das amostras separadas como pertencentes ao Oeste (de tendência geral leste) mostraram valor próximo à $80,9^\circ$, com a média vetorial das amostras Leste (de tendência geral norte) mostrando valor próximo à $12,3^\circ$. A diferença nominal entre as médias é de aproximadamente $68,5^\circ$, e resultou em descarte da hipótese da hipótese nula, uma vez que a probabilidade medida para a hipótese nula foi menor que 5%, apontando para duas tendências distintas geradas por sistemas fluviais distintos. Associando-se tal informação com a dicotomia na granulometria observada durante a viagem de campo, mais grossa encontrada a oeste e mais fina a leste, pode-se depreender que de fato os terraços atravessados pelo vale incisado pelo Rio Japurá possuem ao menos dois sistemas fluviais distintos, que os geraram durante o Pleistoceno, indicado por Almeida (2023) como dois megaleques, um associado ao Rio Japurá e outro associado ao Rio Solimões.

Os dados de paleocorrente coletados permitem a inferência de uma antecipação da confluência entre os rios Solimões e Negro em relação ao que se observa em seus cursos atualmente. As medidas referentes aos terraços depositados pelo Rio Japurá pleistocênico indicam direção de fluxo para leste, enquanto as medidas obtidas nos terraços depositados pelo Solimões mostram mudança de sentido do fluxo do rio se comparado com o sistema moderno, uma vez que aos arredores da cidade de Marañ a direção geral do fluxo dos terraços é para norte, em direção ao Rio Negro, indicando antecipação da confluência durante o Pleistoceno em cerca de 600 Km, o que permite atribuir ao Rio Solimões o maior caso de mudança de curso de um rio, seja por avulsão ou captura fluvial.

Miall (1988) faz diversas observações a respeito da utilização de elementos arquiteturais no auxílio da caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos, uma vez que o aprendizado auxilia no preenchimento de lacunas existentes entre outros métodos auxiliares de prospecção como a sísmica, que identifica heterogeneidades na escala de bacias, e poços de malhas convencionais, cuja resolução se encontra na ordem de centímetros a dezenas de metros. Em Yue et al. (2019) a importância do conhecimento da geometria dos corpos de reservatório é reforçada, ao mostrar que é possível aumentar a produção de um sistema já em declínio apenas com dados da forma e conectividade dos corpos.

Howell et al. (2014) discute o uso de análogos de reservatório para caracterização de sistemas em subsuperfície, utilizando para tanto dados de afloramentos em superfície (o mais acessível e comum) como de subsuperfície obtidos por meio de GPR, por exemplo. O uso de análogos providencia informações que permitem o refinamento de modelos e da estratigrafia fluvial, com dados referentes à geometria, dimensões, distribuição espacial de heterogeneidades e corpos arenosos que controlam o fluxo de hidrocarbonetos e ainda fornece um ampliamto na base de dados referentes a dimensões e geometrias dos corpos e da ligação com padrões de conectividade e da estratigrafia de sequência fluvial.

Os dados obtidos a partir de análogos de reservatório em superfície podem ser aplicados de 4 maneiras distintas, de acordo com Howell et al. (2014), sendo elas: *Hard data*, que descreve características geométricas dos corpos; *Soft Data*, que discute relações conceituais de conectividade e heterogeneidades; *Trainig Data*, que

se utiliza de modelos quantitativos gerados a partir de *hard data* e *soft data* para a descrição das relações espaciais dos corpos arenosos; e *Analogue production Data*, que consiste de dados coletados de sistemas em produção. O presente trabalho tem como um dos objetivos fornecer dados que se encontram no campo de *Hard Data*, providenciando análises que individualizam e identificam corpos arenosos que foram depositados por meio de sistemas fluviais de grande porte, como o Rio Japurá e Solimões.

Em Figueiredo (2017), a Formação São Sebastião da Bacia do Tucano é estudada como um análogo de reservatório e importantes conclusões são feitas a respeito dos elementos identificados. Os melhores corpos para a formação de reservatórios são compostos pelas barras fluviais, tanto barras unitárias quanto compostas. Os elementos identificados como topos de barras compõem importantes barreiras de permeabilidade, formando os selos dos reservatórios, constituídos pelas barras. A granulometria surte maior efeito na permeabilidade, sendo grãos mais grossos mais eficientes na formação de conectividade entre os poros e com intraclastos de argila afetando esta grandeza quando compactadas por processos diagenéticos. A porosidade por sua vez é diretamente proporcional à seleção dos grãos. Estruturas sedimentares mostram maior influência na porosidade que permeabilidade, com as estruturas cruzadas sendo as mais propícias para o desenvolvimento de um reservatório rentável.

Nos terraços seccionados pelo Rio Japurá, tanto os de gênese associada ao Rio Solimões quanto os formados pelo próprio Japurá, apresentam características favoráveis e preferíveis à um reservatório fluvial. Grandes corpos arenosos podem ser identificados, como os observados nos pontos ALC 107, 113 e 112, onde barras de ao menos 4 metros de espessura, podendo atingir mais, uma vez que a continuidade inferior não pôde ser conferida durante a visita de campo, e dezenas de metros de extensão lateral podem ser identificadas imediatamente abaixo de elementos de topos de barra, indicados por Figueiredo (2017) como excelentes barreiras de permeabilidade. Em Tamura et al. (2019), barras de grandes dimensões, ultrapassando quilômetros de comprimento, são descritas tanto para o Rio Japurá quanto para o Solimões, o que providencia noções sobre os tamanhos esperados para corpos arenosos depositados por esses sistemas fluviais em tempos passados. Com relação à conectividade desses corpos, não foi possível estabelecer conclusões

devido a limitação espacial dos afloramentos e densa cobertura vegetal, contudo, pode ser dada por meio da migração e acreção destas barras, formando extensos campos de dunas subaquosas. Os elementos de planície de inundação (sedimentos finos, canais abandonados, leques de crevasse), amplamente observados ao longo dos pontos visitados, também providenciam ótimas barreiras de permeabilidade.

7. CONCLUSÕES

A região central da Amazônia vem sendo estudada desde o século passado, com aumento no número de trabalhos após a descoberta de hidrocarbonetos ao final da década de 1970, com a identificação da província de óleo e gás do Juruá e com a descoberta da província de óleo, gás e condensado do Urucu pela metade da década de 1980. Estudos com relação ao quaternário da região tomaram mais importância em tempos mais recentes, na tentativa de se estabelecer a cronologia da área, principalmente de eventos importantes como a inversão do fluxo do Rio Amazonas e estabelecimento do rio transcontinental, de nascente andina e foz no Oceano Atlântico.

A caracterização dos terraços fluviais da Amazônia tomou importância principalmente a partir de trabalhos que pesquisavam a respeito da evolução da paisagem e sua relação com o surgimento da grande biodiversidade encontrada na floresta atualmente. Os terraços da região cortada pelo Rio Japurá não foram tão amplamente estudados, com este trabalho sendo um dos primeiros a coletar dados a respeito da sedimentologia desta região. Dessa forma, a principal contribuição deste trabalho se manifesta na descrição de seções e afloramentos dos terraços perpassados pelo Rio Japurá, com interpretações acerca dos elementos arquiteturais. Adicionalmente, busca-se também fornecer dados sobre análogos de reservatórios fluviais depositados por rios grandes.

Diversos perfis e afloramentos foram levantados e visitados ao longo do Rio Japurá, onde 7 fácies distintas foram reconhecidas, cada qual fornecendo diferentes informações acerca da gênese dos terraços: Fácies L1 – lamas sem estrutura, depositadas em condições de baixa energia; Fácies L2 – lama, silte e areia muito fina com estratificação cruzada, indicando migração de formas de leito de pequeno porte; Fácies A1 – areia com estratificação cruzada acanalada, insinuando migração de

dunas de crista sinuosa; Fácies A2 – areia sem estrutura, formada pela destruição de estruturas por processo de liquefação; Fácies A3 – areia com estratificação cruzada planar, geradas pela migração de dunas de crista reta; Fácies H – estratificação heterolítica, formadas onde o fluxo de água e energia é intermitente; Fácies C – conglomerados, representando sedimentos de carga de fundo transportados pelo talvegue do rio.

As fácies foram então agrupadas em associações, cada qual levando em consideração o ambiente nos quais foram depositadas. Três associações foram interpretadas, duas delas referentes a depósitos de canais e barras (AFB e AFT) e uma referente a planície de inundação (AFP). Na associação de fácies de barra (AFB), foram agrupadas fácies estritamente arenosas com estruturas hidrodinâmicas, que indicariam a sua construção por meio de migração de formas de leito. Na associação de fácies de topo de barra (AFT) estão agrupadas fácies lamosas e arenosas em alternância, indicando as variações do nível da água do rio que afeta a porção mais próxima da superfície de uma barra, muitas vezes encontrados emersos. Por fim, a associação de fácies externa ao canal (AFP) engloba as fácies de sedimentos finos, depositados sob condições de baixa energia, sem fluxo de água. Estas associações foram observadas ao longo de todo o trajeto pelos terraços visitados, muitas ocorrendo sobrepostas umas as outras.

Os terraços estudados foram mapeados como sucessões de agradações de barras fluviais e depósitos de planície de inundação, posteriormente escavados por meio de queda do nível de base. Almeida (2023) atribui a formação destes terraços do Pleistoceno à megaleques associados aos Rios Solimões, Juruá, Madeira e Japurá, escavados por seus respectivos rios formadores em episódios de queda de nível de base. Os terraços seccionados pelo Rio Japurá, de maneira similar, consistem em sucessões de depósitos de barra e canal, facilmente observados nos pontos ALC 104, 107 e 112, atingindo grandes dimensões, com até 9 metros de espessura e mais de 20 metros de extensão lateral, podendo atingir mais, uma vez que barras do Rio Japurá podem atingir alguns quilômetros de comprimento (Tamura et al. 2019). Os depósitos de planície de inundação, nos pontos ALC 96, 99, 101, 111 também mostram grandes dimensões, com depósitos de leques de crevasse de ao menos 3,5 metros de espessura e extensão lateral limitada apenas pela exposição do afloramento.

Com relação as análises estatísticas feitas sobre as medidas de paleocorrentes coletadas, algumas conclusões podem ser traçadas. Por meio do teste de hipóteses feito com relação as amostras referentes ao Leste da área estudada e ao Oeste, pôde-se descartar a hipótese nula, o que implica em duas populações distintas, uma para cada conjunto de paleocorrentes. É possível estabelecer que o Rio Japurá na região a Oeste da área de estudo, fluía para leste durante o Pleistoceno, enquanto na porção Leste, nos terraços nos arredores da cidade de Marã, o paleofluxo do rio que por ali passava era para norte. Levando em conta que foi um terraço depositado pelo Rio Solimões, pode-se dizer que durante o Pleistoceno, a confluência entre os Rios Negro e Solimões era antecipada, ocorrendo 600 Km a oeste do que se observa atualmente, categorizando o Rio Solimões como o maior caso de mudança de curso de um grande, seja por avulsão ou captura fluvial.

Por fim, pode-se concluir que rios do porte do Japurá e do Solimões gerariam bons reservatórios de hidrocarbonetos não marinhos. A dimensão dos corpos arenosos que teriam a função de reservatório mostra grandes proporções, como se observa nos pontos ALC 107 e 113 pela grande espessura e extensão lateral destes, capeados por elementos de topos de barra, que constituem boas barreiras de permeabilidade, que poderiam a vir a agir como camadas de rochas seladoras em um sistema de reservatório, já que se manifestam na totalidade sobre os corpos arenosos que viriam a ser os reservatórios (e.g. barras). A maior questão se encontra na conectividade entre os corpos, um dos principais fatores a se considerar se tratando de reservatórios fluviais. Contudo, a grande dimensão dos corpos arenosos observados já confere um caráter promissor, fora que tecnologias atuais se provaram como ferramentas de grande utilidade no refinamento de modelos, aumentando a produtividade de reservatórios de hidrocarbonetos de origem fluvial.

8. BIBLIOGRAFIA

- Alexander, J., 1993, A discussion on the use of analogues for reservoir geology *in* Ashton, M., 1993, *Advances in Reservoir Geology: Geological Society Special Publication*, vol. 69, p. 175-194.
- Allen, J. R. L., 1966, On bed forms and Paleocurrents: *Sedimentology*, vol. 6, p. 153-190.
- Allen, J. R. L., 1983, Studies on fluvial sedimentation: Bars, Bar-complexes and sandstone sheets (low sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. Devonian), Welsh Borders: *Sedimentary Geology*, vol. 33, p. 237-293.
- Almeida, R. P., 2023, Comunicação pessoal.
- ANA (2015). Avaliação dos Aquíferos das Bacias Sedimentares da Província Hidrogeológica Amazonas no Brasil (escala 1:1.000.000) e Cidades Pilotos (escala 1:50.000). *Geologia da PHA*, vol. II. Brasília, Agência Nacional de Águas, 126 p.
- Ashley, G.M., 1990, Classification of large-scale subaqueous bedforms; a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 60, 160-172.
- Ashworth, P. J., Lewin, J., 2012, How big rivers come to be different?: *Earth-Science Reviews*, vol. 114, p. 84-107.
- Bridge, J. S., 1993, Description and interpretation of fluvial deposits: a critical perspective: *Sedimentology*, vol. 40, p. 801-810.
- Bridge, J. S., 2003, *Rivers and Floodplains: forms, processes and sedimentary record*: Oxford, Blackwell Publisher, 491p.
- Bridge, J. S., Demicco, R. V., 2008, *Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits*: New York, Cambridge University Press, 815 p.
- Brookfield, M. E., 1977, The origin of bounding surfaces in ancient aeolian sandstones: *Sedimentology*, vol. 24, p. 303-332.
- Campbell, K. E., Frailey, C. D., Romero-Pittman, L., 2006, The Pan-Amazonian Ucayali Peneplain, late Neogene sedimentation in Amazonia, and the birth of

modern Amazon River system: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 239, p. 166-219.

Campbell, K. E., 2010, Late Miocene onset of the Amazon River and the Amazon deep-sea fan: Evidence from the Foz do Amazonas basin: *Comment: Geology*, vol. 37, p. 619-622, doi: 10.1130/G30633C.1.

Carrigy, M. A., Kramers, J. W., 1973, Guide to Athabasca oil sands area, in *Information Series*, vol. 65, 213 p.

Colombera, L., Felletti, F., Mountney, N. P., McCaffrey, W. D., 2012, A database approach for constraining stochastic simulations of the sedimentary heterogeneity of fluvial reservoirs: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 96, p. 2143-2166.

Eiras, J. F., 2005, Cenário Geológico das Bacias Sedimentares do Brasil in: *Apostila sobre Prospecção e Desenvolvimento de Campos de Petróleo e Gás (Schlumberger) – Projeto Multimin Tecnologia. Parte II - Tectônica, Sedimentação e Sistemas Petrolíferos da Bacia Solimões, Estado do Amazonas.*

Fielding, C. R., 1993, A review of recent research in fluvial sedimentology: *Sedimentary Geology*, vol. 85, p. 3-14.

Figueiredo, H. G., 2017, Caracterização dos depósitos fluviais da Formação São Sebastião (Bacia do Tucano – BA) como análogo de reservatório [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.

Figueiredo, J., Hoorn, C., van der Ven, P., Soares, E., 2009, Late Miocene onset of the Amazon River and the Amazon deep-sea fan: Evidence from the Foz do Amazonas basin: *Geology*, vol. 37, p. 619-622.

Fisher, N. I., 1993, *Statistical Analysis of Circular Data*: London, Cambridge University Press, 267 p.

Flach, P. D., Mossop, G. D., 1985, Depositional Environments of Lower Cretaceous McMurray Formation, Athabasca Oil Sands, Alberta: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 69, p. 1195-1207.

- Feng, Z. Q., Jia, C. Z., Xie, X. N., Zhang, S., Feng, Z. H., Timothy, A. C., 2010, Tectonostratigraphic units and stratigraphic sequences of the nonmarine Songliao basin, northeast China: *Basin Research*, vol. 22, p. 79–95.
- Ferreira, A.L., et al., 2006, Mapa geológico do Estado do Amazonas, Amazonas, Brasil. 1:1000000.
http://www.cprm.gov.br/publique/media/geologia_basica/cartografia_regional/mapa_amazonas.pdf
- Friend, P. F., 1983, Towards the field classification of alluvial architecture or sequence, in Collinson, J. D., Lewin, J. (eds) *Modern and ancient fluvial systems*. Int. Assoc. Sedimentol, special publications 6, p. 345-354.
- Fustic, M., Hubbard, S. M., Spencer, R., Smith, D. G., Leckie, D. A., Bennett, B., Larter S., 2012, Recognition of down-valley translation in tidally influenced meandering fluvial deposits, Athabasca Oil Sands (Cretaceous), Alberta, Canada: *Marine and Petroleum Geology*, vol. 29, p. 219-232.
- Galeazzi, C. P., Almeida, R. P., Mazoca, C. E. M., Best, J. L., Freitas B. T., Ianniruberto, M., Ciseneros, J., Tamura, L. N., 2018, The significance of superimposed dunes in the Amazon River: Implications for how large rivers are identified in the rock record: *Sedimentology*, vol. 65, p. 2388-2403.
- Galeazzi, C. P., Almeida, R. P., Prado, A. H., 2021, Linking rivers to the rock record: Channel patterns and paleocurrent circular variance: *Geology*, vol. 49, p. 1402-1407.
- Galloway, W. E., 1981, Depositional architecture of Cenozoic Gulf Coastal plain fluvial systems, in Ethridge, F. G., Flores, R. M. (eds) *Recent and ancient nonmarine depositional environments: models for exploration*. Soc. Econ. Paleontol. Mineral, special publications 131, p. 127-155.
- Gupta, A., 2007, *Large Rivers: Geomorphology and Management*: Chichester, John Wiley & Sons, 689 p.
- Hassanpour, R. M., 2009, A Review of McMurray Formation Geology in Athabasca Oil Sands. CCG annual report, vo. 11, paper 201.

- Hein, F. J., 2015, The Cretaceous McMurray oil sands, Alberta, Canada: A world-class, tidally influenced fluvial–estuarine system—An Alberta government perspective: *Developments in Sedimentology*, vol. 68, p. 561-621.
- Hoorn, C., 1993, Marine incursions and the influence of Andean tectonics on the Miocene depositional history of Northwestern Amazonia: results of a palynostratigraphic study: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 105, issues 3-4, p. 267-309.
- Hoorn, C., Guerrero, J., Sarmiento, G. A., Lorente, M. A., 1995, Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene Northern South America: *Geology*, vol. 23, no. 3, p. 237-240.
- Hoorn, C., Wesselingh, F. P., 2009, *Amazonia: Landscape and species Evolution. A look in the past*: Oxford, Wiley-Blackwell 447 p.
- Hoorn, C., Roddaz, M., Dino, R., Soares, E., Uba, C., Ochoa-Lozano, D., Mapes, R., 2009a, The Amazonian craton and its influence on past fluvial systems (Mesozoic-Cenozoic, Amazonia), in Hoorn, C., Wesselingh, F. P., 2009, *Amazonia: Landscape and species Evolution. A look in the past*: Oxford, Wiley-Blackwell, p. 103-122.
- Hoorn, C., Wesselingh, F. P., Hovikoski, J., Guerrero, J., 2009b, The development of the Amazonian mega-wetland (Miocene; Brazil, Colombia, Peru, Bolivia), in Hoorn, C., Wesselingh, F. P., 2009, *Amazonia: Landscape and species Evolution. A look in the past*: Oxford, Wiley-Blackwell, p. 123-142.
- Hornung, J., Aigner, T., 1999, Reservoir and aquifer characterization of fluvial architectural elements: Stubensandstein, Upper Triassic, Southwest Germany: *Sedimentary Geology*, vol. 129, p. 215-280.
- Hoimyr, O., Kleppe, A., Nystuen, J. P., 1993, Effects of heterogeneities in a braided stream channel sandsbody on the simulation of oil recovery: a case study from the Lower Jurassic Statfjord Formation, Snorre field, North Sea, in Ashton M., *Advances in reservoir geology*, Geological Society of London, vol. 169, p. 105-134.
- Howell, J. A., Martinius, A. W., Good, T. R., 2014, The application of outcrop analogues in geological modelling: a review, present status and future outlook in *Sediment-Body Geometry and Heterogeneity: Analogue Studies for Modelling Subsurface*, London, Geological Society, vol. 387, p. 1-25.

- Isea, A., 1987, Geological synthesis of the Orinoco oil belt, eastern Venezuela: *Journal of Petroleum Geology*, vol. 10, p. 135–148.
- Jackson, R. G., 1975, Hierarchical attributes and a unifying model of bed forms composed of cohesionless material and produced by shearing flow: *Geological Society of American Bulletin*, vol. 86, p. 1523-1533.
- Janikian, L., Almeida, R. P., Galeazzi, C. P., Tamura, L. N., Ardito, J. C., Chamani, M. A. C., 2019, Variability of Fluvial Architecture in a poorly vegetated Earth: Silurian sheet-braided and Meandering ancestor river deposits recorded in Northeastern Brazil: *Terra Nova*, vol. 32, p. 1-11.
- Jin, Y., Liu, D., Luo, C., 1985, Development of Daqing oil field by waterflooding: *Journal Petroleum Technology*, vol. 37, p. 269-274.
- Kopper, R., Kupecz J., Curtis C., Cole T., Dorn-López D., Copley J., Muñoz A., Caicedo V., 2001, Reservoir characterization of the Orinoco Heavy Oil belt: Miocene Oficina Formation, Zuata field, eastern Venezuelan basin: *Society of Petroleum Engineers International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Proceedings*, Porlamar, Venezuela, SPE Paper 69697.
- Labourdette, R., Jones, R. R., 2007, Characterization of fluvial architectural elements using a three-dimensional outcrop data set: Escanilla braided system, South-Central Pyrenees, Spain: *Geosphere*, vol. 3, p. 422-434.
- Latrubesse, E. M., 2003, The late Quaternary Palaeohydrology of Large South American Fluvial Systems, in Gregory, K. J., Benito, G., 2003, *Palaeohydrology: Understanding Global Change*, John Wiley & Sons, p. 193-212.
- Latrubesse, E. M., Stevaux, J. C., Sinha, R., 2005, *Tropical Rivers: Geomorphology*, vol. 70, p. 187-206.
- Latrubesse, E. M., 2008, Patterns of anabranching channels: The ultimate end-member adjustment of mega rivers: *Geomorphology*, vol. 101, p. 130-145.
- Latrubesse, E. M., Cozzuol, M., Silva-Caminha, S. A. F., Rigsby, C. A., Absy, M. L., Jaramillo, C., 2010, The late Miocene paleogeography of the Amazon basin and the evolution of the Amazon river system: *Earth-Science Reviews*, vol. 99, p. 99-124.

- Leopold, L. B., Wolman, M. G., 1957, River channel patterns, Braided, Meandering and straight: United States Geological Survey, p. 40-85
- Li, S., Yu, X., Chen, B., Li, S., 2015, Quantitative Characterization of Architecture Elements and their Response to Base-Level Change in a Sandy Braided Fluvial System at a Mountain Front: *Journal of Sedimentary Research*, vol. 85, p. 1258-1274.
- Liu, C., Wang, Z., Guo, Z., Hong, W., Dun, C., Zhang, X., Li, B., Wu, L., 2017, Enrichment and distribution of shale oil in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, Northeast China: *Marine and Petroleum Geology*, vol. 86, p. 751-770.
- MacDonald, A. C., Halland, E. K., 1993, Sedimentology and shale modeling of a sandstone-rich fluvial reservoir: Upper Staffjord Formation, Staffjord field, North Sea: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 77, p. 1016-1040.
- Maia, R. G. N., Godoy, H. K., Yamaguti, H. S., Moura, P. A., Costa, F. S. F., Holanda, M. A., Costa, J. A., 1977, Projeto Carvão no Alto Solimões, Relatório Final, 142 p.
- Marconato, A., Almeida, R. P., Turra, B. B., Fragoso-Cesar, A. R. S., 2013, Pre-vegetation fluvial floodplains and channel-belts in the Late Neoproterozoic-Cambrian Santa Bárbara group (Southern Brazil): *Sedimentary Geology*, vol. 300, p. 49-61.
- Martinius, A. W., Hegner J., Kaas I., Bejarano C., Mathieu X., Mjøs R., 2012, Sedimentology and depositional model for the early Miocene Oficina Formation in the Petrocedeño field (Orinoco heavy-oil belt, Venezuela): *Journal of Marine and Petroleum Geology*, vol. 35, p. 354–380.
- Martinius, A. W., Hegner J., Kaas I., Bejarano C., Mathieu X., Mjøs R., 2013, Geologic reservoir characterization and evaluation of the Petrocedeño Field, Early Miocene Oficina Formation, Orinoco Heavy Oil Belt, Venezuela in Hein F. J., Leckie D., Larter S., Suter J. R., 2013, Heavy oil and oil-sand petroleum systems in Alberta and beyond: *AAPG Studies in Geology*, vol. 64, p. 103 – 131.
- Miall, A. D., 1974, Paleocurrent analysis of alluvial sediments: a discussion of directional variance and vector magnitude: *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 44, p. 1174-1185.

- Miall, A. D., 1985, Architectural-Element Analysis: A New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits: *Earth-Science Reviews*, vol. 22, p. 261-308.
- Miall, A. D., 1988, Reservoir Heterogeneities in Fluvial Sandstones: Lessons from Outcrop Studies: *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 72, p. 682-697.
- Miall, A. D., 1996, *The Geology of Fluvial Deposits*: Berlim, Springer 582 p.
- Miall, A. D., 2006, How do we identify big rivers? And how big is big?: *Sedimentary Geology*, vol. 186, p. 39-55.
- Miall, A. D., 2014, *Fluvial Depositional Systems*: Suíça, Springer 316 p.
- Mitten, A. J., Mullins, J., Pringle, J. K., Howell, J., Clarke, S. M., 2020, Depositional conditioning of three dimensional training images: Improving the reproduction and representation of architectural elements in sand dominated fluvial reservoir models: *Marine and Petroleum Geology*, vol. 113, p. 104-156.
- Moreira, J. V. P., Paula, F. D. S., Viana, M. S. S., Chaves, A. P. P., Figueiredo, A. E. Q., 2018, Taenidium Barretti Bradshaw, 1981 na Formação Malhada Vermelha (Cretáceo Inferior), Bacia de Malhada Vermelha, Ceará, Brasil: *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, vol. 41, p. 104-112.
- Nanson, G. C., Knighton, A. D., 1996, Anabranching rivers: their cause, Character and classification: *Earth Surface Processes and landforms*, vol. 21, p. 217-239.
- Oppenheim, V., 1937, Geological exploration between Upper Juruá river, Brazil, na Middle Ucayali river, Peru: *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, vol. 21, no. 1, p. 97-110.
- Ponte, M. V., 2019, Variabilidade de Paleocorrentes e Interpretação de Estilos de Canais na Formação Marizal, Cretáceo, Bacia do Tucano Central (BA) [Dissertação de Mestrado]: São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências.
- Potter, P. E., Pettijohn, F. J., 1977, *Paleocurrents and Basin Anaylisis*: New York, Springer-Verlag, 425 p.
- Potter, P. E., 1978, Significance and Origin of Big Rivers: *The jornal of Geology*, vol. 86, no. 1, p. 13-33.

- Pupim, F. N., Sawakuchi, A. O., Almeida, R. P., Ribas, C. C., Kern, A. K., Hartmann, G. A., Chiessi, C. M., Tamura, L. N., Mineli, T. D., Savian, J. F., Grohmann, C. H., Bertassoli, D. J., Stern, A. G., Cruz, F. W., Cracraft, J., 2019, Chronology of Terra Firme formation in Amazonian lowlands reveals a dynamic Quaternary landscape: *Quaternary Science Reviews*, vol. 210, p. 154-163.
- Ramm, M., Ryseth, A., 1996, Reservoir quality and burial diagenesis in the Statfjord Formation, North Sea: *Petroleum Geoscience*, vol. 2, p. 313-324.
- Rossetti, D. F., Toledo, P. M., Góes, A. M., 2005, New geological framework for Western Amazonia (Brazil) and implications for biogeography and Evolution: *Quaternary Research*, vol. 63, p. 78-89.
- Rossetti, D. F., Cohen, M. C. L., Bertani, T. C., Hayakawa, E. H., Paz, J. D. S., Castro, D. F., Friaes, Y., 2014a, Late Quaternary fluvial terrace Evolution in the main Southern Amazonian tributary: *Catena*, vol. 116, p. 19-37.
- Rossetti, D. F., 2014b, The role of tectonics in the late Quaternary Evolution of Brazil's Amazonian landscape: *Earth-Science Reviews*, vol. 139, p. 362-389.
- Ryseth, A., Ramm, M., 1996, Alluvial architecture and differential subsidence in the Statfjord Formation, North Sea: prediction of reservoir potential: *Petroleum Geoscience*, vol. 2, p. 271-287.
- Ryseth, A., 2001, Sedimentology and palaeogeography of the Statfjord Formation (Rhaetian-Sinemurian), North Sea: *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, vol. 10, p. 67-85.
- Silva, M. V., Silva, J. S., Calmant, S., Paris, A., 2015, Avaliação das incertezas dos resultados de modelagem hidrológica associados a produtos de precipitação na Bacia do Rio Japurá, in XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável: desafios do conhecimento e da gestão, Brasília, novembro de 2015.
- Slatt, R. M., 2006, Stratigraphic reservoir characterization for petroleum geologists, geophysicists, and engineers: Elsevier Science, 492 p.

- Steel, R., Ryseth, A., 1990, The Triassic - early Jurassic succession in the northern North Sea: megasequence stratigraphy and intra-Triassic tectonics: Geological Society of London special publications, vol. 55, p. 139-168.
- Summa, L. L., Goodman, E. D., Richardson, M., Norton, I. O., Green, A. R., 2003, Hydrocarbon systems of Northern Venezuela: Plate through molecular scale analysis of the genesis and Evolution of the Eastern Venezuela Basin: Marine and Petroleum Geology, vol. 20, p. 323-349.
- Tamura, L. N., Almeida, R. P., Galeazzi, C. P., Freitas, B. T., Ianniruberto, M., Prado, A. H., 2019, Upper-bar deposits in large Amazon rivers: Occurrence, morphology and internal structure: Sedimentary Geology, vol. 387, p. 1-17.
- Tandon, S. K., Sinha, R., 2007, Geology of Large Rivers, in Gupta, A., 2007, Large Rivers: Geomorphology and Management: Chichester, John Wiley & Sons, p. 7-28.
- Tang, X., Zhang, B., Höök, M., Feng, L., 2010, Forecast of oil reserves and production in Daqing oilfield of China: Energy, vol. 35, p. 3097-3102.
- Tong, X., Hu, J., Xi, D., Zhu, M., Song, J., Peng, P., 2018, Depositional environment of the Late Santonian lacustrine source rocks in the Songliao Basin (NE China): Implications from organic geochemical analyses: Organic Geochemistry, vol. 124, p. 215-227.
- Tucker, M. E., 1982, The Field Description of Sedimentary Rocks: New York, John Wiley & Sons, 112 p.
- Van der Hammen, T., Duivenvoorden, J. F., Lips, J. M., Urrego, L. E., Espejo, N., 1992, Late Quaternary of the Middle Caquetá river area (Colombian amazonia): Journal of Quaternary Science, vol. 7, p. 45-55.
- Wanderley-Filho, J. R., Eiras, J. F., Cunha, P. R. C., van der Ven, P. H., 2009, The paleozoic Solimões and Amazonas basins and the Acre foreland basin of Brazil, in Hoorn, C., Wesselingh, F. P., 2009, Amazonia: Landscape and species Evolution. A look in the past: Oxford, Wiley-Blackwell, p. 29-37.
- Wanderley-Filho, J. R., Eiras, J. F., Vaz, P. T., 2007, Bacia do Solimões: Boletim de Geociências da Petrobrás, vol. 15, no. 2, p. 217-225.

- Wang, P. J., Mattern, F., Didenko, N. A., Zhu, D. F., Singer, B., Sun, X. M., 2016, Tectonics and cycle system of the Cretaceous Songliao Basin: An inverted active continental margin basin: *Earth-Science reviews*, vol. 159, p. 82-102.
- Yang, W., 1985, Daqing oil field, People's Republic of China: a giant field with oil of nonmarine origin: *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, vol. 69, p. 1101-1111.
- Yue, D., Li, W., Wang, W., Hu, G., Qiao, H., Hu, J., Zhang, M., Wang, W., 2019, Fused spectral-decomposition seismic attributes and forward seismic modelling to predict sand bodies in meandering fluvial reservoirs: *Marine and Petroleum Geology*, vol. 99, p. 27-44.