

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

ALBERT REIS FURTADO

CARACTERIZAÇÃO MORFOTECTÔNICA E HIDROMORFOLÓGICA DA
CONFLUÊNCIA DOS RIOS BRANCO X NEGRO E ADJASCÊNCIAS –
AMAZÔNIA, BRASIL

MANAUS, AMAZONAS

2023

ALBERT REIS FURTADO

CARACTERIZAÇÃO MORFOTECTÔNICA E HIDROMORFOLÓGICA DA
CONFLUÊNCIA DOS RIOS BRANCO X NEGRO E ADJACÊNCIAS –
AMAZÔNIA, BRASIL

Dissertação de Mestrado submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Geociências da Universidade Federal do
Amazonas.

NAZIANO PANTOJA FILIZOLA JÚNIOR.

MANAUS, AMAZONAS

2023

Ficha Catalográfica

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

F992c Furtado, Albert Reis
Furtado, Albert Reis
Caracterização morfotectônica e hidromorfológica da confluência
dos rios Branco x Negro e adjacências – Amazônia, Brasil / Albert
Reis Furtado . 2023
130 f.: il. color; 31 cm.
Orientador: Naziano Pantoja Filizola Júnior
Dissertação (Mestrado em Geociências - Geologia Ambiental) -
Universidade Federal do Amazonas.
1. Geomorfologia. 2. Bacia-Amazônica. 3. Confluências. 4.
Morfotectônica. I. Jr, Naziano Pantoja Filizola. II. Universidade
Federal do Amazonas III. Título

ALBERT REIS FURTADO

CARACTERIZAÇÃO MORFOTECTÔNICA E HIDROMORFOLÓGICA DA
CONFLUÊNCIA DOS RIOS BRANCO X NEGRO E ADJACÊNCIAS –
AMAZÔNIA, BRASIL

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

Aprovado em 15 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Naziano Pantoja Filizola Jr., Presidente.
Universidade Federal do Amazonas

Dr. André Martinelli, Membro.
SGB – Serviço Geológico do Brasil

Prof. Dr. Ingo Daniel Wahnfried, Membro.
Universidade Federal do Amazonas

A minha mãe e irmã

AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar este momento para expressar minha profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho de pesquisa de mestrado. Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder força e sabedoria para superar os desafios que surgiram no caminho.

À minha amada família, Priscila e Ieda, eu expresso meu sincero agradecimento pela compreensão, amor e apoio incondicional que sempre me deram. Sei que sem vocês ao meu lado, eu não teria chegado tão longe.

Um agradecimento especial à minha companheira de vida, Suyane, pela sua constante presença, suporte e incentivo, sempre me encorajando a seguir em frente.

Gostaria de expressar minha gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFAM e à FAPEAM, por conceder a bolsa de pesquisa que me permitiu continuar meus estudos e me dedicar ao meu projeto de pesquisa.

Ao meu orientador, Professor Dr. Naziano Filizola, quero agradecer a orientação, suporte e paciência em me ajudar a desenvolver esta pesquisa. E ao meu coorientador e colega, Professor Dr. Rogério Marinho, quero expressar minha sincera gratidão por sua amizade e companheirismo durante as saídas de campo.

Um agradecimento especial à Marinha do Brasil, na pessoa do Comandante Bruno, à equipe do navio de pesquisa, na pessoa Comissário Becker e a Equipe de Hidrografia nas pessoas do Sargento Ian, Sub Celso, Cabo Janderson, pela parceria que possibilitou a aquisição dos dados necessários para minha pesquisa.

Por fim, quero agradecer a todos os meus amigos da geologia, em especial à Beatriz Cunha, Eloyze Alfaia e Larissa Rolim, que compartilharam suas experiências comigo nos últimos anos, me ajudando a crescer profissional e pessoalmente.

Mais uma vez, expresso minha profunda gratidão a todos que contribuíram para o sucesso deste trabalho de pesquisa.

“Nos mesmos rios entramos e não entramos, somos e não somos.”

Heráclito

RESUMO

A geomorfologia da região amazônica possui características únicas, tanto pela extensão do seu território como por sua variedade de vegetação, solos, rios e rochas. No contexto dos fenômenos hidrológicos da Amazônia, as confluências fluviais representam um papel importante no desenvolvimento e entendimento da Amazônia, pois são locais de variadas características físicas, químicas e biológicas. Assim, entender como as confluências fluviais ocorrem pode indicar informações importantes sobre o comportamento do regime do rio, influências tectônicas, vias de possíveis transições de biota. Com isso, este trabalho versa sobre a caracterização geomorfológica da confluência do rio Negro com o rio Branco e descreve o funcionamento hidromorfológico do sistema, através de parâmetros morfológicos, hidrodinâmicos e tectônicos. A partir de uma análise altimétrica, estrutural, geomorfológica, com dados de campo e por imagens de satélite e radar, foi possível verificar que a região da confluência apresenta quatro principais zonas geomorfológicas, padrões anômalos de drenagem, alinhamento de knickpoints e lineamentos estruturais que configuram a atual geomorfologia da área. O estudo constatou que, devido a um rearranjo estrutural dos blocos crustais provocados por movimentos tectônicos a partir de um lineamento NW-SE na margem esquerda do rio Negro, o canal do Branco migrou para a atual confluência, aumentou a deposição dos sedimentos na região da sua foz, o que gerou delta que adentra o rio Negro, e provoca assim um barramento físico-geográfico que diminui a margem do Negro em até 15 km. Para manter a vazão constante, supera em até três vezes a velocidade de fluxo o do rio Branco, e aumenta a profundidade do seu talvegue na mesma proporção. Essas condições acarretam interações entre os depósitos sedimentares na confluência que não se encaixam nos modelos atuais, apesar de manter as interações hidráulicas, pois estão intimamente ligadas ao fato da confluência do rio Branco x rio Negro ser controlada pelo regime neotectônico amazônico.

Palavras-Chave: Geomorfologia; Bacia-Amazônica; Confluências; Morfotectônica

ABSTRACT

The geomorphology of the Amazon region exhibits unique characteristics, both in terms of its vast territory and the diversity of its vegetation, soils, rivers, and rocks. In the context of hydrological phenomena in the Amazon, river confluences play an important role in the development and understanding of the region, as they represent locations with diverse physical, chemical, and biological characteristics. Therefore, understanding how river confluences occur can provide valuable information about river regime behavior, tectonic influences, and potential biotic transitions. As such, this study focuses on the geomorphological characterization of the confluence between the Negro and Branco rivers and describes the hydromorphological functioning of the system using morphological, hydrodynamic, and tectonic parameters. Through altimetric, structural, and geomorphological analysis using field data, satellite imagery, and radar, it was possible to identify four main geomorphological zones, anomalous drainage patterns, alignment of knickpoints, and structural lineaments that shape the current geomorphology of the area. The study found that, due to a structural rearrangement of crustal blocks caused by tectonic movements along a NW-SE lineament on the left bank of the Negro River, the Branco River's channel shifted to the current confluence, resulting in increased sediment deposition in its estuarine region and the formation of a delta that extends into the Negro River, creating a physical-geographic barrier that reduces the width of the Negro River by up to 15 km. To maintain a constant flow, the Negro River surpasses the flow velocity of the Branco River by up to three times and increases the depth of its channel proportionally. These conditions lead to interactions between sediment deposits at the confluence that do not fit the current models, despite maintaining hydraulic interactions, as they are closely linked to the fact that the confluence of the Branco and Negro rivers is controlled by the Amazonian neotectonic regime.

Key-Words: Geomorfology; Amazon-Basin; Confluences; Morphotectonics

Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa de Localização da Confluência Rio Branco x Rio Negro.....	13
Figura 2 - Mapa de províncias geocronológicas do cráton Amazonas.....	14
Figura 3 - Mapa Geológico da região da Confluência rio Branco x rio Negro	15
Figura 4 - Compartimentação geomorfológica do arquipélago de Anavilhanas.	16
Figura 5 - Compartimentação geomorfológica do baixo rio Branco, Roraima.	18
Figura 6 - Mapa de estruturas da região do rio Negro	19
Figura 7 - Esquema relacionando os parâmetros morfométricos de um canal fluvial	26
Figura 8 - Relações métricas de canais fluviais.....	26
Figura 9 - Gráfico de Hjulström	27
Figura 10 - Gráfico de relação das formas de leito com a energia de fluxo correspondente. ..	29
Figura 11 - Padrões de canais fluviais.	31
Figura 12 - Morfologia fluvial, onde se encontram os depósitos aluviais e a planície de inundaçāo.....	32
Figura 13 - Padrões comuns de drenagem.....	34
Figura 14 - Padrões paralelos de drenagem.....	34
Figura 15 Padrões angulares de drenagem	35
Figura 16 - Padrões circulares de drenagem.....	36
Figura 17 - Padrão contorcido de drenagem.....	36
Figura 18 - Esquema de distribuição de fluxos em regiões de confluência	38
Figura 19 - Relações morfobatimétricas de regiões de confluências	39
Figura 20 - Elementos de uma Falha geológica	40
Figura 21 - Ilustração de um Molinete, à esquerda, e um ADCP, à direita.	43
Figura 22 - Esquema de operação de um ecobatímetro.....	43
Figura 23 - Equipe de levantamento de dados, na proa do navio de pesquisas da marinha Rio Negro.	48
Figura 24 - Equipamentos utilizados no levantamento de Campo: (A) ADCP, (B) GPS, (C), Haste de fixação do ADCP, (D), Notebook de Campo com o WinRiver II em processamento.	49
Figura 25 - Ilha fluvial de base rochosa, com perfil intempérico e depósitos aluvionares associados, com o estabelecimento de vegetação.....	52
Figura 26 - Margem direita do rio Negro, evidenciando blocos de rocha e ilhas rochosas	52

Figura 27 - A, compartimentação altimétrica da área de estudo; B. Compartimentação geomorfológica da área de estudo	53
Figura 28 - Mapa de Declividade da região da confluência	54
Figura 29 - Margens do rio Branco na região da confluência, evidenciando a alta declividade que ocorre nessa área	55
Figura 30 - Direção dos perfis topográficos em faixa elaborados	56
Figura 31 - Perfis topográficos em faixa, elaborados em amplitudes laterais de 20km, nas seções AB, CB e EF. As linhas em laranja correspondem ao perfil mais alto verificado, as linhas em azul se referem a média dos perfis e a linha em verde remete ao perfil mais baixo levantado na seção correspondente.....	57
Figura 32 - Mapa de lineamentos de relevo e drenagem da região da confluência do rio Branco x rio Negro.....	58
Figura 33 - Diagrama de rosetas dos lineamentos de relevo	59
Figura 34 - Mapa de Knickpoints extraídos	60
Figura 35 - Mapa de calor das anomalias de relevo	61
Figura 36 - Granito Gavião, localizado na região da foz do rio Branco.....	61
Figura 37 - Evidências estruturais na confluência do rio Branco x rio Negro.	62
Figura 38 - Falhamentos na calha do rio Jauaperi	63
Figura 39 - Falhamentos na calha do rio Jauaperi (acima) e Unini (abaixo).....	64
Figura 40 - Lineamentos estruturais e anomalias de relevo	65
Figura 41 - Caracterização geomorfológica do Delta do rio Branco.....	66
Figura 42 - Lineamento da foz do rio Branco	67
Figura 43 - Classificação das zonas homólogas da foz do rio Branco	68
Figura 44 - Zona Homóloga 7	69
Figura 45 - Zona Homóloga 8	70
Figura 46 - Zona Homóloga 9	71
Figura 47 - Mapa de drenagem da região da foz do rio Branco x rio Negro.....	73
Figura 48 - Classificação de Hierarquia de drenagem - STRAHLER.....	75
Figura 49 - Zonas Homólogas da região da confluência do rio Branco x rio Negro	76
Figura 50 - Anomalias de drenagem da região da foz do rio Branco x rio Negro.....	78
Figura 51 - Hidrograma comparado dos rios Branco e Negro	79
Figura 52 - Dados levantados na confluência do rio Branco x rio Negro	80
Figura 53 - Batimetria e Velocidade de fluxo da confluência do rio Branco x rio Negro	82

Figura 54 – Disposição do retroespalhamento (sinal +dB) da confluência do rio Branco x rio Negro	83
Figura 55 - Perfis longitudinais comparativos da confluência do rio Branco x rio Negro.....	85
Figura 56 - Perfil batimétrico da confluência do rio Branco x rio Negro	86
Figura 57 - Perfis profundidade x retroespalhamento da confluência.....	87
Figura 58 - Modelo digital batimétrico da confluência	91
Figura 59 - Identificação de morfologia de fundo segundo Best (2008).....	92
Figura 60 - Análise comparativa batimétrica entre as confluências dos rios Branco x Negro e Negro e Solimões	93
Figura 61 - Identificação de zonas de fluxo, segundo Best (2008)	94
Figura 62 - Análise comparativa das confluências do rio Branco x rio Negro e rio Negro x Rio Solimões	95
Figura 63 - Paleocanal do rio Branco	96
Figura 64 - Lineamento da foz do rio Branco	97
Figura 65 - Canal atual do rio Branco	98
Figura 66 - Subsistema de drenagem paralelo ao rio Branco	99
Figura 67 - Evolução do Delta do rio Branco.....	99

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivo.....	12
1.1.1 Objetivos Específicos.....	12
1.2 Localização da área de estudo.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 Geologia da Área de Estudo.....	14
2.2 Características fluviais	16
2.2.1 Rio Negro.....	16
2.2.2 Rio Branco	17
2.3 Morfotectônica da Região	19
2.4 Geomorfologia da Área.....	20
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	23
3.1 Geomorfologia	23
3.2 Geomorfologia Fluvial.....	24
3.2.1 Índices de Drenagem.....	32
3.2.2 Anomalias de Drenagem	33
3.3 Confluências Fluviais.....	37
3.4 Geologia Estrutural	39
3.5 Investigação Geomorfológica	41
3.5.1 Investigação Hidro-geomorfológica	41
4 METODOLOGIA	44
4.1 PRÉ CAMPO	44
4.1.1 Análise Altimétrica	44
4.1.2 Zoneamento Geomorfológico e Definição de geoformas deposicionais	44
4.1.3 Perfil Topográficos em Faixa e Declividade da área	45

4.1.4	Lineamentos e <i>Knickpoints</i>	45
4.1.5	Classificação da Rede de Drenagem.....	46
4.2	CAMPO	47
4.3	PÓS CAMPO.....	50
5	RESULTADOS OBTIDOS	51
5.1	Análise do Relevo	51
5.1.1	Altimetria	51
5.1.2	Compartimentação do Relevo.....	51
5.1.3	Declividade	54
5.1.4	Análise Morfoestrutural	55
5.1.5	Delta do rio Branco	65
5.2	Análise da Drenagem	71
5.2.1	Classificação dos canais.....	71
5.2.2	Índices de Drenagem.....	73
5.2.3	Hierarquias de Drenagem	74
5.2.4	Zonas Homólogas	75
5.2.5	Anomalias de Drenagem.....	77
5.3	Análise da Confluência	78
5.3.1	Características Hidrográficas da Confluência.....	78
5.3.2	Estatística descritiva dos dados levantados em campo	80
5.3.3	Batimetria e Velocidade de Fluxo	81
5.3.4	Retroespalhamento.....	83
5.3.5	Relações Hidrodinâmicas.....	84
6	DISCUSSÕES.....	88
6.1	Análise do Relevo e Drenagem.....	88
6.1.1	Estrutural.....	88
6.1.2	Delta do rio Branco	89

6.2	Análise da Confluência	90
6.2.1	Morfologia de Fundo	90
6.2.2	Hidrodinâmica.....	93
6.3	Evolução do Relevo	96
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
7.1	Possibilidades futuras.....	101
8	REFERÊNCIAS	102
9	ANEXO	113

1 INTRODUÇÃO

A Amazônia e toda a sua complexidade é estudada por diversas áreas do conhecimento, pois, conhecida mundialmente por sua imensa biodiversidade e pela floresta tropical úmida, que representa a maior área de floresta tropical contínua do mundo, os estudos científicos dessa região compreendem seus biomas, climas, fatores geológicos, geomorfológicos e, de forma especial, seus rios.

Os rios da região amazônica são alvo de pesquisas que buscam entender suas dinâmicas, regimes hidrológicos e potenciais nas áreas turísticas, energéticas e de infraestrutura. O estudo destes rios abrange diversos fatores, como navegação, riscos geológicos, hidrelétricas, subsistência, abastecimento, saneamento e impactos ambientais (FISCH *et.al.* 1990).

O entendimento da abrangência hidrográfica da bacia é fundamental devido ao uso múltiplo das águas, que é um estilo de vida na região, pois os rios desempenham um papel essencial no crescimento e desenvolvimento da população, fornecendo alimentação, transporte, abastecimento e energia. Destacam-se estudos no sistema fluvial amazônico Molinier (1994), LATRUBESSE *et. al.*, (2005), Espinoza Villar *et.al.* (2009), Bourgoin *et.al.* (2007), Leon *et.al.* (2006), Vauchel *et.al.* (2017), Guimberteau (2012), Bouchez *et. al.*, (2017).

Devido à necessidade de compreender esses corpos hídricos, os estudos geomorfológicos relacionados a eles são os que mais avançam (Sinha *et al.*, 2005), sempre ligados a grandes sistemas fluviais que ocorrem nos trópicos, abrangendo processos morfogenéticos, sedimentológicos, tectônicos e hidrodinâmicos.

A compreensão dos processos geodinâmicos fluviais possibilita a identificação de áreas críticas para intervenção humana, evitando a degradação ambiental e minimizando os impactos socioeconômicos negativos nas comunidades locais que dependem desses recursos. Além disso, os estudos geomorfológicos contribuem para o aprimoramento do conhecimento científico sobre esses ambientes, promovendo o desenvolvimento de técnicas e métodos de investigação cada vez mais precisos e eficientes.

Assim, o estudo de confluências vem tomando espaço na geomorfologia fluvial, como os estudos associados a modelos como Best (1986), Bristow *et. al.* (1993), Biron *et.al.* (1996), Parsons *et. al.* (2008), bem como os descritivos, principalmente aos associados à Amazônia, como Gualtieri (2018), Ianniruberto (2018), Gualtieri (2020).

Entender como ocorrem é de extrema importância para garantir a gestão adequada dos recursos hídricos, uma vez que uma confluência afeta a velocidade, direção, quantidade de água

no sistema, possui extrema importância para vida selvagem, através de interações biológicas entre os diferentes ambientes, além de alterar a dinâmica fluvial do leito do rio, contribuindo para a formação de áreas de erosão e deposição de sedimentos e o aumento da descarga.

Na região amazônica, destacam – se estudos em confluências fluviais de Alves 2019, Franzinelli 2011, Siqueira 2019, Nascimento 2016 e Marinho 2019, tendo os quatro primeiros, enfoque na confluência rio Negro – rio Solimões, onde um rio de águas pretas encontra – se com um rio de águas brancas de maior energia e fluxo de sedimentos, e o último, voltado a um panorama geral da região confluência do rio Negro com o rio Branco.

A confluência dos rios Negro e Branco é um ponto de grande relevância tanto social quanto científica na região norte do país. Essa junção de rios é responsável por fornecer água e nutrientes para a maior bacia hidrográfica do planeta, além de ser um importante ponto de encontro das comunidades ribeirinhas.

O rio Negro é um importante afluente do rio Amazonas, com extensão de 1.700 km (REVENGA *et. al.*, 1998), (GOULDING *et.al.*, 2003), abrigando os maiores arquipélagos fluviais do mundo e uma rica fauna e flora, com 90% da área da sua bacia em território brasileiro. É essencial para a subsistência dos ribeirinhos (SILVA, 2008), e utilizado como meio de transporte e fonte de água para Manaus. Também é um destino turístico popular para atividades ao ar livre, como a pesca esportiva e passeios de barco.

O Rio Branco é o principal rio no estado de Roraima, com cerca de 850 km de extensão (FREITAS, 1996) e (CAMPOS, 2011). Ele transporta a maior parte dos sedimentos gerados no estado, contribuindo para a manutenção de ecossistemas importantes na região, como as ilhas de Anavilhas. O rio também possui uma significativa importância socioeconômica, servindo como fonte de água para irrigação, abastecimento de cidades e pesca, que é uma das principais fontes de renda para as comunidades ribeirinhas locais.

A análise da confluência desses rios é fundamental para entender a dinâmica fluvial, as características dos sedimentos transportados e a formação das ilhas e arquipélagos fluviais presentes na região, e desenvolve sua importância no aspecto dos estudos morfogenéticos, sedimentológicos e hidrodinâmicos (BEST, 1988; Abrahams & Updegraph, 1987).

Através da análise de parâmetros morfológicos e tectônicos como a magnitude dos canais, carga transportada, regime de descarga líquida e sólida, geometria e história geológico-geomorfológica (SANTOS, 2015), é possível entender a formação e a evolução dos sistemas fluviais presentes, o que contribui para o conhecimento da história geológica da área, e como consequência o desenvolvimento de estratégias de gestão e preservação dos recursos naturais.

Tendo em vista a falta de dados para necessário entender como o sistema de confluências rio Negro x rio Branco ocorre e se mantém, o estabelecimento e aplicações das relações entre os modelos estabelecidos para outras confluências ao redor do mundo fica extremamente limitado, o que dificulta a compreensão do sistema fluvial amazônico, e a sua posterior gestão.

A análise integrada dos parâmetros mencionados pode enfim, fornecer informações valiosas para a compreensão da evolução geomorfológica da confluência dos rios e para a gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Amazonas.

1.1 Objetivo

O presente estudo tem como objetivo principal descrever o funcionamento hidro-geomorfológico do sistema de confluência fluvial do rio Branco com o rio Negro, dentro do contexto morfotectônico da região.

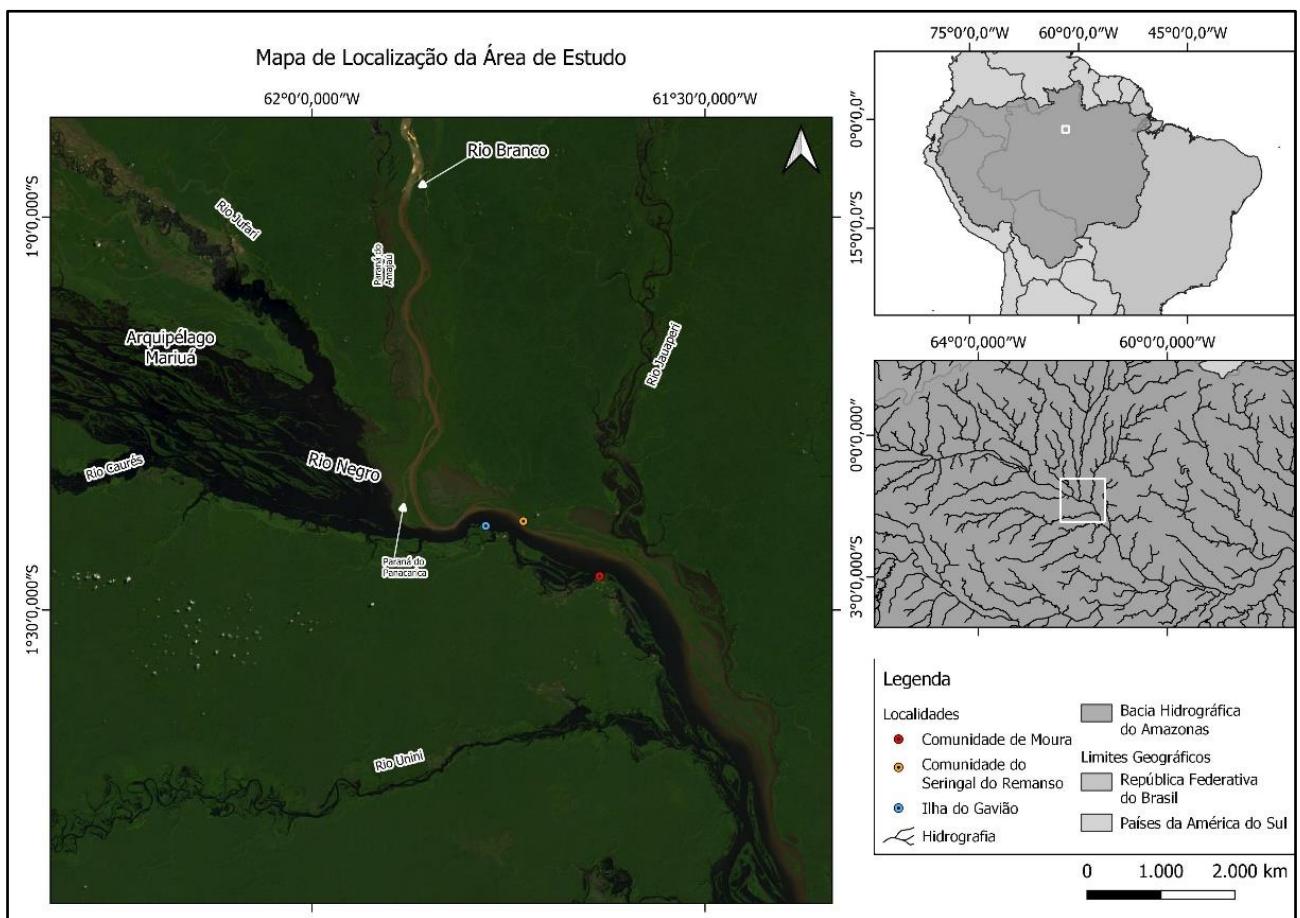
1.1.1 Objetivos Específicos

- Identificar padrões geomorfológicos da área de entorno da confluência, que possam ser considerados anômalos;
- Detalhar as geoformas deposicionais dos rios Branco e Negro;
- Caracterizar a morfotectônica da região da confluência;
- Realizar o levantamento de dados tridimensionais (X,Y,Z) da região da confluência, utilizando dos parâmetros de velocidade de fluxo, profundidade e sinal do retroespalhamento;
- Caracterizar a hidrodinâmica e morfologia da confluência;
- Gerar mapas e modelos digitais dos parâmetros levantados.

1.2 Localização da área de estudo

A região da confluência do rio Branco com o rio Negro está localizada no Brasil a noroeste da cidade de Manaus, Amazonas, e ao sul de Boa Vista, a capital do estado de Roraima. A foz do rio Branco é um ponto de divisa entre os dois estados. O acesso mais comum ao local da confluência é através de embarcações, subindo o rio Negro a partir de Manaus, percorrendo cerca de 300 quilômetros à montante ou descendo o rio Negro a partir de Barcelos, Amazonas, percorrendo de barco, cerca de 140 quilômetros (Figura 1).

Figura 1 - Mapa de Localização da Confluência Rio Branco x Rio Negro



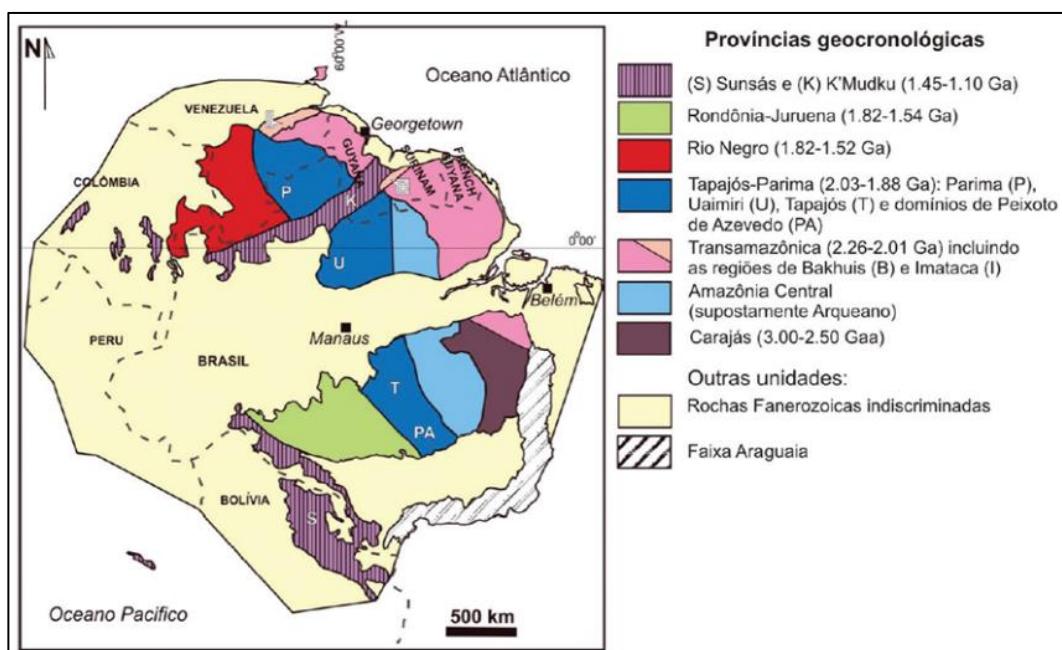
Fonte: O Autor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geologia da Área de Estudo

Geologicamente, os Estados do norte do Brasil, possuem uma peculiaridade: são pontos de encontro de rochas do embasamento do cráton amazônico com as bacias sedimentares fanerozóicas (SANTOS *et.al.*, 2006), (CPRM, 2003). O cráton é composto por rochas pré-cambrianas, e de natureza ígnea, sedimentar e metamórfica (figura 2). Com isso, tanto o rio Negro, quanto o rio Branco percorrem os domínios geológicos associados a províncias geocronológicas, de acordo com Santos, 2006, Tapajós Parima (2,03 – 1,88 GA), Rio Negro (1,82-1,52 GA) e Kmudku (1,45-1,1 GA). Nos sedimentos fanerozóicos, os rios Negro e Branco percorrem as bacias sedimentares do Solimões, com sequencias sedimentares Paleozóicas e Mesozóico-Cenozóicas, e a bacia do Tacutu, com sequencias Mezozóico-cenozoicas (MAIA *et.al.*, 2008).

Figura 2 - Mapa de províncias geocronológicas do cráton Amazonas



Fonte: Santos (2006).

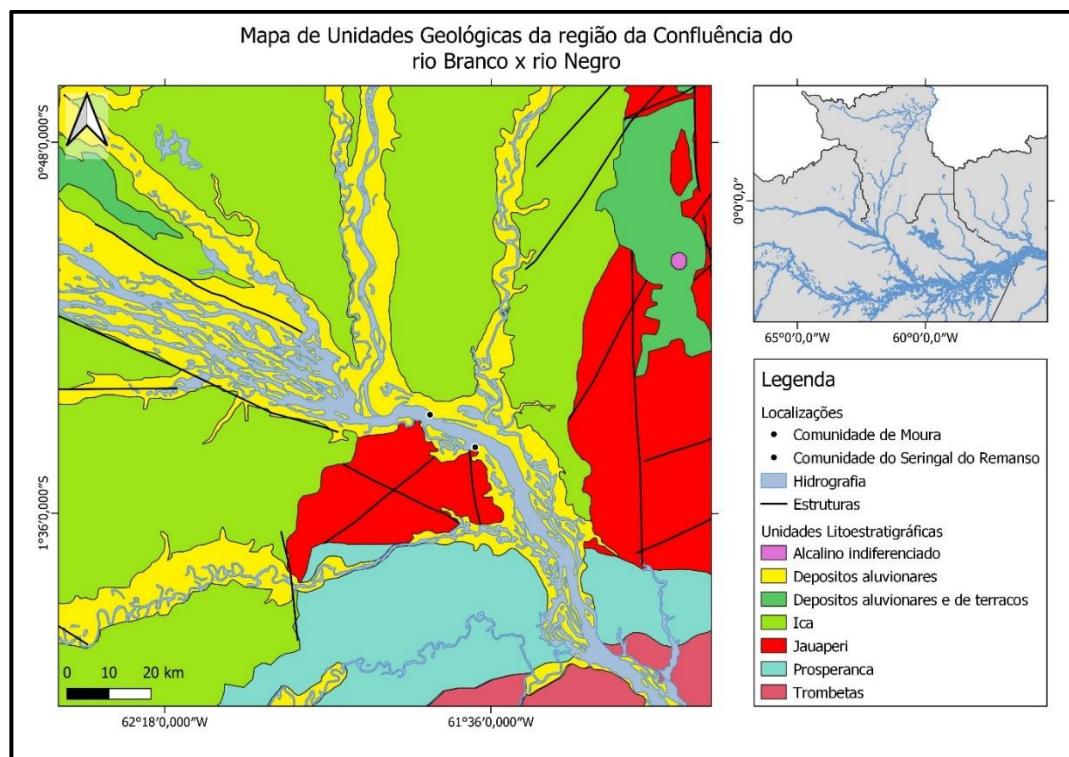
A região de estudo faz parte da Província Geocronológica Tapajós – Parima, que abrange a maior parte do estado de Roraima e atravessa o cráton na direção NW-SE. Essa província geocronológica é caracterizada por rochas de idade paleoproterozóica, com rochas mais recentes na direção E-W. A área de estudo está localizada no domínio Uatumã - Anauá, que faz parte dessa província.

O domínio Uatumã – Anauá é composto por uma estruturação de lineamentos principais NE-SW e NW-SE, com um trend secundário N-S e E-W, e de acordo com Reis et. al., 2003 possui uma evolução geológica com:

- Granitos anorogênicos e pós-orogênicos de idades variando de 1,87 a 1,88 Ga, e 1,81 Ga, intrusivos no grupo vulcânico Iricoumé;
- Granitos-gnaisse de idade 1,88 a 1,86 Ga, compreendendo áreas da bacia hidrográfica do rio Jauaperi e Uatumã;
- Exposição da cobertura sedimentar Urupi, de idade mínima 1,78 Ga;
- Magmatismo Seringa, 1,2 a 0,9 Ga, relacionado a uma fase extensional possibilitando a sedimentação da Bacia Prosperança;
- Bacia Prosperança, ocorrendo na janela de tempo entre 1027 e 22 Ma.

A região da confluência do rio Branco com o rio Negro possui uma geologia diversificada, que inclui depósitos aluvionares quaternários nas margens e leito dos rios, terraços aluvionares de origem quaternária, a Formação Içá relacionada aos terrenos aplainados e o Complexo Jauaperi, associado às rochas ígneas e metamórficas (MAIA, 2008). Além disso, há a presença de grandes lineamentos estruturais com distintas extensões e direções, o que demonstra a complexidade geológica da região (Figura 3).

Figura 3 - Mapa Geológico da região da Confluência rio Branco x rio Negro



Fonte: Modificado de CPRM, Geodiversidade do Estado do Amazonas (2006).

2.2 Características fluviais

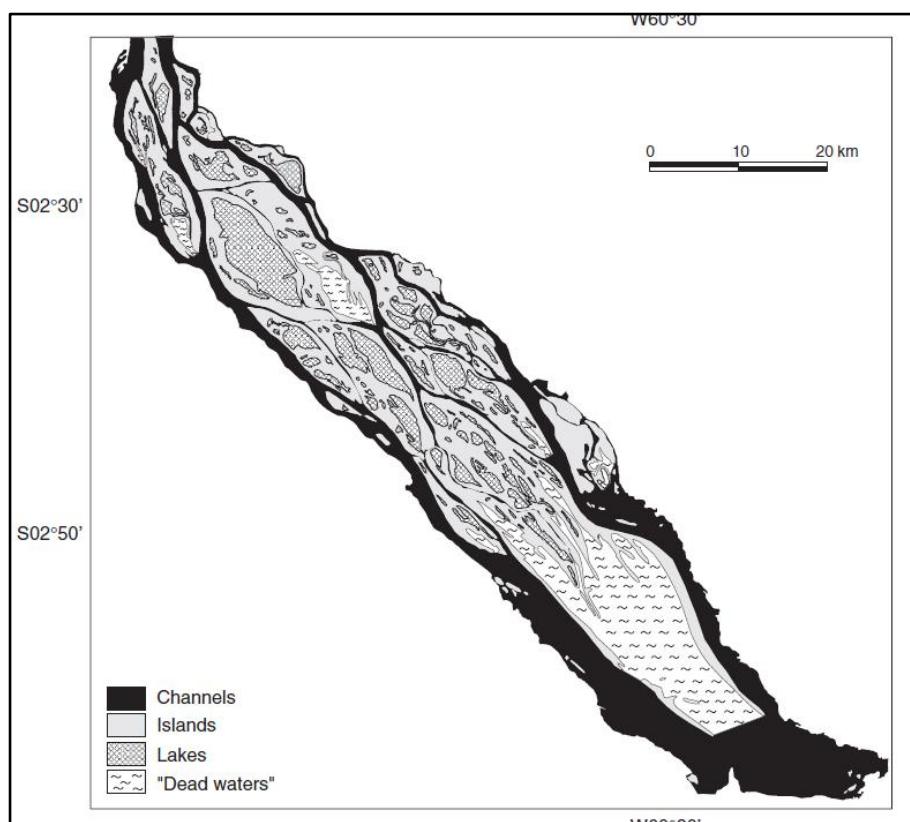
2.2.1 Rio Negro

O rio Negro é um dos principais rios da região amazônica e um dos maiores afluentes do rio Amazonas. Com uma extensão de 1700 km, (REVENGA *et. al.*, 1998) (GOULDING *et.al.*, 2003), o rio Negro nasce na Colômbia e atravessa o Brasil até desaguar no rio Amazonas, próximo à cidade de Manaus. Conhecido por suas águas de coloração escura, resultado da alta concentração de ácido húmico, proveniente da decomposição de matéria orgânica nas áreas de floresta ao longo de sua bacia.

A bacia hidrográfica do rio Negro é rica em biodiversidade, abrigando diversas espécies de peixes, aves e mamíferos (ALMEIDA, 2014). É habitada por comunidades indígenas e ribeirinhas que dependem do rio para subsistência e cultura, segundo Quieroz (2019) e Silva (2008). Ao longo do rio, encontram-se cidades importantes como Barcelos, São Gabriel da Cachoeira, Novo Airão e Manaus.

O rio é classificado por Latrubesse (2008) como Anabranching, e a planície de inundação resulta de uma sedimentação associada a mudanças paleoclimáticas, como evidencia Latrubesse e Franzinelli (2005), Figura 4.

Figura 4 - Compartimentação geomorfológica do arquipélago de Anavilhas.



Fonte: Latrubesse & Franzinelli (2005).

Rosseti et. al. (2019), evidenciam a atividade neotectônica, através de rebaixamentos e soerguimentos de blocos como um fator de alteração da biodiversidade e da geomorfologia, associando planícies de inundação, barras de areia, ilhas e florestas de igapó como características concorrentes inerentes à geodinâmica de uma bacia transtensional, que é parte do mega sistema amazônico.

2.2.2 Rio Branco

O rio Branco é o principal rio do Estado de Roraima-Brasil, sendo formado pela confluência dos rios Tacutu, que faz fronteira com a Guiana Inglesa, e o rio Uraricoera, que possui sua nascente à noroeste do Estado. Possui uma bacia de drenagem de 204 km² EVANGELISTA et al. (2008).

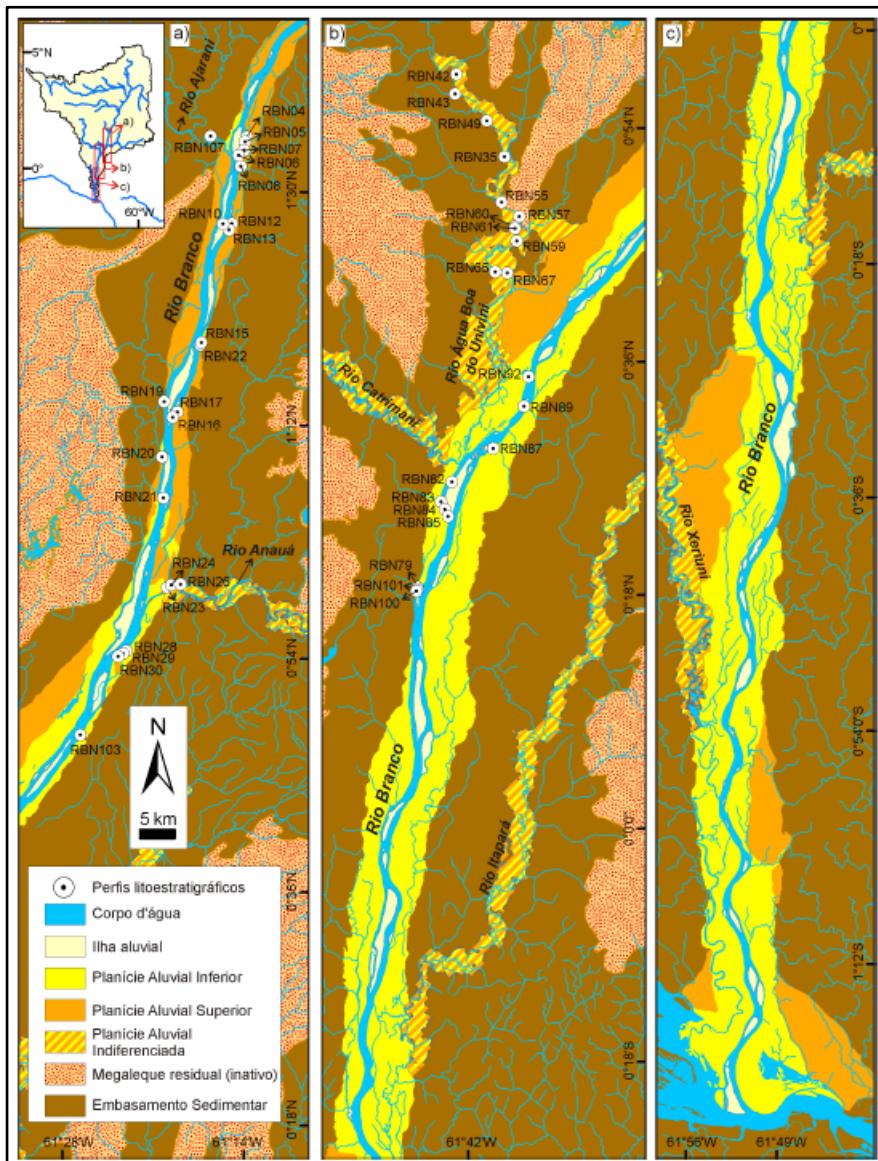
Drena 83% de Roraima, dos quais 12.310 km² são nascentes na região oeste da Guiana. O rio Branco tem grande importância para Roraima, uma vez que a capital – Boa Vista, está localizada nas suas margens, além do município de Caracaraí, que configura outro importante centro urbano da região (CAMPOS, 2011).

Caracteriza-se ainda como recurso para a agricultura, pesca e turismo. Ele é responsável pela irrigação de áreas agricultáveis ao longo de suas margens, além de abrigar uma grande variedade de espécies de peixes, o que torna a pesca uma importante atividade econômica. Além disso, o rio também é muito utilizado para o turismo, com atividades como a pesca esportiva, passeios de barco e acampamentos em suas margens (FREITAS, 1996).

Atualmente, os estudos geomorfológicos da bacia de drenagem do rio Branco estão ganhando expressividade, a exemplo de Sander *et.al.* (2012), que discorre sobre a compartimentação geomorfológica, separando a bacia em Alto, Médio e Baixo rio Branco, além de trabalhos de aplicação ambiental, a respeito de impactos associados ao regime de cheias do rio Branco na cidade de Boa Vista.

O principal trabalho geomorfológico do rio Branco atualmente é o trabalho de Cremon (2016), onde é feita uma caracterização de elementos geomorfológicos e sedimentares da planície aluvial do rio Branco (Figura 5), identificando áreas de deposição, erosão e inundação e suas características físicas como o tipo de rocha, processos pedogenéticos e até lacunas temporais.

Figura 5 - Compartimentação geomorfológica do baixo rio Branco, Roraima.



Fonte: Cremon (2016).

A principal conclusão é que há pelo menos 18,7 mil anos ocorreu a captura da drenagem correspondente às drenagens do alto rio Branco, resultado da influência tectônica gerando um processo de subsidência da região, que desviou o canal para sul. Isso produziu depósitos da planície aluvial superior e a retomada de sedimentação levou à formação da planície aluvial inferior. As mudanças na dinâmica fluvial do rio Branco não podem ser relacionadas com flutuações climáticas, mas o clima pode ter afetado o desenvolvimento do rio Branco a partir do Holoceno.

2.3 Morfotectônica da Região

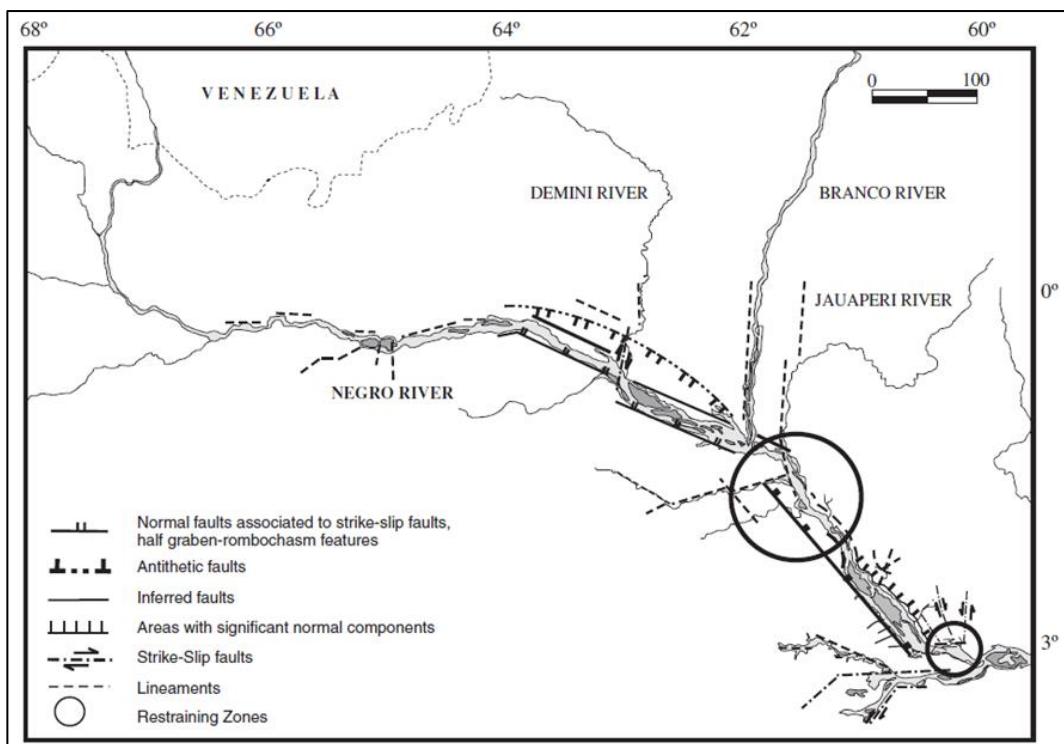
O contexto geológico da região é influenciado por eventos tectônicos significativos.

Um estudo importante para a caracterização da neotectônica amazônica é o de Costa et al. (1996), que mostra a presença de estruturas, sequências sedimentares, padrões de rede de drenagem e sistemas de relevo.

Em geral, são observados padrões de estruturas transcorrentes na direção leste-oeste, falhamentos inversos na direção nordeste-sudoeste e falhamentos transcorrentes nas direções noroeste-sudeste. Na região leste do Amazonas, abordada neste estudo, são identificados falhamentos transcorrentes na região de Moura até a confluência e falhamentos normais noroeste-sudeste ao sul da confluência, na área do arquipélago de Anavilhanas.

Estudos locais mostram que a região da confluência do rio Branco com o rio Negro possui uma série de estruturas associadas a neotectônica. Latrubesse & Franzinelli (2005), mostram as principais estruturas associadas a neotectônica na região do rio Negro, onde ocorre uma grande falha que controla a margem direita do rio Negro, que se estende do início do arquipélago de Mariuá até a área de confluência, e na margem esquerda ocorrem falhas inferidas e uma extensa falha antitética (figura 6).

Figura 6 - Mapa de estruturas da região do rio Negro



Fonte: Latrubesse & Franzinelli (2005).

No rio Branco são marcados lineamentos morfoestruturais na margem direita. Segundo Rossetti et.al. (2019), é possível identificar através de morfoestruturas e mudanças do padrão

de vegetação, a movimentação transcorrente de blocos na região da margem esquerda do arquipélago de Mariuá, à montante da foz do rio Branco. Essas movimentações sinistrais chegam a deslocar paleovales fluviais próximo a foz do rio Demini, margem esquerda do rio Negro.

A jusante da foz do Branco, através de um estudo dos perfis longitudinais dos rios da margem direita do rio Negro e a correlação espacial de *Knickpoints*, Alves et.al. (2020), mostram um evidente controle tectônico de falhas que truncam obliquamente seis rios tributários e que se estende até a altura do arquipélago de Anavilhanas. Também mostra evidências de deslocamentos de blocos e vales fluviais a montante do rio Branco, além de outros lineamentos.

A região do arquipélago de Anavilhanas apresenta um forte lineamento estrutural, marcado pela margem direita do Negro na região do arquipélago, passando por mudanças na forma do canal dos rios, também da margem direita, Padauari, Carabinani, Jaú, Unini e Caurés, como demonstram Forsberg (2000), Latrubesse & Franzinelli (2005), Almeida & Miranda (2007), na direção NW-SE. Para Almeida & Miranda (2007), esse lineamento é resultado de uma modificação neotectônica neógeno – quaternária, que possibilitou a inversão de drenagens, que anteriormente escoavam no sentido N-S, para o sentido E-W ou SW-NE, e ainda uma mega captura de drenagem desse sistema, possibilitando assim a atual morfologia do baixo rio Negro e a deposição dos sedimentos que originam o arquipélago de Anavilhanas.

Alves *et. al.* (2020) realiza uma análise dos rios de ambas as margens do rio Negro, na região do arquipélago de Mariuá até a jusante da confluência com o rio Branco, utilizando para tal, os perfis longitudinais desses rios extraídos através do MDE do SRTM para detectar knickpoints associados a esses rios.

Na margem direita, é identificado um importante lineamento morfoestrutural, que se estende por aproximadamente 300 km, marcado por sucessivos knickpoints dos rios Cuiuni, Caurés, Unini, Jaú, Carabinani e Umanapana. Já na margem esquerda, são destacados dois lineamentos a montante da confluência, marcadas também por alinhamentos de quebras de drenagens dos rios Preto, Padauari, Curuduri, Araçá e Jufari, o que mostra o claro controle tectônico dos rios da região, e sua influência na evolução do relevo.

2.4 Geomorfologia da Área

As características geomorfológicas da região da confluência entre os rios Branco e Negro estão associadas a três domínios: embasamento cristalino e coberturas fanerozóicas (CPRM. 2003). A paisagem varia desde planícies de inundação, várzeas e terraços fluviais até

tabuleiros de terra firme, com uma extensa rede de drenagem e interflúvios. A origem dessa paisagem remonta à formação da bacia sedimentar do Amazonas, que ocorreu após o fraturamento do cráton amazônico no período Paleozóico (REIS *et.al.*, 2006).

Ao longo do tempo geológico, essa paisagem foi modificada. Estudos realizados por Horbe et al. (1997) mostram um período de intenso intemperismo nos terrenos amazônicos durante os períodos Paleógeno e Neógeno. Isso resultou em diferentes fases de intemperismo e formação de perfis de solo, crostas lateríticas, linhas de pedra e depósitos relacionados à lixiviação e concentração de elementos nos perfis de solo. Essas informações ajudam a entender a ampla distribuição dos tabuleiros interfluviais na região amazônica.

O primeiro compartimento é a Planície Amazônica, de extensões quilométricas, ocorrem ao longo dos rios da bacia hidrográfica do Amazonas, e são associadas aos depósitos sedimentares atuais – os terraços fluviais. Os rios desse compartimento são predominantemente meandrinos, e apresentam formas deposicionais variadas, como barras em pontal, furos, barras de acreção, diques marginais, ilhas, entre outras (LATRUBESSE & FRANZINELLI, 2002).

É seguido pelos Tabuleiros da Amazônia Centro – Ocidental, sendo o domínio que possui a maior área na região amazônica, no qual é caracterizado por extensos tabuleiros dissecados por rios de tamanhos variados, que provocam incisões neste relevo, gerando vales em V, e com padrões de drenagem que por vezes denunciam a atividade neotectônica da região (STERNBERG, 1950).

O último domínio que ocorre na região da confluência é descrito como Superfícies Aplainadas do Norte da Amazônia, localizado no sul de Roraima e norte e nordeste do Amazonas, e está relacionado a terrenos ígneos e metamórficos do escudo das guianas, aplainados através de eventos erosivos, apresentando relevos residuais – *inselbergs* – que ainda perduram na paisagem (MAIA *et. al.*, 2008).

Na região de Roraima, Cremon (2016) descreve a geomorfologia da bacia do rio Branco, onde descreve na região da confluência (baixo rio Branco) três domínios geomorfológicos (Figura 5):

- A planície aluvial inferior, até 4 metros acima do nível d'água em épocas de seca, onde ocorre nas duas margens do rio Branco, sendo o maior domínio em área relativa, variando de 3 a 7 km de largura;
- A planície aluvial superior, na faixa de 4 a 6 metros acima do nível d'água em épocas de estiagem, localizado em áreas marginais a planície aluvial inferior,

com áreas bastante expressivas na região da foz do Branco e a jusante da confluência com o Negro;

- O embasamento sedimentar, correspondente a Formação Içá e aos sedimentos quaternários do rio Branco

As ilhas fluviais, alongadas e paralelas as margens do canal, estando a até 3 metros do nível d'água em épocas de estiagem.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os estudos geomorfológicos dão base para o entendimento da superfície do planeta (CASSETI, 2005), e para o melhor entendimento, é necessário que se façam algumas definições, nessa área de estudo.

3.1 Geomorfologia

O conceito de geomorfologia pode ser abordado de diversas formas, mas sempre com o enfoque do estudo da superfície do planeta. Entende – se geomorfologia, segundo Casseti (2005), como um subsídio para a apropriação racional do relevo, com o objetivo de analisar a superfície da crosta terrestre, sistematizando a análise de mecanismos endógenos que promovem a elevação ou subsidência do relevo, sendo associada aos movimentos tectônicos ou compensações isostáticas e processos exógenos, promovidos pela ação de agentes atmosféricos, biológicos e suas derivações para entender as formas resultantes.

Para estas análises, as técnicas geomorfológicas abrangem as descrições das feições geomorfológicas através das litologias, estruturas, drenagem e condições climáticas. Desta forma, segundo Arcanjo (2011), o entendimento do relevo tem em sua totalidade uma dependência íntima com a geologia, abrangendo assim três grandes categorias de gênese do relevo:

- Unidades Geotexturais: Associadas as maiores unidades da superfície terrestre, como continentes e depressões oceânicas.
- Unidades Morfoestruturais: Elementos de ordem média, como cadeias de montanhas, planaltos, depressões
- Unidades Morfoesculturais: Relacionados aos sistemas morfogenéticos, como vales, planícies de inundação, escarpas, morrotes e dunas.

Ab'Saber (1969), classifica os estudos geomorfológicos em três campos: a compartimentação geomorfológica, que compreende a análise topográfica e de feições do relevo, a estrutura superficial, associados a depósitos com o objetivo de uma reconstrução histórica superficial da área estudada e por fim, a fisiologia da paisagem, que busca entender os processos de modelamento do terreno que ocorrem atualmente.

Desta forma, a geomorfologia assume um importante papel no contexto geográfico e geológico.

3.2 Geomorfologia Fluvial

A geomorfologia fluvial compreende a parte da geomorfologia que se dedica ao estudo dos corpos hídricos. A definição de rio pode ser entendida como qualquer fluxo superficial acanalado, e o termo proveniente do latim *fluvius*, que significa rio, esta área da geomorfologia busca entender as interações e processos que ocorrem entre os rios, ao longo de dimensões espaciais e temporais, em diferentes escalas, e fatores onde sua interrelação forma assim, um sistema fluvial (CHARLTON, 2007).

Tendo isso em vista, é necessário também entender que a geomorfologia fluvial precisa de escalas temporais e espaciais para a análise de um sistema fluvial. Desta forma, tem – se processos e as variáveis fluviais hierarquizam – se, ao passo que na medida que há uma formação de um perfil longitudinal de um rio (o processo que demanda a maior escala de tempo), vários outros processos surgem e desaparecem do sistema (STEVAUX & LATRUBESSE, 2017).

Assim, de acordo com Schum e Lichy (1965), pode – se classificar a escala temporal de um rio em eventos de quatro tipos:

- Tempo cíclico, associados a grandes modificações do relevo, como aplainamentos e definições de perfis longitudinais, na ordem de 10^6 - 10^7 anos;
- Tempo dinâmico, associado a definição do perfil longitudinal e estabilidade do sistema fluvial, na ordem de 10 – 10^5 anos;
- Tempo estável, onde hierarquias fluviais são definidas, os gradientes de trechos são formados e podem ser definidos os comprimentos de onda dos meandros, na ordem de 10^2 – 10^3 anos;
- Tempo Instantâneo, predominando os processos climáticos, definição de leitos, modificações nas relações de largura e profundidade além das definições de formas de leito, que pode ocorrer na ordem de 10^{-1} – 10^1 anos.

O principal motor de geração desses eventos e manutenção dos processos estudados na geomorfologia fluvial provêm da dinâmica da água na superfície terrestre, amplamente conhecida como o ciclo hidrológico. A aplicação dos conceitos do ciclo hidrológico pode ser feita nas mais diversas escalas, onde as maiores estão relacionadas ao balanço hídrico.

O balanço hídrico é então, segundo Stevaux & Latrubesse (2017), a principal ferramenta no estudo de bacias hidrográficas e por consequência, o gerenciamento dos grandes rios associados a elas, com fim de gerenciamento urbano e territorial. Leva em conta fatores

como precipitação, interceptação, evaporação, infiltração e escoamento da água ao longo de uma bacia hidrográfica ou uma área pré-definida.

Um rio essencialmente está ligado ao escoamento da água pela rede de drenagem de uma bacia (CHARLTON, 2007). O ciclo hidrológico comanda esses fatores, com a relação diretamente proporcional entre a quantidade de água precipitada e o volume de água escoada, levando em consideração os fluxos de subsuperfície e a água evaporada. Esse fluxo pode ser monitorado por cálculos de vazão de um rio em um determinado ponto e é realizado através do hidrograma, um gráfico que relaciona os valores da descarga ao longo do tempo (STEVAUX & LATRUBESSE, 2017).

O fluido então, em uma superfície e condicionado a qualquer pedante é sujeito as ações da força gravitacional e tende a movimentação. Essa movimentação ocorre por meio de fluxos de dois tipos principais:

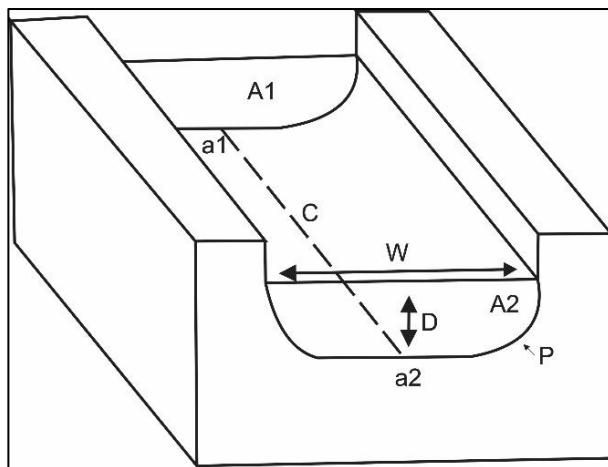
- Fluxo Laminar: Ocorre em condições muito específicas e de baixa velocidade, geralmente associados aos limites de paredes de canais, de forma que o fluxo se apresenta na forma de lâmina de igual velocidade, com uma direção e sentido uniforme ao longo do corpo d'água ou em parte dele (CENGEL & CIMBALA, 2015).
- Fluxo Turbulento: Associado a velocidades que alcançam o valor crítico, onde há o rompimento das lâminas d'água em um fluxo caótico, com vórtices e movimentos irregulares. É o tipo de fluxo mais comum e abrangente na natureza, e é afetado pela profundidade do canal, a densidade e viscosidade da água, a rugosidade do leito e a temperatura (CENGEL & CIMBALA, 2015).

A distribuição do fluxo em um canal é variável e pode alterar sua direção, sentido e velocidade a depender da coluna d'água, seção transversal, perfil longitudinal e do tempo de descarga. Essa distribuição relaciona variáveis geométricas de canais fluviais como a área da seção transversal a ser medida, o perímetro úmido e o raio hidráulico (figura 7). Uma seção transversal é entendida como uma linha imaginária que intersecta um plano vertical de um vale do rio, perpendicular ao seu leito (FERNANDEZ, 2004).

Além de variáveis como largura e profundidade do canal, ainda pode -se levar em consideração a declividade da superfície da água e a declividade de fundo. Em uma seção transversal, o perímetro molhado é a extensão da seção ocupada pela água, já o raio hidráulico é uma relação entre a área da seção transversal pelo perímetro molhado, de forma que canais que tenham a mesma área de seção transversal podem apresentar raios hidráulicos distintos

(CRISTOFOLETTI, 1974), tendo uma relação inversamente proporcional com região de contato da água com o canal (Figura 8).

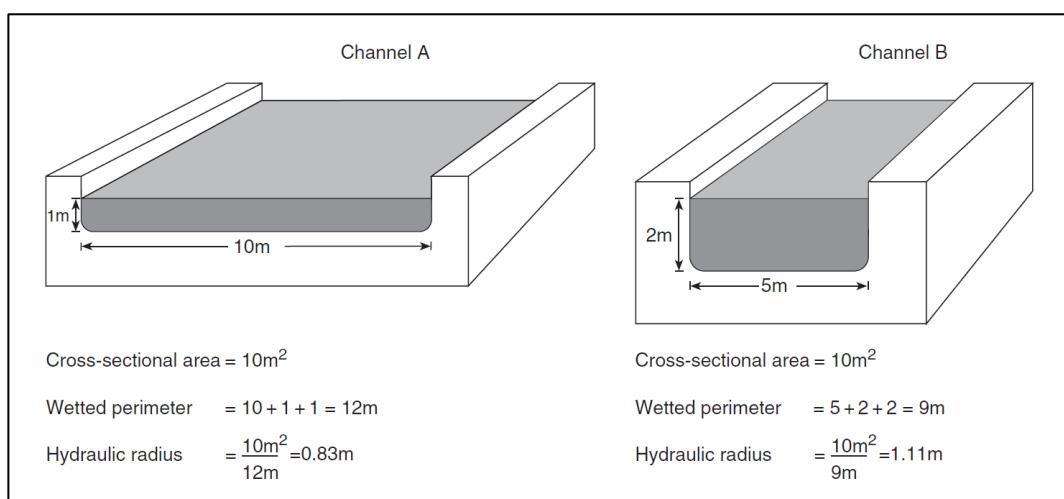
Figura 7 - Esquema relacionando os parâmetros morfométricos de um canal fluvial



Fonte: Adaptado de Cristofoletti (1974).

Nota: A largura (W) e a profundidade (D) relacionam se diretamente com a área da seção transversal do rio (A1 e A2), enquanto o comprimento da linha que assinala o nível d'água e o leito é o perímetro molhado. A/P corresponde ao raio hidráulico e a declividade é dada pela diferença altimétrica entre os pontos a1 e a2

Figura 8 - Relações métricas de canais fluviais



Fonte: Charlton (2007).

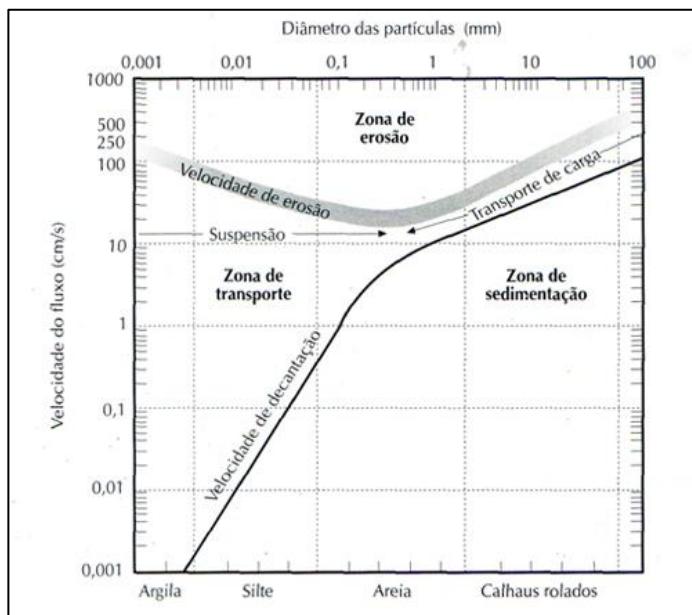
A dinâmica hidrológica fluvial acumula energia potencial, hidrostática, cinética, aumentando a potência de canal, e aumentando a capacidade de realização de trabalho pelo fluido, o que culmina em processos erosivos das paredes do canal, seja de material inconsolidado das margens ou as rochas consolidadas dos leitos. Esses processos estão relacionados remoção, transporte e deposição de material de forma simultânea, variando sua

intensidade ao longo do tempo e da extensão do canal, e resultam em um produto sedimentar que integra o sistema fluvial na forma de carga sedimentar.

A erosão em um sistema fluvial ocorre em duas formas: a erosão química, caracterizada pela dissolução pela água de minerais da rocha do leito ou do solo, que são sensíveis ao pH da água, e a erosão física, caracterizada pela remoção de partículas por ação da água corrente, associada a erodibilidade do material e erosividade do fluxo (Stevaux & Latrubesse, 2017).

Um importante fator neste tipo de erosão é a velocidade crítica de erosão, que remete a velocidade de fluxo mínima necessária para a remoção de uma partícula do meio, descritas no gráfico de Hjulström (Figura 9) em 1935 (BOGGS, 2014; GARCIA, 2008; JULIEN, 2010), que relaciona a velocidade e o tamanho da partícula a ser removida.

Figura 9 - Gráfico de Hjulström



Fonte: Adaptado de Hjulström em 1935 (BOGGS, 2014; GARCIA, 2008; JULIEN, 2010)., TEIXEIRA, 2009

Nota: Relaciona a velocidade do fluxo com o poder de erosão de partículas a depender do seu tamanho.

O transporte de partículas ao longo do canal fluvial não é constante, onde a mesma partícula pode ser erodida, transportada, e depositada diversas vezes. Ao longo do trajeto, o rio apenas realiza a transferência de matéria de ambientes mais energéticos para ambientes menos energéticos (TEIXEIRA, 2009). Quando tratamos de partículas sólidas, o transporte está relacionado a:

Carga sedimentar suspensa, composta por grãos de silte a argila e permanece em suspensão enquanto houver fluxo, depositando-se somente em ambientes estacionários. Ela

influencia a morfologia do canal, o padrão de migração do canal, a planície de inundação e a biota, que está relacionada à turbidez.

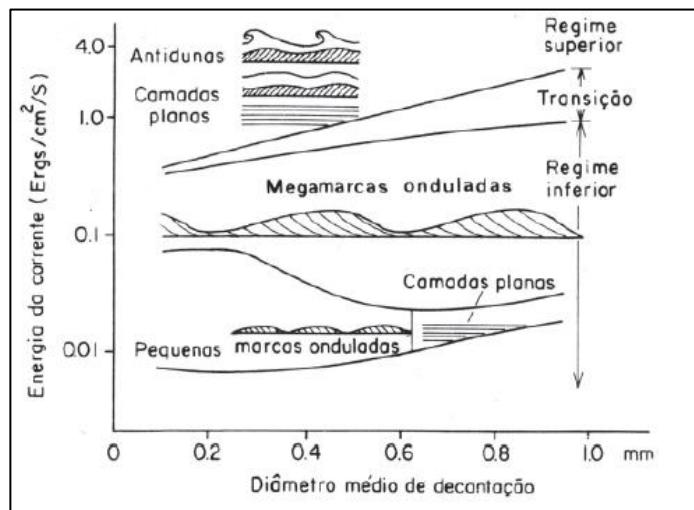
Carga de fundo, associada ao material inconsolidado transportado pelo fundo do canal do rio através de arrasto, rolamento e saltação, em diferentes granulometrias acima do tamanho silte. Esse sedimento é transportado em velocidade inferior à do fluxo do rio, em movimentações breves e alternadas, pois as partículas não conseguem se manter em suspensão (CHIEN, 1999).

A principal forma de introdução da carga sedimentar em rios de características aluviais são os movimentos de massa, onde a água possui um papel atuante na saturação do solo e como lubrificante das partículas, facilitando assim o movimento por ação da gravidade. Na região amazônica, um dos principais processos associados ao movimento de massa é o fenômeno das terras caídas (MAGALHÃES et.al., 2018), que gera não só uma alta carga de fundo como também muitas partículas em suspensão.

As partículas transportadas na carga de fundo, segundo Stevaux & Latrubesse (2017), se agrupam e se desenvolvem em formas de leito, caracterizados por amontoados geométricos tridimensionais geralmente associados a partículas de tamanho areia, modificando a morfologia do fundo do canal de acordo com as características de fluxo, tendo em vista a redução da rugosidade. Estão associadas a (Figura 10):

- Ondulações – pequenas formas de leito com até 0,04m de altura e 0,6m de comprimento, desenvolvendo – se em fluxo inferior;
- Leito plano de regime inferior – formas planas geradas em leitos com fluxos rugosos e alturas equivalentes as dos grãos associados;
- Dunas – Formas mais comuns associadas ao transporte de material arenoso, originando – se em regime de fluxo rugoso e em condições de fluxo inferior;
- Leito plano de regime superior – Se desenvolvem em transições de regimes de fluxo inferior para superior, modificando dunas e ondulações em leitos planos;
- Antidunas – formas senoides de baixa amplitude que ocorrem em fase com a superfície da água em regimes de fluxo superior.

Figura 10 - Gráfico de relação das formas de leito com a energia de fluxo correspondente.



Fonte: Mendes (1984).

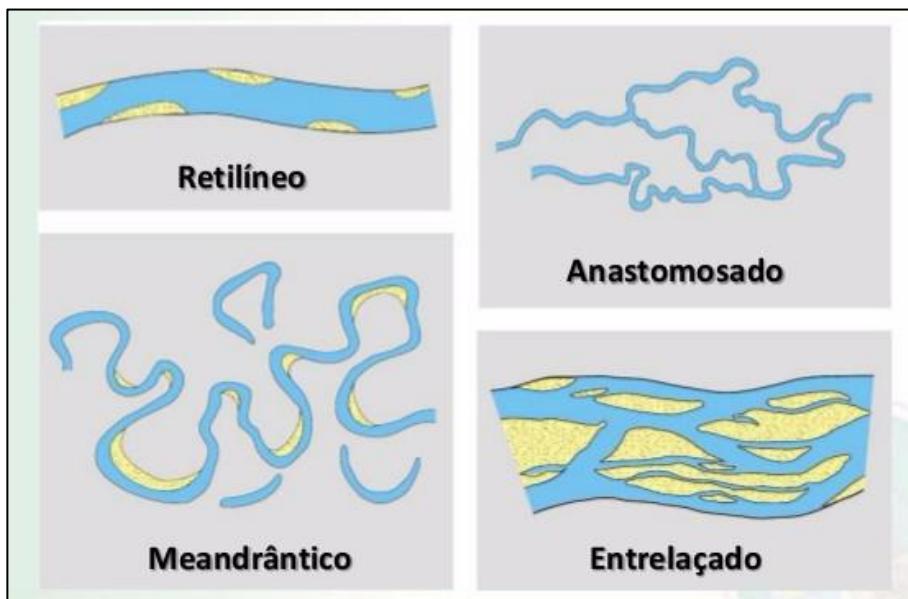
O tamanho e a quantidade de partículas que um rio pode transportar define a energia do canal (*stream power*), que está diretamente ligada à sua competência, que pode variar temporal e espacialmente ao longo do rio (STEVAUX & LATRUBESSE, 2017). Dentro dos processos fluviais, o transporte também ocorre em intermitência com eventuais deposições, sempre ligadas as relações de velocidade do fluxo e velocidade crítica de transporte de partículas. Quando ocorre a sedimentação, formam – se os depósitos fluviais, que podem ser de diversos tipos e origens como (MENDES, 1984):

- Ondas de areia – Diferentes das dunas, as ondas de areia são depósitos associados a megaeventos de cheia, com superposição de sequencias de dunas, estacionárias e que podem ser eventualmente erodidas posteriormente pelo rio.
- Barras arenosas – Formas de fundo de canal que emergem a superficie ou encontram – se parcialmente submersa, sendo classificadas como centrais, laterais, de desembocadura e de pontal
- Ilhas – Formas povoadas ou vegetadas, estáveis e que dividem o fluxo fluvial até o nível de margens plenas (nível de descarga que preenche todo o canal sem que ocorra o transbordamento) podendo ser unitárias ou compostas, comumente associadas a rios multicanais.

Como resultado direto das alternâncias entre transporte e deposição ao longo do tempo, o rio passa por um ajuste do seu canal, que tem como premissa a otimização da energia disponível para o escoamento da água. Esse ajuste gera então diferentes tipos e padrões de canais fluviais, que podem ser classificados como retilíneos, meandrante, entrelaçado ou multicanal (Figura 11) e é condicionado as variáveis de tipo e quantidade de carga sedimentar, que também é ligado ao *stream power* do rio (SCHUM, 1985) (VAN DEN BERG, 1995).

- Meandrante – Canais sinuosos, associados a evolução de meandros ligados a uma reordenação de um canal anteriormente retilíneo com fluxo turbulento em um fluxo helicoidal, gerando uma margem concava que é erodida e outra convexa a jusante, onde se concentram os sedimentos erodidos a montante, com uma acresção lateral formando uma barra em pontal. Estão classificados em regulares, irregulares e tortuosos.
- Entrelaçado – Canal largo, relativamente retilíneo onde a água escola por pequenos canais rasos e curtos separados por barras arenosas e cascalhosas que se modificam constantemente com o tempo, e que podem ou não ter uma vegetação rasa associada. Possuem carga de fundo abundante, margens altamente erodíveis, com descarga variável e um gradiente pronunciado, geralmente associados a rios com alta energia e de ambientes áridos.
- Multicanal – Canais interdependentes separados por ilhas fluviais vegetadas e estáveis, podendo permanecer no sistema por milhares de anos, pertencem ao nível d'água de margens plenas, sem ainda uma classificação definida (MILLAR, 2000).

Figura 11 - Padrões de canais fluviais.

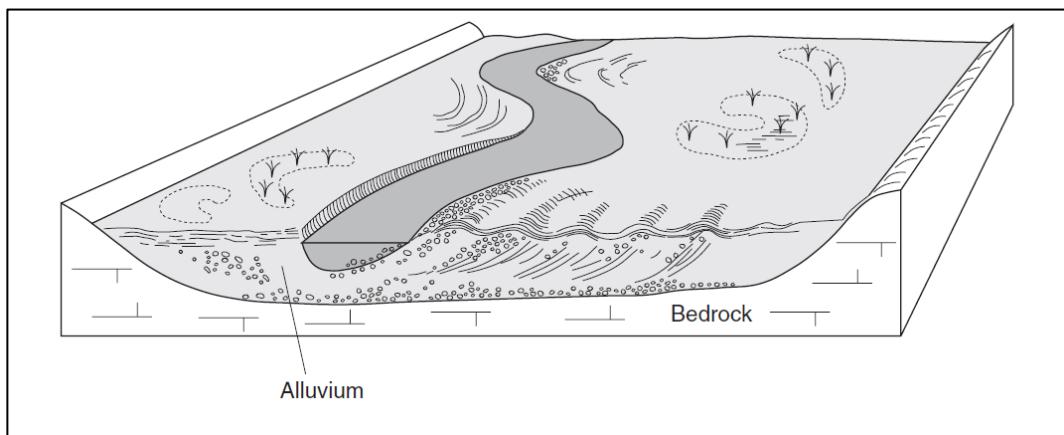


Fonte: Cristofolletti (1981).

Por fim, uma parte importante na morfologia fluvial é a planície de inundação, cuja definição está descrita como áreas adjacentes ao canal fluvial que são eventualmente inundadas e possuem uma intrínseca relação com a dinâmica hidrológica, sedimentológica e ecológica do rio. É a região que melhor preserva depósitos, estruturas e fósseis, além de ser a melhor área para as análises cronológicas de um rio (CHARLTON, 2007).

A morfologia da planície de inundação é bastante particular, sendo em sua maioria associada ao cinturão aluvial, onde se encontram os diques marginais e os canais e leques de rompimento. Além do cinturão, também ocorre a bacia de inundação, onde ocorrem lagos, lagoas e pântanos fluviais, além de canais de planície de inundação (CHARLTON, 2007), (figura 12).

Figura 12 - Morfologia fluvial, onde se encontram os depósitos aluviais e a planície de inundaçāo.



Fonte: Charlton (2007).

3.2.1 Índices de Drenagem

A análise da morfometria de uma região hidrográfica envolve o uso de índices e relações lineares para avaliar características como tamanho, forma, inclinação, densidade de drenagem e elevação. Os índices incluem a área de drenagem, o comprimento do canal principal, o perímetro da bacia, a razão de forma e a inclinação média. Já as relações lineares envolvem a relação entre a área de drenagem e a vazão média anual, a relação entre a inclinação média e a densidade de drenagem e a relação entre a área de drenagem e o comprimento do canal principal (CHRISTOFOLLETI, 1980).

Dentre os vários índices e relações espaciais que se pode calcular a respeito de uma bacia de drenagem, destacam-se:

- Densidade Hidrográfica: relaciona o número de rios e a área da bacia, que implica na capacidade de geração de novos cursos d'água

$$Dh = N / A$$

Dh → Densidade hidrográfica;

N → Número total de rios;

A → Área da bacia.

- Densidade de Drenagem: relaciona o comprimento dos canais com a área, e reflete a capacidade de infiltração do terreno.

$$Dd = Lt / A$$

Dd → densidade de drenagem;

Lt → comprimento total dos canais;

A → Área da bacia.

- Amplitude Altimétrica: É a diferença do ponto mais alto da região ao ponto mais baixo, mostrando a variação de altitude, e é calculada a partir de um modelo digital de elevação.

$$Hm = H_{max} - H_{min}$$

Hm → Amplitude altimetrica;
Hmax → Altitude máxima;
Hmin → Altitude mínima.

- Índice de Rugosidade: Produto entre a densidade da drenagem e a amplitude da região, refletindo a declividade com o comprimento dos canais. O número indica o grau de dissecação do relevo.

$$Ir = Hm \cdot Dd$$

Ir → Índice de Rugosidade
Hm → Amplitude Altimétrica Máxima da Bacia
Dd → Densidade de Drenagem

- Razão de Textura: Quociente entre o número de canais e o perímetro da área, e reflete também o grau de dissecação do terreno entre grosseira($T < 2,5$), média ($2,6 < T < 6,2$) e fina ($T > 6,2$)

$$T = N/P$$

T → Relação textura
N → Número de rios
P → Perímetro

3.2.2 Anomalias de Drenagem

Christofolletti (1980) define os padrões de drenagem como o arranjo espacial dos canais que formam uma rede em uma determinada área. Esses padrões são geralmente influenciados por características intrínsecas do ambiente, como linhas de falhas, substrato litológico, clima e relevo, e são resultado de forças internas e externas à crosta terrestre. A análise dos padrões de drenagem pode fornecer informações importantes sobre a história geológica e evolução da paisagem de uma região.

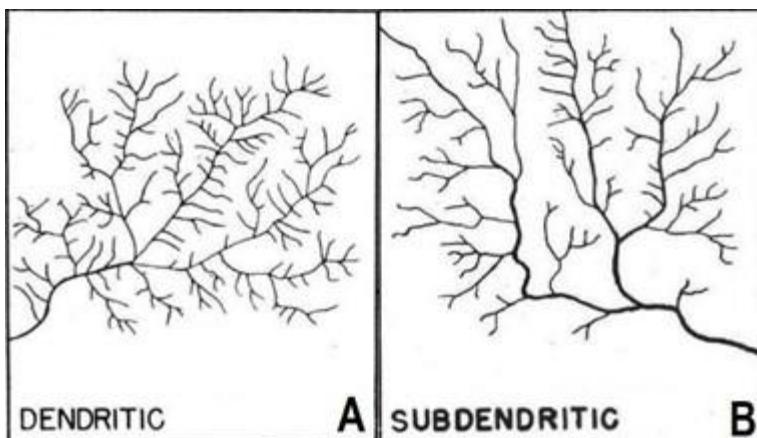
3.2.2.1 Padrões Dendrítico e Subdendrítico

O padrão de drenagem dendrítico é o arranjo espacial de canais que se ramificam como uma árvore, onde o canal principal corresponde ao tronco e os tributários se assemelham aos ramos irregulares. Normalmente, é formado por canais sem proeminência de controle estrutural, e é comum em paisagens com rochas sedimentares de resistência homogênea ou rochas metamórficas com diferenças originais na dureza eliminadas pela ação metamórfica. Variações em critérios como controle por inclinação e evidências de paralelismo em alguns tributários levaram à subclasses deste tipo básico, como subdendrítico e pinado. O padrão dendrítico é comum na paisagem (PARVIS, 1950).

O padrão de drenagem subdendrítico é uma variação do padrão dendrítico, que surge em áreas onde os canais já foram muito controlados pela inclinação, mas à medida que a dissecação avança, o controle se torna menos pronunciado. Os tributários menores adquirem

maior liberdade para fluir em direções diversas, o que leva a um padrão de drenagem semelhante ao dendrítico. No entanto, a origem dos principais cursos d'água continua a se manifestar, tornando-se mais evidente em comparação com o dendrítico (ZERNITZ, 1932).

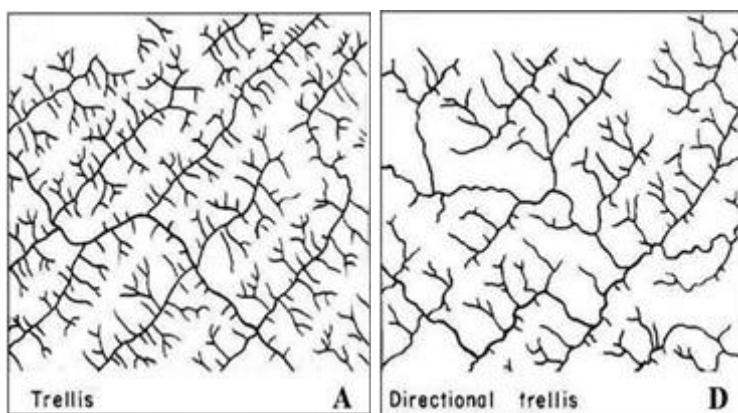
Figura 13 - Padrões comuns de drenagem



Fonte: (CRISTOFOLETTI, 1980)

3.2.2.2 *Padrões Treliça e Treliça Direcional*

Figura 14 - Padrões paralelos de drenagem



Fonte: (CRISTOFOLETTI, 1980)

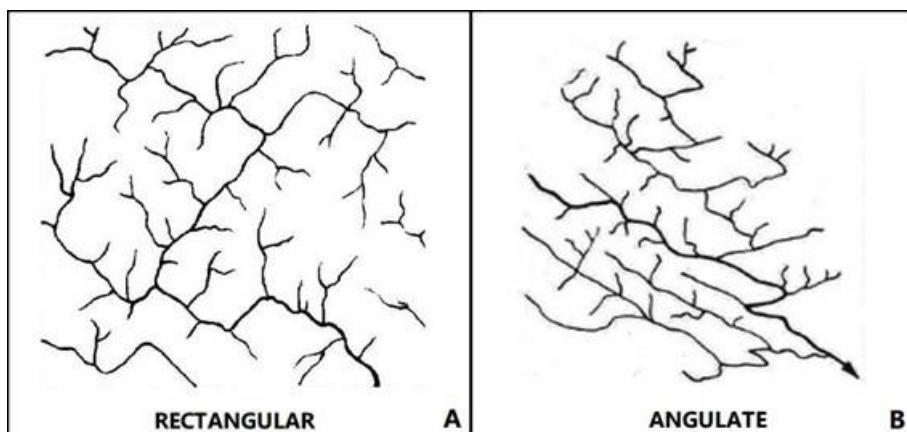
O padrão de drenagem em treliça é caracterizado pela presença de afluentes secundários paralelos ao curso principal ou a outro curso no qual os afluentes primários fluem. Esse tipo de drenagem é caracterizado por confluências que se unem em ângulos retos Zernitz (1932). O controle estrutural sobre esse padrão de drenagem destaca-se devido à resistência desigual das camadas inclinadas, emergindo em faixas estreitas e paralelas, e ao entalhe dos afluentes sobre rochas mais frágeis, promovendo a formação de cristas com camadas mais resistentes. Os padrões em treliça desenvolvem-se em onde há uma série de fraturas ou dobramentos paralelos (HOWARD 1967).

O padrão de drenagem em treliça direcional é uma modificação do padrão em treliça onde os afluentes de longas correntes subsequentes são consistentemente mais longos de um lado do vale do que do outro. Este padrão é comumente encontrado em áreas de camadas homoclinais com inclinação suave, mas também ocorre em encostas suaves com cristas de praia paralelas.

3.2.2.3 Padrões Retangular e Angular

O padrão de drenagem retangular é caracterizado por curvas abruptas em ângulo reto na corrente principal e em seus tributários, sendo mais irregular do que o padrão treliça. Esse padrão é diretamente condicionado pela influência de falhas, embora em algumas ocasiões possa estar relacionado à composição das camadas horizontais. Já o padrão angular é uma modificação do padrão retangular, com junções formando ângulos agudos ou obtusos em vez de ângulos retos (ZERNITZ, 1932; PARVIS, 1950).

Figura 15 Padrões angulares de drenagem

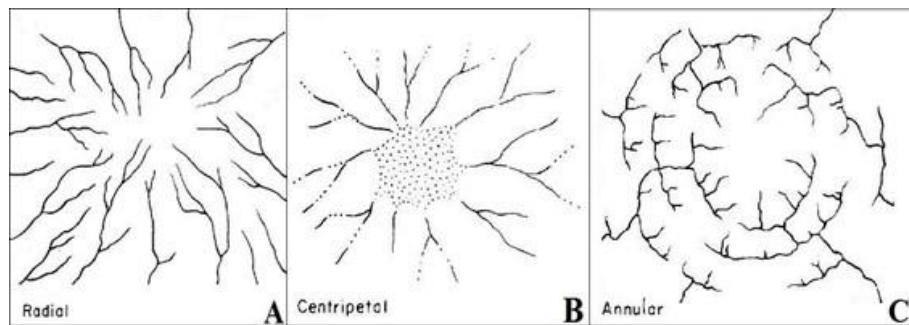


Fonte: (CRISTOFOLETTI, 1980)

3.2.2.4 Padrões Radiais, Centrípetos e Anelares

O padrão de drenagem radial é caracterizado por canais que se organizam como os raios de uma roda e é encontrado em vulcões e outras bacias hidrográficas com cabeceiras em uma área central (HORTON, 1945). Já o padrão centrípeto é uma modificação do padrão radial, com fluxos que fluem para dentro em direção a uma depressão central e geralmente está associado a crateras e caldeiras (HOWARD, 1967).

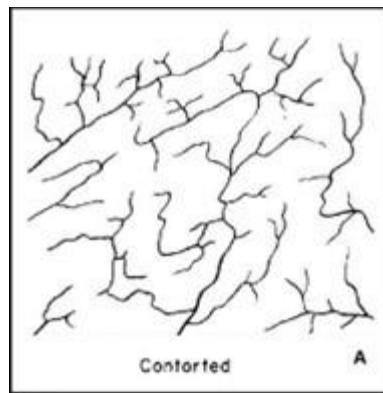
Figura 16 - Padrões circulares de drenagem



Fonte: (CRISTOFOLLETTI, 1980)

3.2.2.5 Padrões Contorcidos

Figura 17 - Padrão contorcido de drenagem



Fonte: (CRISTOFOLLETTI, 1980)

O padrão de drenagem contorcido é uma resposta à estrutura da rocha (PARVIS, 1950), em que o fluxo pode ser completamente revertido ao encontrar rochas resistentes. Esse padrão se forma principalmente em rochas metamórficas contorcidas e de camadas grosseiras, e difere da treliça recurvada por ter falta de ordem regional em escala geralmente menor (HOWARD, 1967).

A drenagem é um processo essencial para a manutenção do equilíbrio natural das bacias hidrográficas. Diversos fatores influenciam a formação dos padrões de drenagem, incluindo a topografia, o clima, a geologia e a tectônica. A estruturação geológica da área é um dos principais fatores que influenciam a formação dos padrões de drenagem.

Os padrões drenagem menos comuns são explorados por diversos autores que buscam compreender a dinâmica da formação das bacias hidrográficas. A análise dos padrões de drenagem pode fornecer informações importantes sobre a estruturação geológica da área, como a presença de falhas, diques, veios e outras estruturas geológicas, em diferentes escalas.

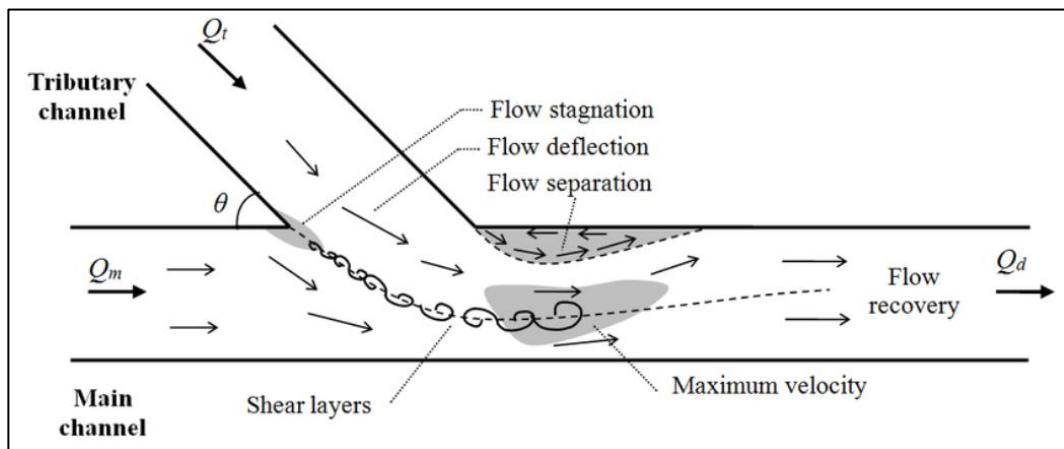
3.3 Confluências Fluviais

As confluências podem ser definidas como áreas de junção de dois canais quaisquer, onde ocorrem interações hidráulicas, sedimentares e energéticas (STEVAUX & LATRUBESSE, 2017). São afetadas por fatores associados a magnitude dos canais, carga transportada, regime de descarga, a geometria da confluência e a história associada.

Sendo assim, as confluências são objeto de estudo a fim de caracterizar os fenômenos que ocorrem nessas áreas, e que são importantíssimos para a formação e modificação do canal. Mosley (1976) e Best (1987) definem em seus trabalhos sete zonas de fluxo que ocorrem em uma área de confluência, produto da interação hidráulica entre os dois canais que se encontram (figura 18):

- Zona de estagnação de fluxo – a estagnação está ligada ao fenômeno de deflexão dos fluxos, que gera a diminuição da velocidade do fluxo e o aumento da pressão e profundidade;
- Zona de separação – As mudanças na direção do fluxo estão associadas a esta zona, que atua nas relações de largura do canal após a junção dos fluxos, e está relacionada ao ângulo de confluência e a razão entre a descarga do afluente;
- Zona de máxima velocidade – Combinação dos fluxos após a zona de separação, consequência do aumento da descarga associada a constrição causada pela zona de separação de fluxo, aumentando a velocidade;
- Zona de cisalhamento – formada ao longo do contado com áreas de fluxo estagnado, gerando intensa turbulência, aumentando o poder do fluxo de misturar e transportar os sedimentos;
- Zona de fluxo helicoidal – Associada a mudanças de direção dos vetores das linhas de fluxo
- Zona de ressurgência – Geradas por distorções nas zonas de cisalhamento resultantes de interações com a topografia do leito do canal, e atua na mistura de fluidos e até na remoção e transporte de sedimentos
- Zona de recuperação – A zona mais a jusante da confluência, com a recuperação e estabilidade dos fluxos pós junção pela confluência, porém ainda podem permanecer separados por distâncias variáveis.

Figura 18 - Esquema de distribuição de fluxos em regiões de confluência



Fonte: Best, 1987.

As relações de predominância de fluxo podem ser descritas pela equação da razão de momento de uma confluência a seguir:

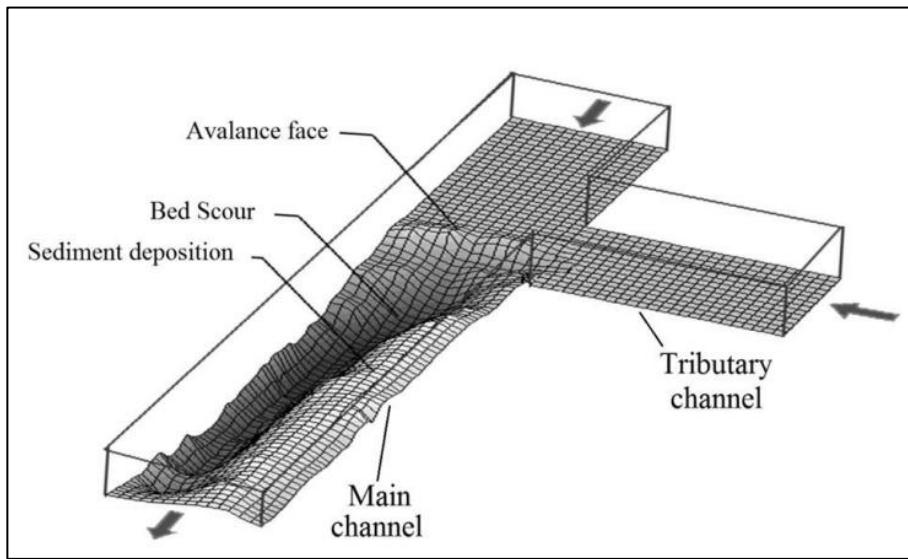
$$Qr = Qt/Qm$$

Caso $Qr < 1$ o domínio da confluência é do canal principal, porém se $Qr > 1$, o tributário domina o rio principal nos processos da confluência, onde Q é a descarga.

Além das características e relações hidráulicas de uma zona de confluência, é importante salientar que essas mudanças no fluxo também provocam alterações na topografia do leito, que responde em cinco morfologias (BEST & ROADS, 2008) que podem ocorrer a depender da intensidade dos processos hidrodinâmicos atuantes e predominantes, do ângulo de confluência e das dimensões dos canais associados (Figura 19).

- Poço de escavação (Scour hole) – É formado na bissetriz do ângulo de confluência pela zona de máxima velocidade
- Barra de tributário – Associada ao acúmulo de partículas na foz de um ou ambos os canais
- Barra central – Ocorre após a zona do poço de escavação, geralmente associadas a confluências simétricas em rios entrelaçados
- Barra de separação – Possui uma relação direta a zona de separação de fluxo e é formada principalmente em eventos de cheia
- Região de acúmulo de sedimento – Ocorre a montante da confluência, geralmente associada a sedimentos finos e a fluxos de direções opostas.

Figura 19 - Relações morfobatimétricas de regiões de confluências



Fonte: Best, 1987.

3.4 Geologia Estrutural

Os esforços tectônicos são amplamente conhecidos por serem um dos principais processos endógenos de modelação do terreno. Desde bacias sedimentares intercontinentais e oceânicas até orógenos, basicamente todas as grandes unidades e relevo do planeta são resultados diretos ou indiretos da movimentação das placas tectônicas, segundo Teixeira (2009).

Desta forma, como processos fluviais estão em escalas de tempo muito curtas em relação ao tempo geológico (STEVAUX & LATRUBESSE, 2017), presume – se que os esforços neotectônicos podem ter uma contribuição ativa na história geológica de rios do mundo todo, atuando principalmente nas relações de morfologia de canal e padrões de rede de drenagem.

É importante salientar que tanto rios antigos como os rios mais novos também podem se aproveitar de estruturas mais antigas para o ajuste do seu curso, por isso a inferência de atividade neotectônica em redes de drenagens ou até mesmo ao longo de um canal fluvial precisa ser muito bem aferida devido as implicações dessa inferência.

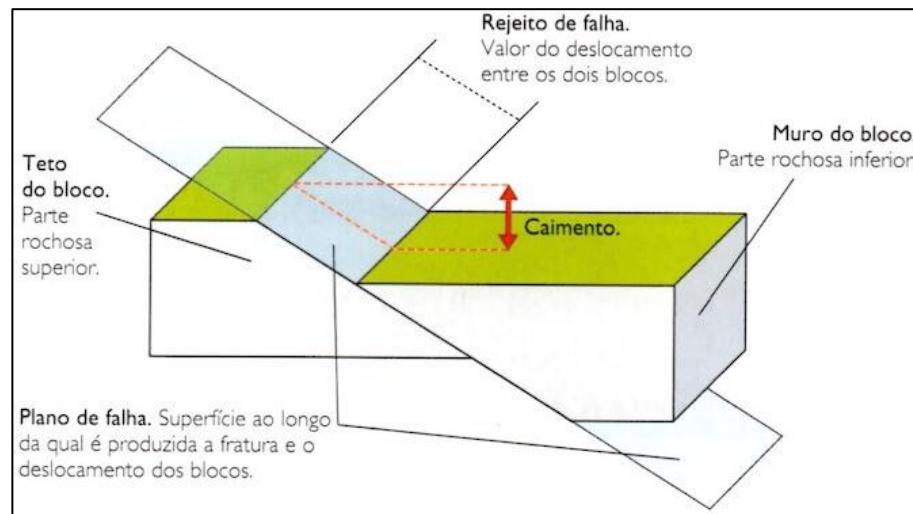
Dividindo sua importância com mudanças climáticas, a neotectônica possui uma ativa e intensa ação na modificação dos sistemas fluviais brasileiros, e principalmente na bacia amazônica, mudando a direção de cursos d'água, gerando represamento e formação de lagos, aumentando ou diminuindo a largura de canais ou até mesmo capturando drenagens, como mostram Caputo & Soares (2016), Latrubesse *et.al.* (2010), Costa *et.al.* (2001), Silva *et.al.* (2007).

Os principais produtos neotectônicos que tem a capacidade de influenciar na rede de drenagem são os de natureza rúptil, ou seja, falhas e fraturas nas quais fornecem rotas de ajustes no fluxo d'água, e podem ser definidas como planos ou superfícies que dividem rochas e solo ao longo dos quais pode haver deslocamento entre as partes (falha) ou não (fratura), como evidenciado na figura 20. Quanto maior a rigidez do material, maior a susceptibilidade ao fraturamento ou falhamento (FOSSEN, 2016).

Os Elementos morfológicos de uma falha são (GRITZINGER & JORDAN, 2013):

- Plano de falha – superfície de fratura
- Direção – Linha de intersecção do plano de falha com o plano horizontal
- Inclinação – Ângulo entre o plano de falha e o plano horizontal
- Rejeito – Movimento relativo entre os blocos fraturados
- Teto – Bloco acima do plano de falha
- Muro – Bloco abaixo do plano de falha

Figura 20 - Elementos de uma Falha geológica



Fonte: TEIXEIRA, 2009.

As falhas são classificadas em (TEIXEIRA, 2009):

- Falha normal, de gravidade ou extensional – Falhas associados a movimentações distensiva, onde a componente vertical (gravidade) das forças atuantes na movimentação do bloco é a mais importante, gerando um deslocamento descendente do teto em relação ao muro
- Falha inversa, reversa ou de empurrão – Originadas de movimentação tensiva, onde a componente horizontal é a mais importante, causando o deslocamento

ascendente do teto em relação ao muro, gerando baixos ângulos de plano de falha, e em grandes extensões o cavalgamento de blocos crustais.

- Falha transcorrente ou de rejeito direcional – Causadas por esforços cisalhantes na superfície terrestre, gerando movimentação horizontal, dextral ou sinistral. O plano de falha é geralmente vertical e em larga escala está sujeito ao regime de Riedel de falhas transcorrentes.

3.5 Investigações Geomorfológicas

A análise geomorfológica está associada a um método lógico e sistemático de agrupamento de unidades de relevo, desenvolvido inicialmente por Guy (1966) e que vem sendo aprimorado com o passar dos anos, no qual consiste em estabelecer conjuntos ou zonas homólogas, com as mesmas propriedades texturais e estruturais, permitindo assim a análise da paisagem.

Passa pelas etapas de leitura inicial da imagem de satélite ou modelo digital de elevação, em segundo lugar a análise da drenagem e pôr fim a definição das zonas homologas com suas características geomorfológicas, como densidade de elementos texturais, tipos de encostas, assimetrias de relevo, tonalidade e densidade de lineamentos, concluindo assim com a interpretação geomorfológica final.

A geomorfologia também descreve feições morfoestruturais, as quais podem ser definidas como feições do relevo que possuem uma ligação de causa e efeito dos esforços tectônicos, divididas em unidades geotexturais, morfoestruturais e morfoesculturais, a depender da escala de análise (DEMEK et al. 2007).

A análise de geomorfológica de uma região passa então pela identificação das feições morfoestruturais como planaltos, planícies, depressões, regiões fluviais, lacustres, desérticas, entre outras. A identificação de dobrões, blocos falhados ou maciços homogêneos.

A análise estrutural, onde já são definidas inclinações de camadas, discordâncias, contatos litológicos, e a classificação e ordem de fraturas, com base em elementos morfológicos como drenagens alinhadas ou angulosas, alinhamento da vegetação, tonalidades de vegetação e alinhamento de encostas. Já as falhas podem ter relação com deslocamento de marcadores, súbita interrupções de camadas, variações de inclinações de camadas e a presença de escarpas.

3.5.1 Investigações Hidro-geomorfológicas

As análises hidro-geomorfológicas abrangem todo e qualquer método de investigação da descarga de um rio e suas características hidrodinâmicas, como sua velocidade, tipos de

fluxo, densidade, carga de fundo e de suspensão, além de envolver o balanço hídrico em escalas de bacia hidrográfica.

A medição do fluxo tem como principal objetivo, medir a descarga de um rio, associada principalmente a medição da vazão (volume d'água que passa por uma seção por unidade de tempo). A vazão de um rio pode ser medida de três formas principais (STEVAUX & LATRUBESSE, 2017):

- **Medição com flutuador:** A velocidade de um rio é calculada a partir do tempo que um flutuador, lançado na corrente, demora para percorrer um espaço pré-definido. O método tem como sua principal vantagem a praticidade e o custo associado, porém acarreta várias desvantagens, como a imprecisão crescente de acordo com o tamanho do rio, o fato de só medir a velocidade da superfície da lâmina d'água e não leva em conta fatores de turbulência do canal, que podem mudar o percurso do flutuador, além do mesmo estar sujeito a ação do vento.
- **Medição com molinete:** O equipamento mais comum na medição de fluxo, de excelente praticidade e manuseio, além de ter uma alta precisão (figura 21). Consiste em uma hélice, presa a uma haste de ferro, de variados tamanhos a depender do tamanho do corpo hídrico a ser analisado, com o qual é medida a corrente inserindo – o no canal fluvial e medindo a rotação das hélices, obtendo uma relação de velocidade x número de giros em um intervalo de tempo. A medição com o molinete possui vantagem em relação ao flutuador pois pode ser feita em qualquer lugar da extremidade do rio e em qualquer profundidade que o equipamento alcance.
- **Medição com ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler):** A forma de medição de vazão mais rápida, dinâmica e com melhores resultados é a que se utiliza do aparelho ADCP, amplamente utilizada nos rios brasileiros e da Amazônia, conforme Guyot (1995), Guimarães (1997), Hiroshi *et.al.*, (2005), Ávila *et.al.*, (2014), Túlio *et.al.*, (2011). Consiste em um sistema de quatro transdutores distribuídos de forma ortogonal, que geram pulsos acústicos na água, e são refletidos pelas partículas em suspensão que viajam pela coluna d'água e pelo fundo do canal (Figura 21). O reflexo do sinal enviado é calculado pelo retardado da emissão causado pelo efeito Doppler, convertendo a mudança da frequência em componentes vetoriais da velocidade do fluxo, em 128 células que

compõem uma média de velocidade. O sistema também possui outras funções, como a captação da temperatura da superfície da água e a análise do retroespalhamento, que pode ter associação com a disposição dos sedimentos em suspensão.

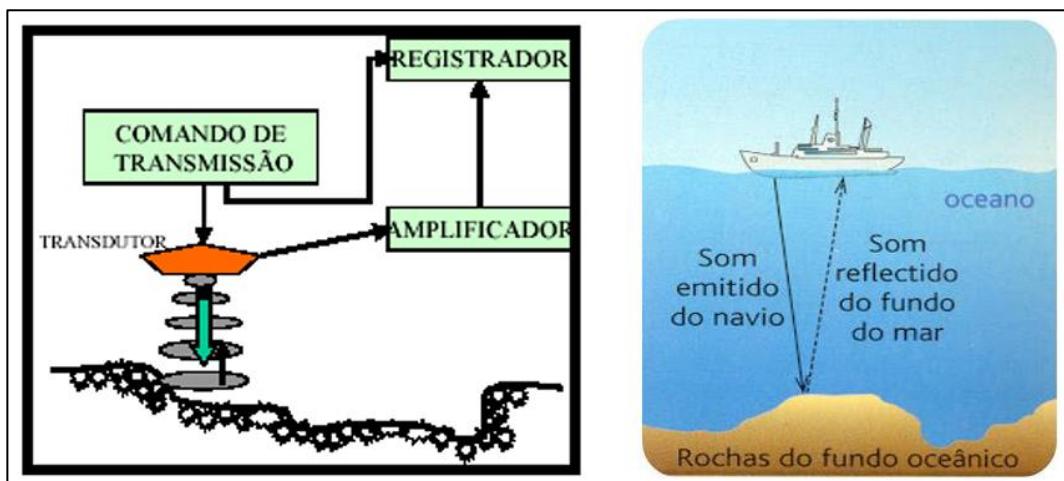
Figura 21 - Ilustração de um Molinete, à esquerda, e um ADCP, à direita.



Fonte: Teledyne, 2009.

A batimetria de fundo, pode ser medida com o ADCP (MARINHO *et.al.*, 2018), ou com um Ecobatímetro (Figura 22), de forma contínua, captando o retorno do sinal para o cálculo da profundidade em um determinado ponto do canal. O deslocamento da embarcação então define os pontos a serem coletados para o levantamento batimétrico. Como o feixe é direcional, e atua em uma frequência menos sensível que o ADCP, este equipamento é mais aconselhado para mapeamentos batimétricos.

Figura 22 - Esquema de operação de um ecobatímetro.



Fonte: Krueger, 2005.

4 METODOLOGIA

Os procedimentos a serem realizados para tal estudo consistem em levantamento de dados e informações, análise e processamento de dados de radar e imagens de satélite, aquisição de dados em campo e tratamento final, divididos nas três etapas – Pré Campo, Campo e Pós Campo, descritas a seguir:

4.1 PRÉ CAMPO

A etapa pré campo consiste em levantamento e processamento de dados de radar e imagens de satélite e análise geomorfológica da confluência que foi realizada plataforma de mapeamento ArcGIS 10.4.1 e QGIS 3.22.

Para tal análise, foi feito um estudo do software nas funções associadas a interpolação de dados, geoprocessamento em modelo digital de elevação, e funções associadas a análise altimétrica, definição de zonas geomorfológicas, análise de perfis topográficos, definição de lineamentos e quebras de drenagem (knickpoints).

4.1.1 Análise Altimétrica

A altimetria da área de estudo foi feita tendo como base um modelo digital de elevação (MDE) adquirido pela ferramenta Earth Explorer, do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), pelo levantamento do Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), altamente utilizado como ferramenta de geoanálise (WISE, 2000). Os dados já vêm georreferenciados, logo esse processo no software não foi necessário.

A altimetria foi caracterizada primeiramente realizando um tratamento do MDE com a ferramenta FILL do Arcgis 10.1, que realiza a correção de eventuais espaços vazios, os chamados “buracos” que ocorrem na aquisição do modelo. Após a correção, foi feita a classificação em cores gerando assim um mapa hipsométrico com uma classificação em 10 níveis de altitude, pela amostragem de quebras naturais (JENKS, 1967).

4.1.2 Zoneamento Geomorfológico e Definição de geoformas deposicionais

A classificação das zonas geomorfológicas é baseada na identificação de elementos fluviais geomorfológicos (STEVAUX & LATRUBESSE, 2017) e na análise altimétrica em relação às médias das cotas fluviais durante cheias, vazantes e níveis intermediários.

Isso permite correlacionar os comportamentos geomorfológicos de um sistema fluvial com as cotas altimétricas encontradas no modelo digital de elevação, estabelecendo relações tanto entre elementos individuais, como ilhas, quanto a mudanças laterais nos níveis das planícies de inundação.

A definição das geoformas foi realizada por meio de análise visual qualitativa dos elementos geomorfológicos encontrados na área de estudo, com base em correlações com a bibliografia para sua classificação.

4.1.3 Perfil Topográficos em Faixa e Declividade da área

Para a análise geomorfológica foram realizados perfis topográficos em faixa, perfis de varredura ou perfis projetados (Bauling 1926) que são obtidos com a extensão do ArcGis *Swath Profiles*, configurando uma janela delimitada pelo usuário, onde neste trabalho foi usada a faixa de 20km, dentro da qual são gerados perfis topográficos em sequência lateral, além de realizar uma análise de estatística descritiva separando em médias gerais, 1 e 2 quartio, máximos e mínimos além da execução de um algoritmo que projeta um perfil real do relevo no perfil principal (Telbisz. Et al., 2013).

Os perfis em faixa assim, dão uma visão ampla de áreas de interesse do relevo (PERES-PEÑA et.al., 2017). Foram feitas três faixas – “AB”, transversal a confluência do rio Branco com o rio Negro, “CD”, na região da foz do rio Branco, seguindo o lineamento estrutural correspondente. A última faixa “EF” ocorre à montante do rio Branco, após uma sequência de ilhas fluviais. Essas três áreas de perfis permitem então a visualização da compartimentação geomorfológica da região da confluência.

A declividade da área foi gerada através do processamento do SRTM com a execução do algoritmo *Slope* da caixa de ferramentas do ArcGIS. O tamanho da célula utilizado no mapa de inclinação foi de 1m x 1m, e o mapa foi preparado diretamente a partir do modelo digital de elevação (DEM) usando a ferramenta de análise espacial do ArcGIS.

Este método é amplamente utilizado na geração de mapas de inclinação usando SIG, e permite uma análise precisa da topografia da área em questão (BHATTARAI et.al, 2008).

4.1.4 Lineamentos e *Knickpoints*

A delimitação de lineamentos geomorfológicos foi feita de forma manual, analisando inicialmente a drenagem, delimitando nos cursos d’água os lineamentos identificados em morfoestruturas.

O terreno foi analisado a partir da ferramenta *Hillshade* do Arcgis, a qual simula a radiação solar em um MDE a partir de uma direção e ângulo pré-definido, gerando um sombreamento com o objetivo de destacar os lineamentos geomorfológicos. Foram geradas quatro simulações de sombreamento em quatro azimutes diferentes, 45°, 90°, 180° e 315°, todos em um ângulo de 45° com a horizontal, aproveitando o máximo de radiação solar.

Os ângulos fornecem todas as possíveis direções de lineamentos, sendo depois computados pela ferramenta *AzimuthFinder* (QUEIROZ et.al., 2014), disponibilizado pela UFPR, exportados em uma tabela do Excel para serem plotados no software de interpretações estruturais *Stereonet*, no qual é gerado o diagrama de rosetas das direções de lineamentos encontrados para drenagem e relevo.

Os *Knickpoints*, também conhecidos como quebras de drenagem, são identificados utilizando a ferramenta *KnickpointFinder* (SALAMUNI et.al., 2013) no ArcGIS, uma extensão disponibilizada pela UFPR.

Essa ferramenta utiliza um Modelo Digital de Elevação (MDE) georreferenciado em coordenadas planas (UTM) para extrair automaticamente a rede de drenagem e analisar os índices de declividade e extensão (RDE). Com base nesses índices, são gerados pontos de interesse que podem indicar variações nos padrões médios da região, como a confluência de um afluente, uma alteração causada por erosão acelerada ou, em casos extremos, uma estrutura morfológica associada a uma quebra na drenagem, como uma corredeira ou cachoeira (Etchebehere et.al., 2004).

A integração desses dados com dados de campo e outros parâmetros do geoprocessamento é importante para definir a magnitude desses knickpoints. São realizados então dois mapas de distribuição dos knickpoints, um mapa de nuvem de frequência e outro de classificação dos knickpoints de acordo com o índice RDE, destacando assim áreas de interesse do mapa.

Por fim, a integração dos dados e possíveis discussões e comparações bibliográficas, como resultado um mapa de lineamentos interpretados da região.

4.1.5 Classificação da Rede de Drenagem

4.1.5.1 Extração da rede de drenagem

O procedimento consiste em corrigir os erros no Modelo Digital de Elevação (MDE), calcular as direções e acumulações de fluxo, delimitar as bacias, criar um ponto vetorial no exutório e delimitar a área de contribuição hidrográfica usando a ferramenta "Watershed". O SIG (ArcGIS) calcula os locais com acumulação de fluxo para determinar os corpos d'água e montar a rede de drenagem. A extração da rede de drenagem é feita utilizando a ferramenta "Raster Calculator" e definindo a variação de altitude do raster.

4.1.5.2 Índices de Drenagem

Devido a área de estudo não caracterizar uma bacia hidrográfica, foi selecionado apenas os parâmetros não dependentes de uma delimitação de bacia, para a classificação. Com

isso foi calculado, através do processamento no QGIS, com a “calculadora de campos” que utiliza os metadados dos arquivos vetoriais para calcular informações necessárias. Foi então calculado a área de estudo, o comprimento total dos canais, a amplitude altimétrica, o número de canais, o perímetro da área, a densidade da drenagem, o índice de rugosidade, a densidade hidrográfica e o índice de textura.

4.1.5.3 Hierarquias de drenagem

As hierarquias de drenagem foram extraídas a partir do algoritmo *Strahler*, onde o método atribui um número inteiro a cada segmento de rio, começando pelas cabeceiras e seguindo até a foz, de acordo com o número de afluentes que se juntam a ele (STRAHLER, 1952).

Os segmentos de rio sem afluentes são considerados de ordem 1. Quando dois segmentos de ordem 1 se unem, formam um segmento de ordem 2. Quando dois segmentos de ordem 2 se unem, formam um segmento de ordem 3 e assim por diante. Esse processo continua até chegar ao rio principal ou a foz da bacia hidrográfica.

4.1.5.4 Anomalias de drenagem

A identificação e classificação de anomalias de drenagem da determinada área de estudo foi realizada através da análise comparativa da rede de drenagem com modelos e classificações constantes na bibliografia (HOWARD 1967, PARVIS, 1950) constantes na bibliografia.

4.1.5.5 Hidrograma

O hidrograma foi feito através do processamento, no Excel, dos dados de cotas hidrográficas do rio Negro, medidas pela régua da estação hidrológica da Agência Nacional de Águas, que os disponibiliza gratuitamente (Site ANA, 2022). Essa parte do estudo trata do uso do gradiente hidráulico para tratar as séries temporais de cotas limimétricas, permitindo a análise do regime hidrológico e a comparação entre estações com altitude diferenciada. Esse método já foi aplicado em estudos de caracterização hidrológica na bacia Amazônica por Meade et al (1991), Filizola et al (2002), Blanco (2007), Vale *et.al.*, (2009) e Filizola & Guyot (2011).

4.2 CAMPO

A etapa de campo tem por objetivo a aquisição de dados hidrológicos relacionados a confluência do rio Negro x rio Branco, sendo necessárias duas etapas de levantamento – uma em época de cheia, que ocorre entre novembro e janeiro, e outra em época de seca, que ocorre entre junho e agosto (CPRM, 2019), baseando – se no regime do rio Negro, na estação hidrográfica da comunidade de Moura. Logo, a abordagem precisa coletar dados de

profundidade de canal, velocidade da corrente e sinal de retroespalhamento (NASCIMENTO, 2016) (SASSI *et. al.*, 2011) (KARSVI *et. al.*, 2019).

O levantamento realizado para o estudo contou com a importante parceria da Marinha do Brasil, por meio do navio de pesquisa hidrográfica Rio Negro. Os técnicos da Marinha trabalharam em paralelo com a equipe do estudo, realizando levantamentos para monitoramento da navegabilidade dos rios (Figura 23).

As campanhas de coleta de dados em campo foram realizadas em períodos de 10 dias cada uma. Essa parceria foi essencial para garantir a segurança das equipes envolvidas nas atividades de campo, além de permitir a coleta de dados importantes para o estudo em questão. O uso do navio de pesquisa hidrográfica também proporcionou maior agilidade na realização dos levantamentos.

Figura 23 - Equipe de levantamento de dados, na proa do navio de pesquisas da marinha Rio Negro.



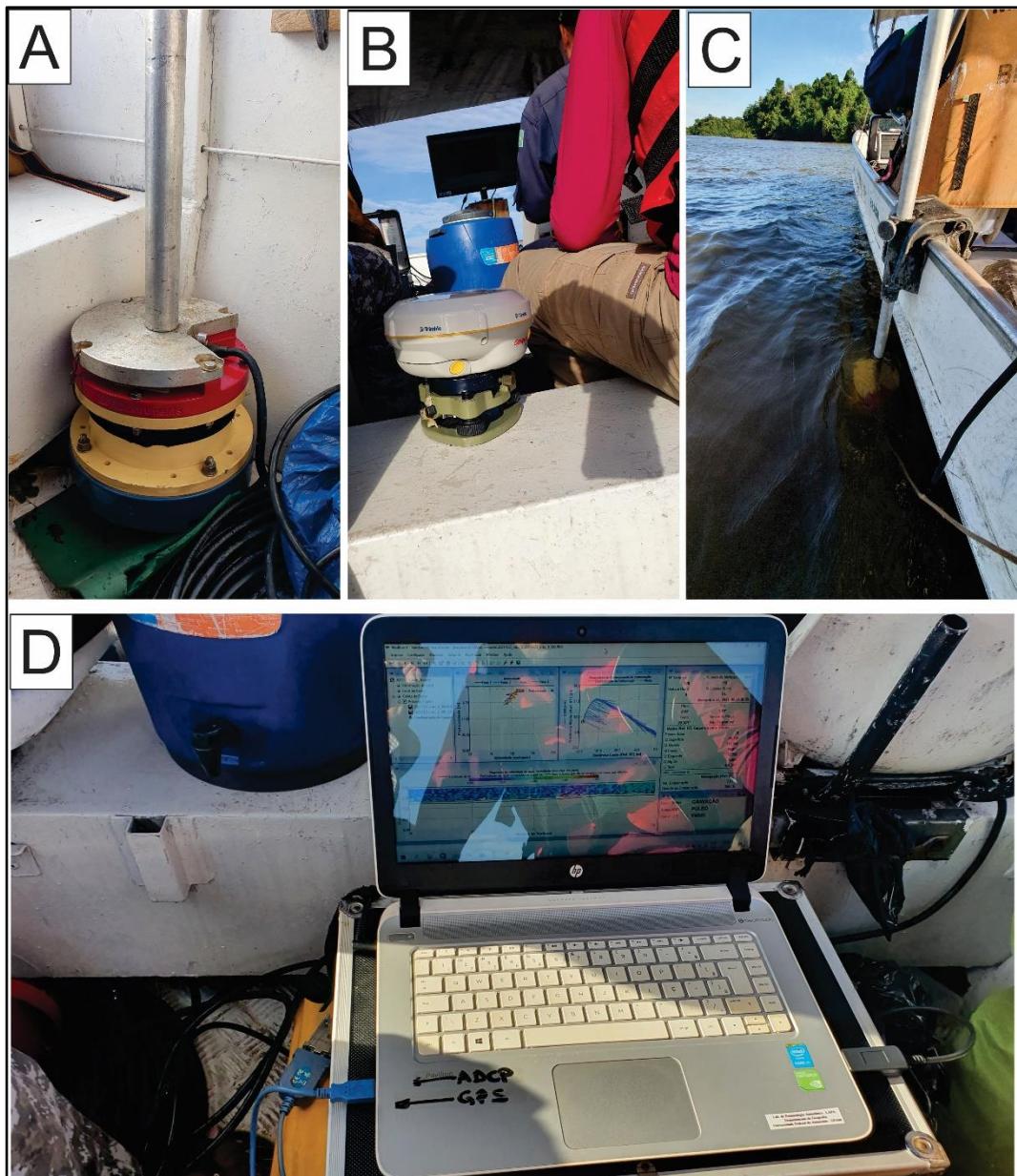
Fonte: O Autor

Para a aquisição desses dados, foi utilizado o equipamento ADPC no modelo *Workhorse Rio Grande*, com a frequência recomendada de 600 kHz (RD INTRUMENTS, 2003), acompanhado de um DGPS *Trimble R4* e *Trimble DSM 232* para registrar o posicionamento geográfico dos equipamentos realizados com o ADCP. Para aumentar o detalhe dos dados, foram disponibilizados dados do Ecobatímetro – Monofeixe Odom *Echotrack CVM* de dupla frequência (200 e 33 kHz) da Marinha do Brasil.

Para o levantamento, foram utilizados dois notebooks com processador i3 e 4gb de memória ram, interligando os dados com o *software Hypack 2010*, e foi feito conectando um

notebook ao Ecobatímetro Monofeixe e DGPS *Trimble* DSM 232, para obter os valores de profundidade georreferenciadas, e um segundo notebook ao ADCP e DGPS *Trimble* R4, gerenciados pelo software *WinRiver II* (Figura 24), cujos quais coletarão os dados hidrológicos igualmente georreferenciados (NASCIMENTO, 2016).

Figura 24 - Equipamentos utilizados no levantamento de Campo: (A) ADCP, (B) GPS, (C), Haste de fixação do ADCP, (D), Notebook de Campo com o WinRiver II em processamento.



Fonte: O Autor

A aquisição foi feita também baseado em Nascimento, 2016, da seguinte forma:

Inicialmente, com o barco equipado, mede -se a distância da margem ao barco, inserindo o dado no software *WinRiverII*, e liga -se após o modo de emissão de sinal do ADCP. Por conseguinte, desloca - se o barco de forma perpendicular ao sentido do canal, percorrendo

a distância até a outra margem. Finalizando o percurso, insere – se a distância do barco a outra margem e insere-se no software, finalizando assim a medição. O software também calcula as informações coletadas, obtendo os dados de vazão em m^3/s e velocidade de fluxo em m/s .

Com isso, foram feitas seções transversais em três áreas da confluência - no rio Negro, antes da confluência, no fim rio Branco e na confluência dos dois rios, com espaçamentos regulares e pré-definidos de 250m.

4.3 PÓS CAMPO

Consiste na etapa de processamento e pós processamento de dados, incluindo as interpretações de dados e elaboração de modelos de confluência, e comparação final bibliográfica. O processamento foi feito através de conversão de dados em SIG, interpolando – se as medidas através do método de Krigagem Ordinária (LANDIM et al. 2013), cuja qual apresenta estimativas desenviesadas.

O modelamento da confluência, com mapas de batimetria, distribuição de velocidades médias de corrente, temperatura e sinal de retroespalhamento foi feito através do software de mapeamento VMT (*Velocity Mapping Toolbox*) (PARSONS et al., 2013), e utilizou – se o método de rotação Rozoviskii em busca de velocidades de fluxo nos vetores induzidos pela divergência dos leitos e a variação das mesmas em profundidade (RHOADS, KENWORTHY, 1999).

A morfologia de fundo foi realizada através da vetorização inicial de imagens de satélite por SIG, onde se extrairá os dados do ecobatímetro monofeixe em formato “.txt” gerando um modelo digital de terreno pelo software Surfer, com interpolação de dados por Krigagem (NASCIMENTO, 2016).

Por fim, foram gerados mapas temáticos e correlacionados com as referências bibliográficas para a obtenção e análise dos resultados.

5 RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Análise do Relevo

5.1.1 Altimetria

A região da confluência do rio Branco com o rio Negro é caracterizada por uma amplitude altimétrica de 64 metros, variando de 4 a 70 m. Isso significa que a região apresenta a variação de altitude pode influenciar diversos fatores, como a velocidade da água, a formação de corredeiras, a erosão das margens e o transporte de sedimentos.

Essa variação altimétrica pode estar relacionada às características geológicas e geomorfológicas da região, bem como às interações entre os dois rios e às condições climáticas locais.

5.1.2 Compartimentação do Relevo

O relevo da região da confluência do rio Branco com o rio Negro é composto por unidades que transitam entre os ambientes fluviais. A área da confluência do rio Branco com o rio Negro possui uma altimetria com pouca variação, na qual parte de 4m de altitude nas áreas dos corpos d'água, e com o gradiente variando de 30 a 70m nos diques marginais, talvegues, áreas alagáveis de planície de inundação e topos aplaniados relacionados com as nascentes dos rios tributários, como mostra a figura 27A.

Sendo assim, a compartimentação mais adequada pode ser a relacionada com as variações altimétricas da área. Logo foram escolhidos quatro domínios geomorfológicos principais (Figura 27b).

A baixa planície de inundação é caracterizada pelas áreas mais próximas aos rios de interesse, em cerca de até 28m de altitude (Figura 27a). Podem ocorrer lagos em ferradura, antigos depósitos de barras em pontal, ilhas (Figura 25) e até mesmo terraços fluviais mais recentes.

Figura 25 - Ilha fluvial de base rochosa, com perfil intempérico e depósitos aluvionares associados, com o estabelecimento de vegetação.



Fonte: O Autor.

Figura 26 - Margem direita do rio Negro, evidenciando blocos de rocha e ilhas rochosas



Fonte: O Autor

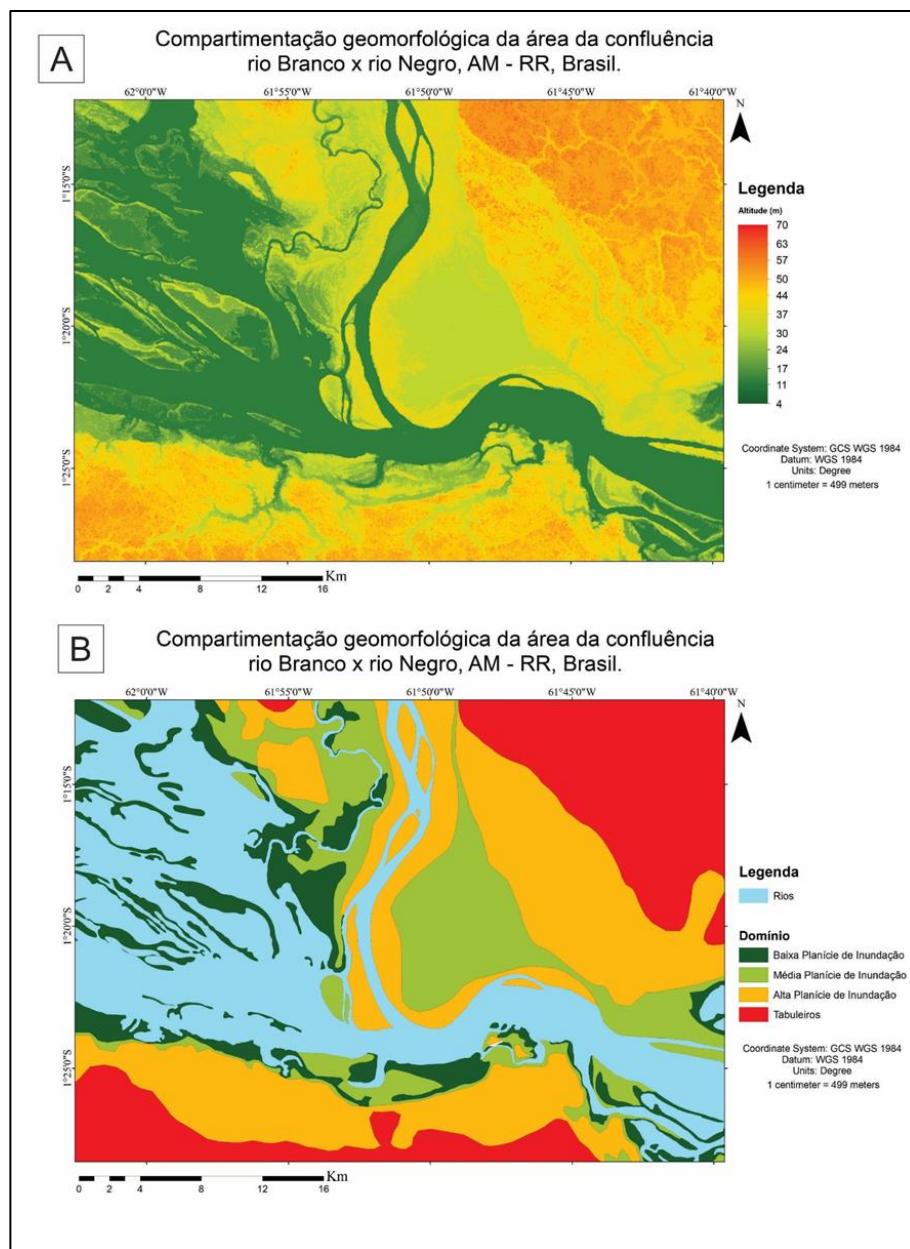
Possui uma forte influência de eventos periódicos, sendo susceptíveis a alagamentos em pequenas variações no nível do rio, além de algumas áreas permanecerem constantemente alagadas.

A média planície de inundação (figura 27b), ocorre em altitudes de 28 a 37m, é caracterizada por uma vegetação menos densa, áreas de exposição de solo, ocorrência de tributários menores e é afetada por eventos sazonais de cheia e seca, formando até mesmo grandes lagos associados a esses eventos.

A alta planície de inundação ocorre em altitudes de 37 a 46m e está relacionada a antigos terraços do entorno da confluência, e um provável extenso dique marginal do rio Branco, cujos quais são afetados apenas por eventos extremos, como uma cheia histórica, possibilitando uma densidade maior na vegetação.

Por fim, os tabuleiros típicos da região amazônica (figura 27b), encontram – se em cotas superiores a 46 metros, e são marcados pela densidade da vegetação e lineamentos tanto do relevo quanto da drenagem, muito bem-marcados, sem influências do regime dos rios Negro e Branco.

Figura 27 - A, compartimentação altimétrica da área de estudo; B. Compartimentação geomorfológica da área de estudo.



Fonte: O Autor

5.1.3 Declividade

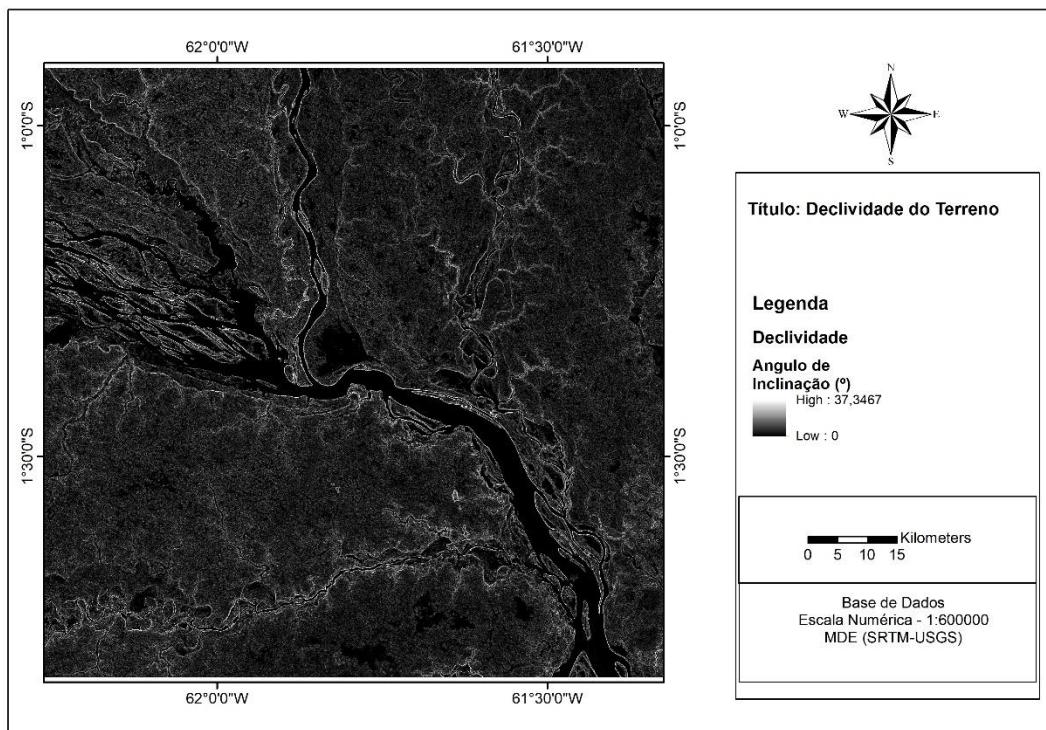
A declividade da região varia de 0° , nos leitos dos rios principais da região, chegando a até $37,3^\circ$ de inclinação nas áreas de terra firme. Observa-se que as maiores inclinações estão associadas às margens dos rios, o que sugere uma maior erosão e sedimentação nessas áreas (Figura 29).

Em áreas sem sistemas fluviais maiores, a declividade varia muito pouco (Figura 28). Isso pode ser explicado pelo fato de que essas áreas são mais estáveis do ponto de vista geomorfológico, com menor taxa de erosão e sedimentação.

A amplitude altimétrica da região influencia na dinâmica fluvial. Em áreas com maiores altitudes, o fluxo de água tende a ser mais acelerado, o que pode resultar em maior transporte de sedimentos e em processos erosivos mais intensos. Por outro lado, em áreas com menores altitudes, a velocidade do fluxo é menor, o que favorece a deposição de sedimentos e pode resultar em processos de sedimentação mais intensos.

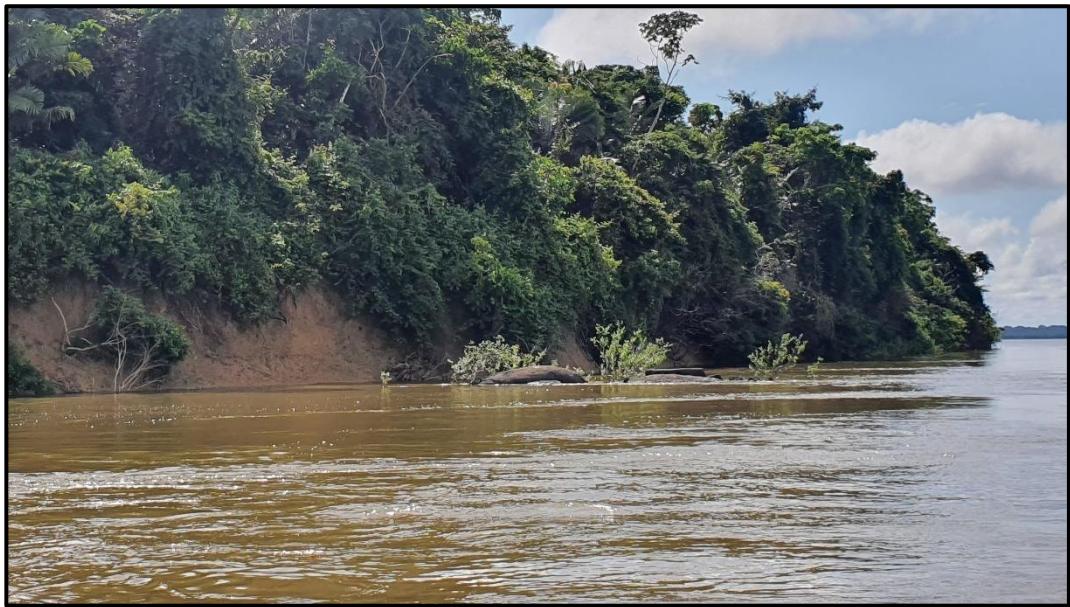
Dessa forma, a variação altimétrica associada à declividade da região pode afetar diretamente a dinâmica fluvial e os processos geomorfológicos que ocorrem na área da confluência entre o rio Branco e o rio Negro.

Figura 28 - Mapa de Declividade da região da confluência



Fonte: O Autor

Figura 29 - Margens do rio Branco na região da confluência, evidenciando a alta declividade que ocorre nessa área.



Fonte: O Autor

5.1.4 Análise Morfoestrutural

5.1.4.1 Perfis Topográficos em Faixa

Para entender essa morfologia, foram realizados perfis topográficos em faixa, perpendiculares a direção do rio Negro e a direção do rio Branco, com amplitude lateral de 20km (figura 30). Perfis no rio Negro, na faixa de 2km, mostram uma diferença de altitude entre a calha do rio branco e a calha do rio negro.

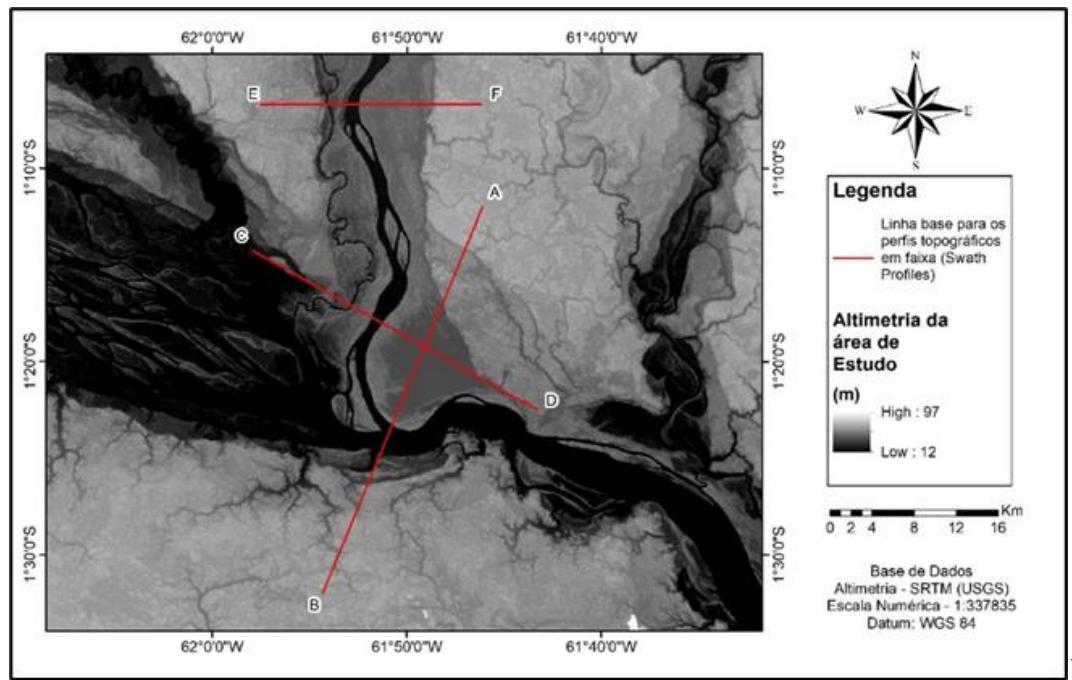
Os perfis resultantes da seção A-B (figura 31a), mostra uma gradual variação de altitude na área a nordeste da confluência, variando apenas 20 metros em cerca de 16 km de extensão, onde até aproximadamente se encontra o talvegue do rio Branco. A margem direita do rio negro, porém possui um gradiente de variação topográfica mais abrupto, onde em cerca de 4km ele possui variações de até 25 metros. Isso mostra que há um talvegue mais incisivo na margem direita do rio negro, na região da confluência.

Os perfis da seção C-B (figura 31b) evidenciam uma clara diferença topográfica entre a margem direita e esquerda do rio Branco na região da sua foz. Enquanto a margem direita varia entre as cotas de 25 metros, com vales fluviais e pequenos tributários associados, no talvegue do rio branco deixa claro a existência de um dique marginal, seguido na margem esquerda por uma planície de inundação cerca de até 10 metros acima do que ocorre na outra margem, mostrando que possivelmente a dinâmica fluvial na margem direita é mais ativa, ou que podemos ter uma movimentação tectônica de blocos associada.

Por fim, os perfis relacionados a seção D-E (figura 31c) mostram diferentes níveis de terraços no rio Branco, ainda evidenciando a diferença de altitude entre as margens direita e esquerda. É possível identificar dois níveis principais de terraços na margem esquerda e apenas um nível na margem direita. Pelos perfis topográficos em faixa então é possível inferir que a região a nordeste da confluência possui um nível topográfico maior.

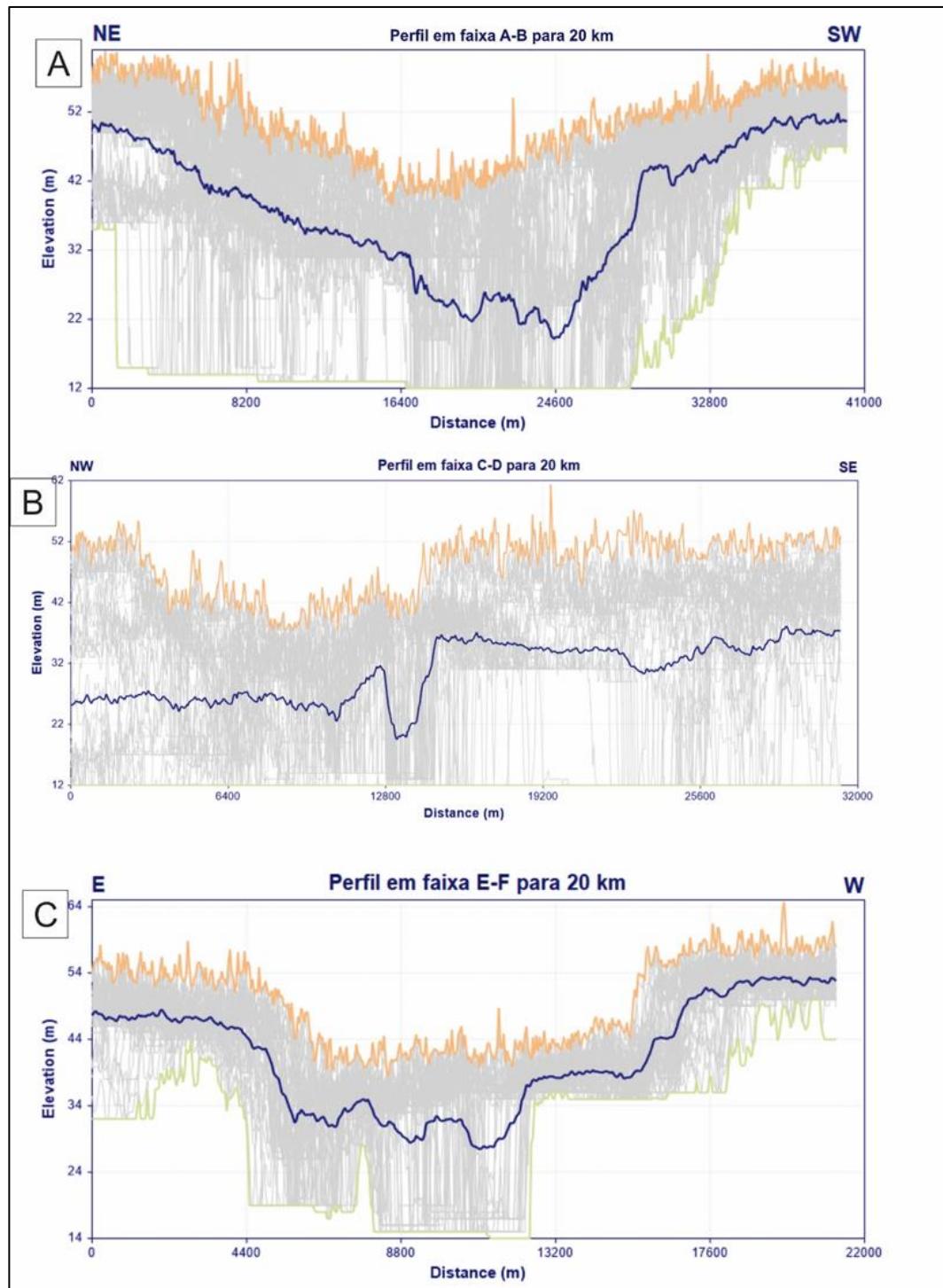
A região ao sul da confluência, por possuir gradientes topográficos muito incisivos, possivelmente estão associados a falhamentos e o rio branco possui um regime de terraços bastante ativo, sendo a margem direita a principal área de mudança atualmente, possivelmente também associada a padrões tectônicos devido aos alinhamentos de relevo associados.

Figura 30 - Direção dos perfis topográficos em faixa elaborados



Fonte: O Autor

Figura 31 - Perfis topográficos em faixa, elaborados em amplitudes laterais de 20km, nas seções AB, CB e EF. As linhas em laranja correspondem ao perfil mais alto verificado, as linhas em azul se referem a média dos perfis e a linha em verde remete ao perfil mais baixo levantado na seção correspondente.



Fonte: O Autor

5.1.4.2 Lineamentos

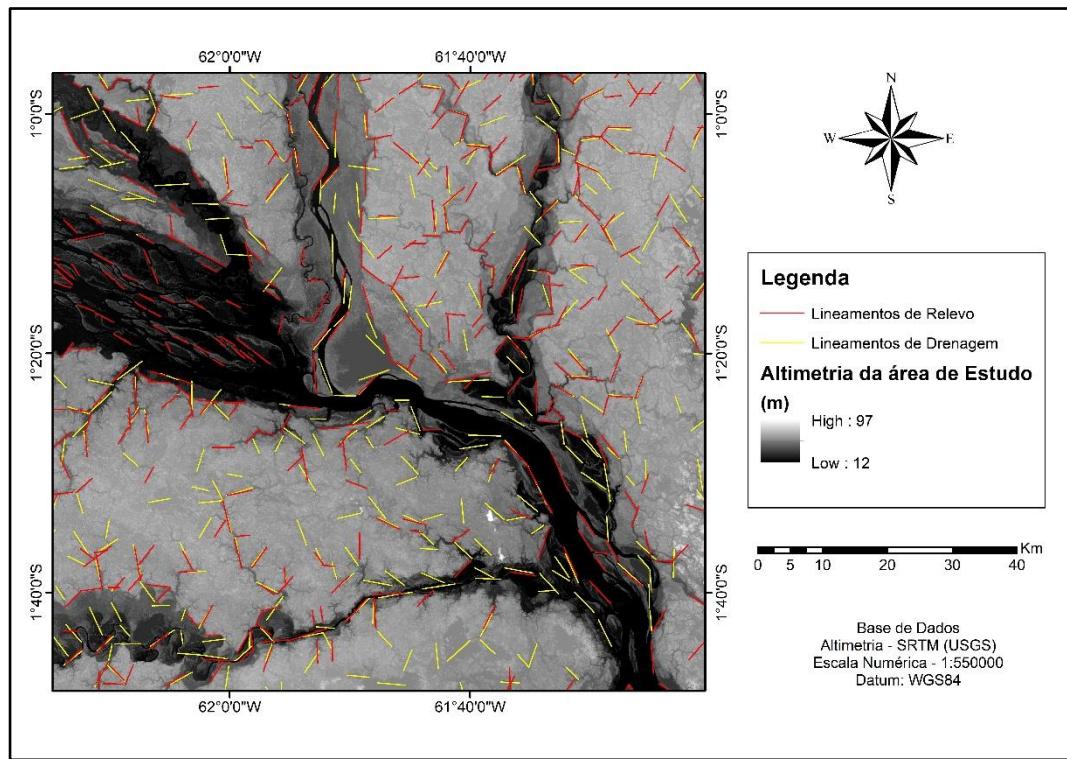
A característica tectônica da região é bem-marcada pelos lineamentos de relevo e de drenagem, tendo em vista que as suas maiores ocorrências são nas planícies de inundação média e alta, além dos tabuleiros. Esses lineamentos são expressões de um alinhamento de elementos

texturais geomorfológicos locais, podendo ser uma resposta reológica a compartimentação do relevo a grandes movimentos crustais, marcados ao longo do rio Branco, rio Negro e rios de menor porte na região, localizados no mapa de lineamentos da figura 32.

Em modo geral, os lineamentos de relevo possuem 3 direções principais, onde a maior frequência ocorre no campo NW-SE, seguido por lineamentos E-W e em menor número, lineamentos N-S e NE-SW (figura 33).

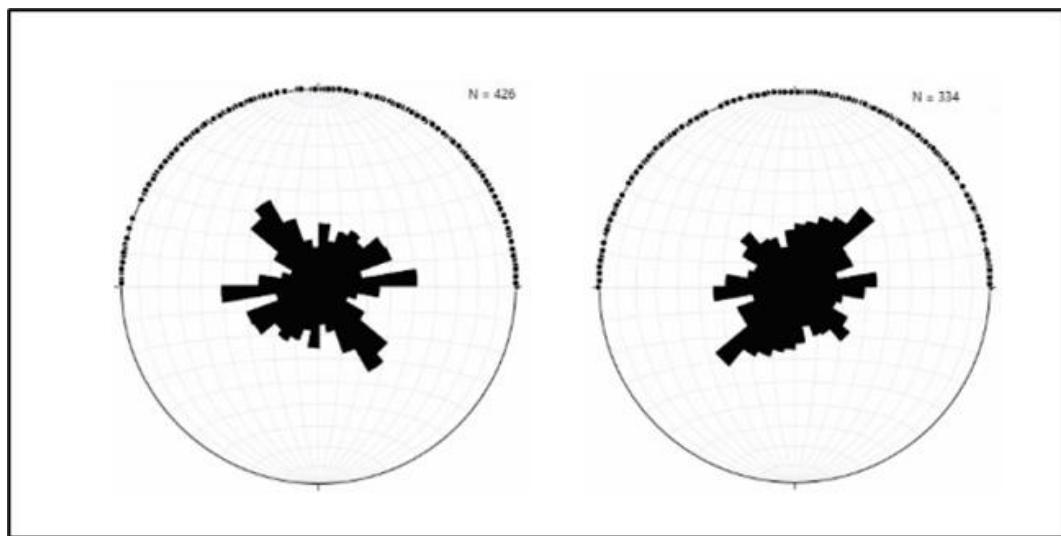
Os lineamentos que envolvem a drenagem seguem uma lógica inversa, sendo os de maior frequência, lineamentos NE-SW, seguidos de lineamentos E-W e por fim os associados as atitudes NW-SE (figura 33). Os maiores lineamentos em extensão ocorrem alinhados as grandes drenagens, seja em resposta a movimentação de blocos em possíveis falhas normais, como nos alinhamentos no rio Negro, ou a possíveis falhamentos transcorrentes, como os lineamentos associados ao rio Branco.

Figura 32 - Mapa de lineamentos de relevo e drenagem da região da confluência do rio Branco x rio Negro



Fonte: O Autor

Figura 33 - Diagrama de rosetas dos lineamentos de relevo



Fonte: O Autor

Nota: Distribuição dos azimutes dos lineamentos em diagramas de rosetas de relevo à direita, e de drenagem, à esquerda.

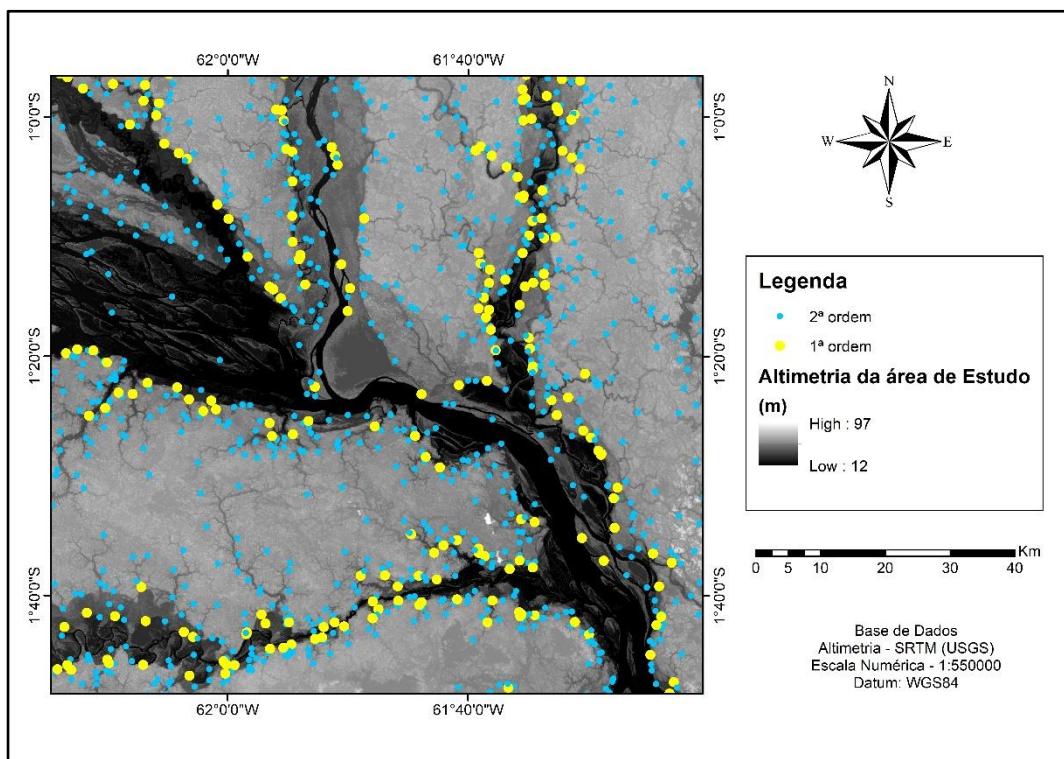
5.1.4.3 *Knickpoints*

A análise dos knickpoints de drenagem é fundamental para compreender o comportamento fluvial da região. Esses pontos são caracterizados por mudanças bruscas na declividade dos canais fluviais e são divididos em dois tipos de magnitude (Figura 34).

Os de 2^a ordem são menos expressivos e estão relacionados a pequenos aumentos na declividade ou velocidade de fluxo, que podem ser associados à declividade normal do terreno. Já os de 1^a ordem estão associados a corredeiras, cachoeiras ou foz de rios, sendo mais expressivos e com maior impacto na morfologia fluvial.

A partir da localização desses pontos, é possível traçar lineamentos em alinhamentos de pontos de anomalias, auxiliando na identificação de possíveis estruturas geológicas que possam estar influenciando o comportamento fluvial da região.

Figura 34 - Mapa de Knickpoints extraídos

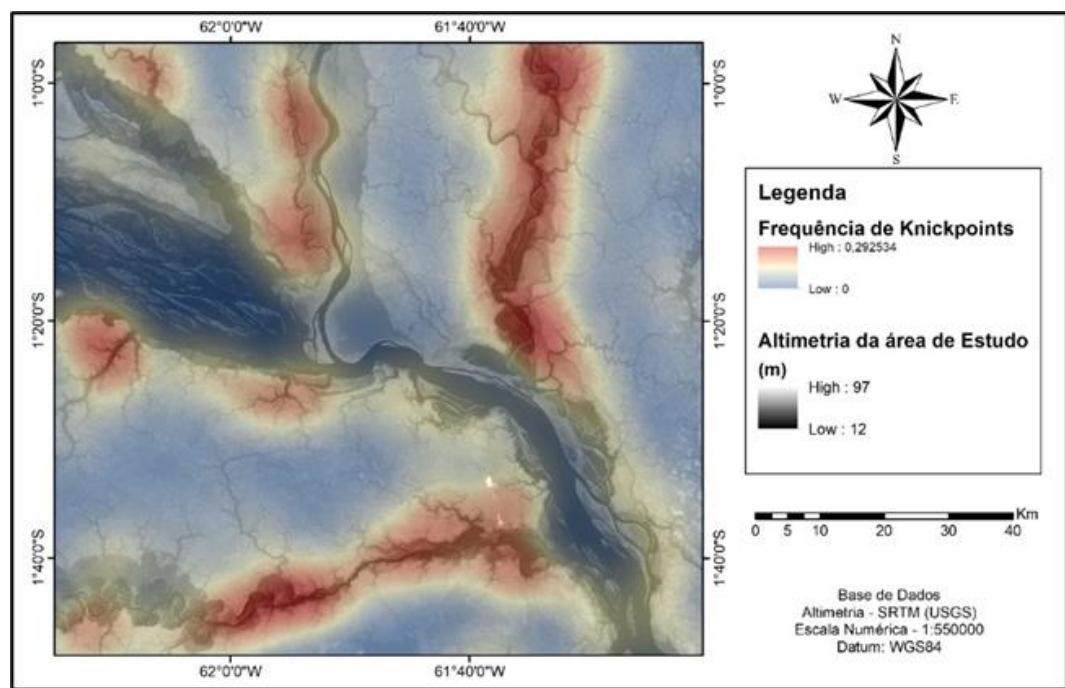


Fonte: O Autor

Na análise realizada, foram consideradas as anomalias de 1^a ordem, que correspondem às mudanças mais expressivas. Foi gerado um mapa de frequência dos knickpoints, mostrando que os sistemas de drenagem mais afetados por essas anomalias são: o rio Jauaperi, Unini, Paraná do Amajaú e rio Jufari (Figura 35).

Esses resultados sugerem que esses rios possuem um controle estrutural significativo em sua dinâmica, o que pode ter implicações importantes na gestão ambiental e na previsão de riscos geológicos.

Figura 35 - Mapa de calor das anomalias de relevo

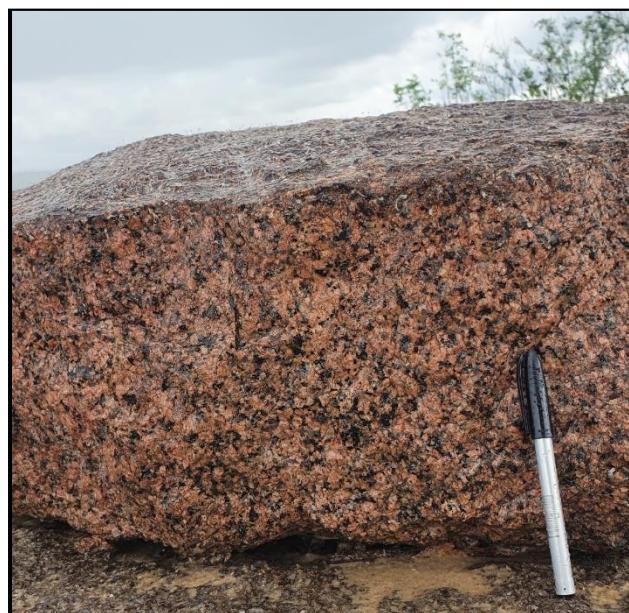


Fonte: O Autor

5.1.4.4 *Estruturas*

Os afloramentos estudados apresentam uma série de sistemas de fraturas e falhas que evidenciam a história tectônica. As estruturas foram encontradas no leito rochoso do rio Negro, na margem direita e no centro do canal, onde de acordo com mapeamento da CPRM – Geodiversidade do Estado do Amazonas (2006), ocorre o Granito Gavião (Figura 36) na região.

Figura 36 - Granito Gavião, localizado na região da foz do rio Branco



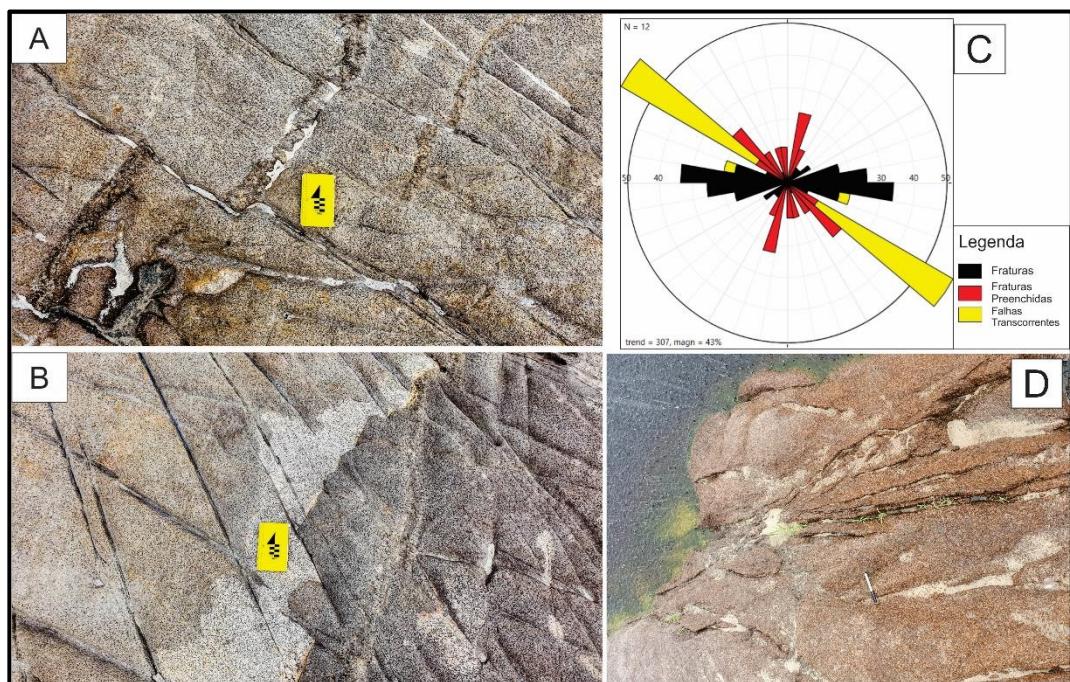
Fonte: O Autor

Veios e Fraturas preenchidas por óxidos são observadas em duas direções principais, NNW/SSW e NW/SE, indicando possivelmente uma deformação mais antiga. Já as fraturas na direção EW não apresentam preenchimento, sugerindo uma deformação mais recente.

Além disso, observou-se que as falhas transcorrentes na direção NW/SE cortam os veios de forma dextral, o que indica que são estruturas mais jovens que os veios. Por fim, foram identificadas zonas de falhas nas direções NW/SE e SE/NW, mas não foi possível estabelecer relações de corte entre essas estruturas e as anteriores.

O diagrama de rosetas mostra a distribuição das estruturas identificadas nos afloramentos, destacando as direções principais das fraturas e falhas (Figura 37).

Figura 37 - Evidências estruturais na confluência do rio Branco x rio Negro.



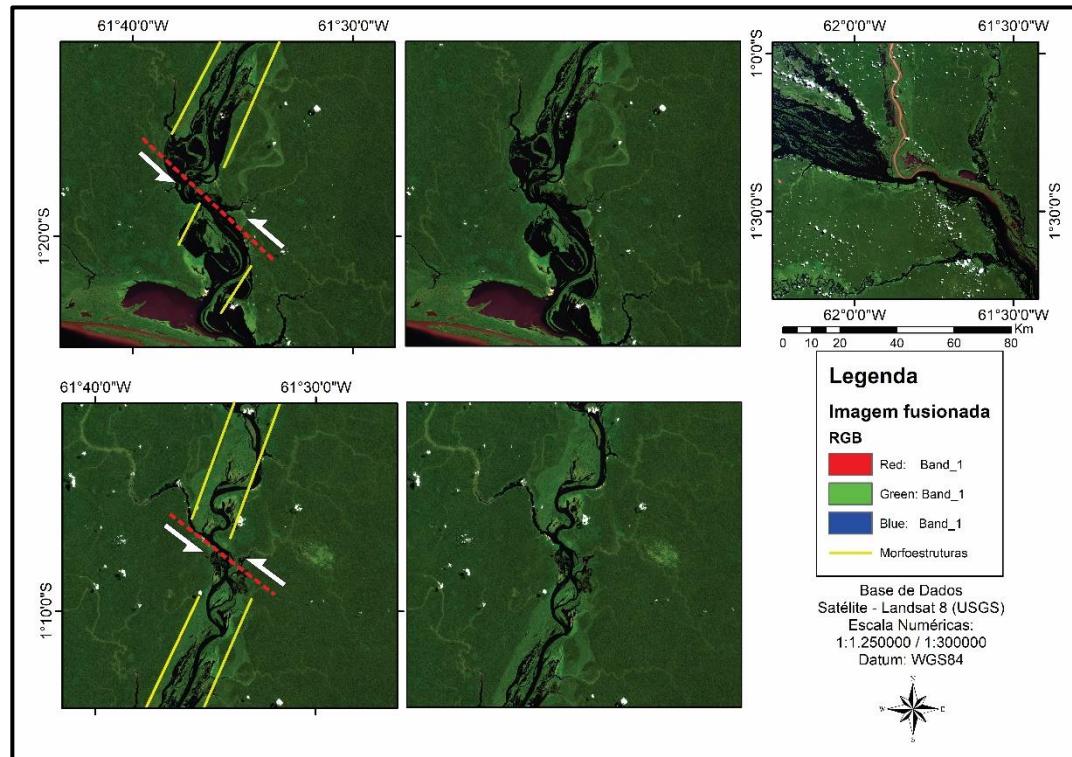
Fonte: O Autor

As características dos canais fluviais do rio Jauaperi e do rio Unini indicam diferentes padrões morfoestruturais. No rio Jauaperi, é possível observar um deslocamento com transcorrência sinistral (anti-horária) do canal fluvial, o que pode estar relacionado à presença de falhas geológicas que influenciaram a direção do rio (Figura 38).

Além disso, o canal apresenta curvas abruptas e trechos alinhados com lineamentos de relevo, indicando uma forte relação entre o relevo e a dinâmica fluvial. Já no rio Unini, há uma mudança abrupta na direção predominante do vale fluvial e na largura do vale, além de apresentar inversões na lógica fluvial, com um vale mais largo na região superior e mais curto próximo à foz.

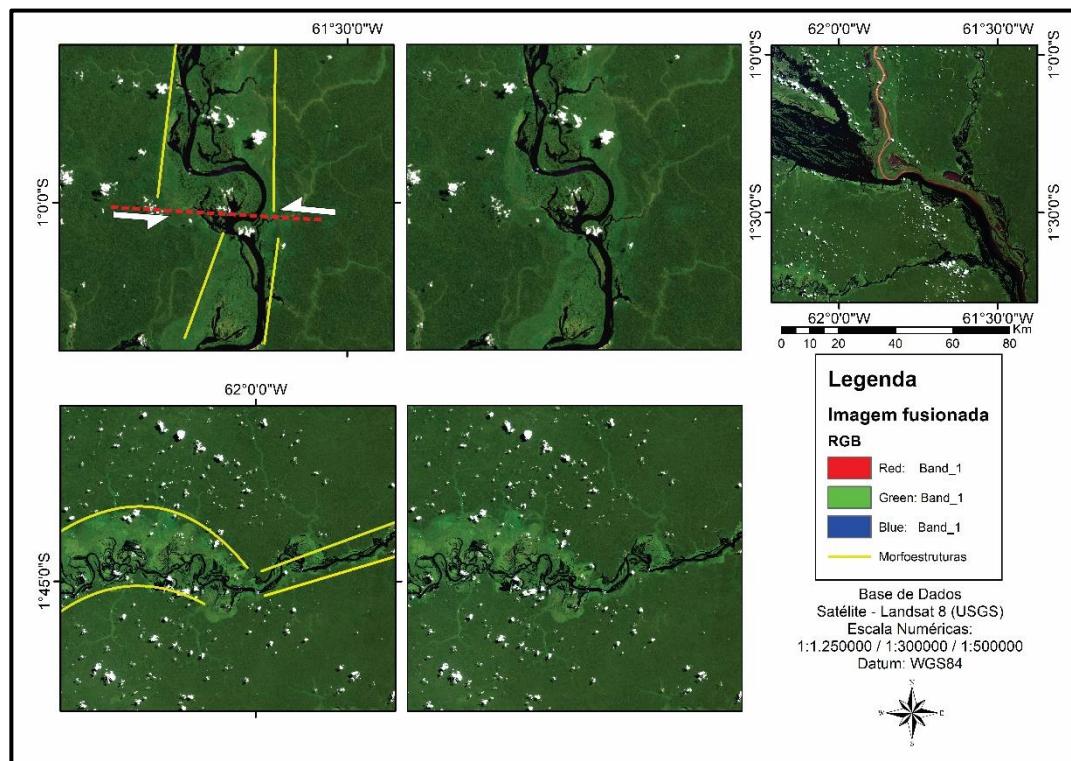
Essas características podem estar relacionadas à presença de elementos estruturais que condicionaram a dinâmica fluvial ao longo do tempo, como falhas geológicas e mudanças na litologia. É interessante destacar que, ao final do perfil longitudinal, o rio Unini passa de uma característica meandrante para retilínea, o que pode indicar um controle estrutural (Figura 39).

Figura 38 - Falhamentos na calha do rio Jauaperi



Fonte: O Autor

Figura 39 - Falhamentos na calha do rio Jauaperi (acima) e Unini (abaixo)



Fonte: O Autor

5.1.4.5 Lineamentos Traçados

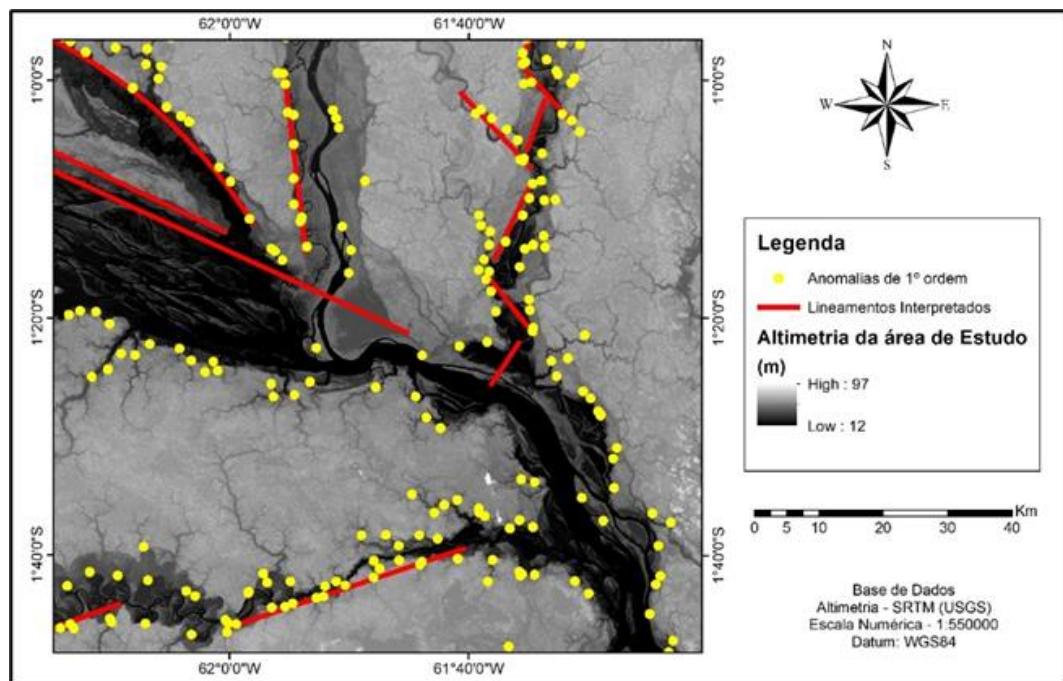
A análise dos knickpoints de drenagem, da distribuição dos lineamentos de relevo e drenagem, bem como dos dados estruturais dos afloramentos, permitiu traçar possíveis lineamentos que ocorrem na região estudada. Os knickpoints de 1^a ordem foram considerados as anomalias mais expressivas e possivelmente associadas a controles estruturais. O mapa de frequência dos knickpoints revelou que os sistemas de drenagem do rio Jauaperi, Unini, Paraná do Amajaú e rio Jufari apresentam maior controle estrutural.

A distribuição dos lineamentos de relevo e drenagem permitiu identificar alinhamentos de pontos de anomalias e direções preferenciais de fluxo de água. A análise dos dados estruturais dos afloramentos evidenciou sistemas de fraturas preenchidas por óxidos e veios, em duas direções NNW/SSW e NW/SE, e sistemas de fraturas na direção EW, sem preenchimento, possivelmente a deformação mais recente. As falhas transcorrentes, que cortam os veios de forma dextral (sentido horário), são mais novas que os veios. Zonas de falhas ocorrem nas direções NW/SE e SE/NW, porém não foi possível estabelecer relações de corte entre as estruturas anteriores.

A partir dessas informações, foram traçados possíveis lineamentos que ocorrem na região, permitindo uma melhor compreensão da estrutura geológica local e dos possíveis controles estruturais sobre a drenagem. A análise integrada dos diferentes parâmetros

morfoestruturais permitiu identificar padrões e relações entre as diferentes estruturas, fornecendo subsídios importantes para a compreensão da evolução geomorfológica da região estudada (Figura 40).

Figura 40 - Lineamentos estruturais e anomalias de relevo



Fonte: O Autor

5.1.5 Delta do rio Branco

5.1.5.1 Geoformas Deposicionais

Na região da confluência, é possível identificar diversas geoformas deposicionais (figura 41), distribuídas majoritariamente nas planícies de inundação baixa, média e alta. Essa forma reflete na atividade morfodinâmica do rio Branco, uma vez que essas geoformas estão associadas ao leito do rio Branco.

A área da foz deste rio concentra grande parte das estruturas morfológicas como as parras de pontal preservadas em ambas as margens do Branco. A distribuição das ilhas sedimentares também ocorre no centro do canal do Branco e na sua foz, na qual também apresenta linhas de acresção de antigas barras em pontal.

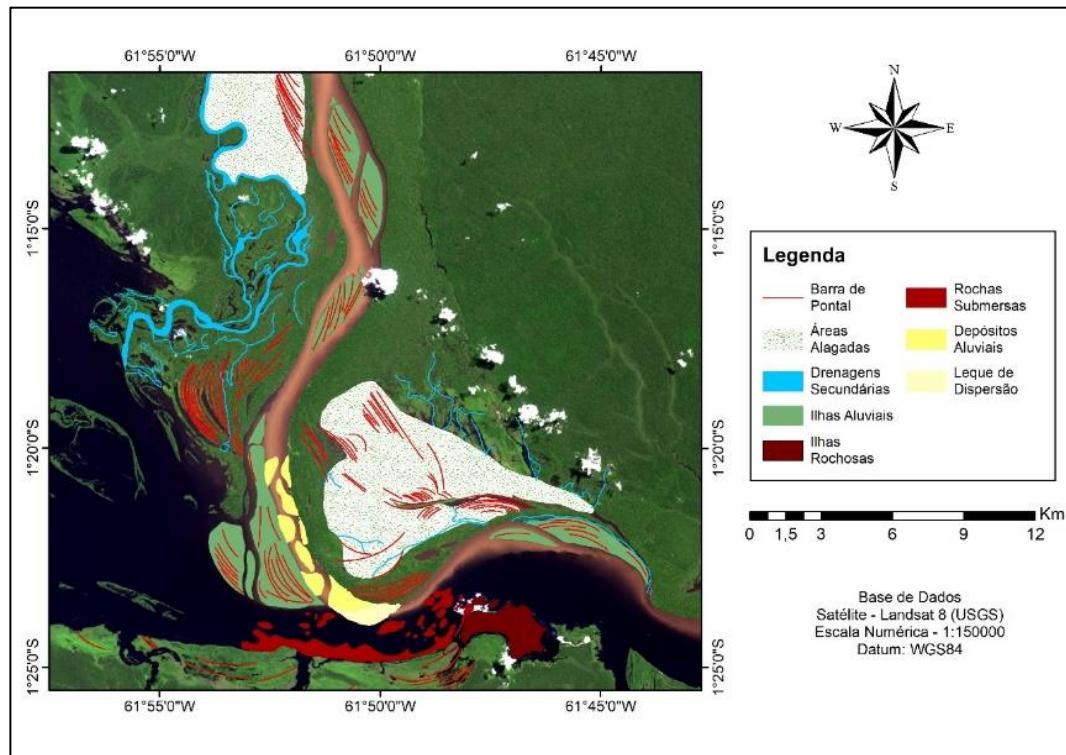
Em sua desembocadura, o trajeto do rio Branco traça uma curva acentuada a esquerda, na qual, na margem esquerda ocorre uma zona permanentemente alagada, que se intercala entre barras de pontal, tendo sua fuga de água à jusante da confluência, na comunidade do Remanso.

Na margem direita, ocorre um pequeno sistema fluvial associado ao rio Xeriuni, que corre em paralelo com o rio Branco na porção sul de Roraima, em sua parte final representado

pelo paraná do Amajaú, onde um sistema de drenagem anastomosada coexiste com grandes áreas alagáveis, também apresentando linhas de acresção lateral de barras de pontal.

A foz do rio Branco então é composta por depósitos fluviais arenosos, distribuídos espacialmente com um espalhamento para a jusante, configurando a forma de um delta, onde ocorrem ilhas fluviais alternadas e áreas alagáveis com paleoespiras de meandros.

Figura 41 - Caracterização geomorfológica do Delta do rio Branco

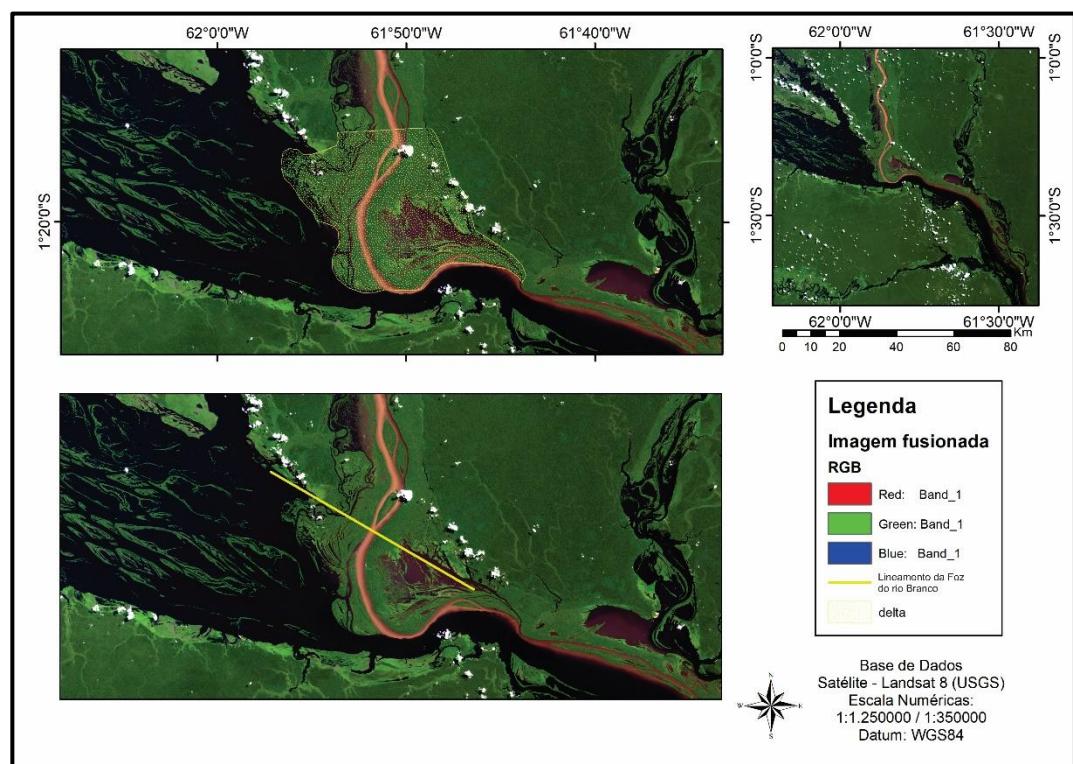


Fonte: O Autor

Os depósitos sedimentares da região da foz do rio Branco com o rio Negro, principalmente os associados aos diques marginais do rio Branco, truncam o lineamento da foz do rio branco.

Esse pode estar associado a um falhamento com componentes verticais, sejam eles normais, lístricos ou oblíquas transversais, os quais podem gerar espaço de acomodação pelo falhamento possibilitando a deposição de muito sedimento na região, que formam uma estrutura deposicional de delta na foz do rio Branco, obstruindo grande parte do canal do rio Negro, aumentando assim a sua velocidade no trecho da confluência (figura 42).

Figura 42 - Lineamento da foz do rio Branco

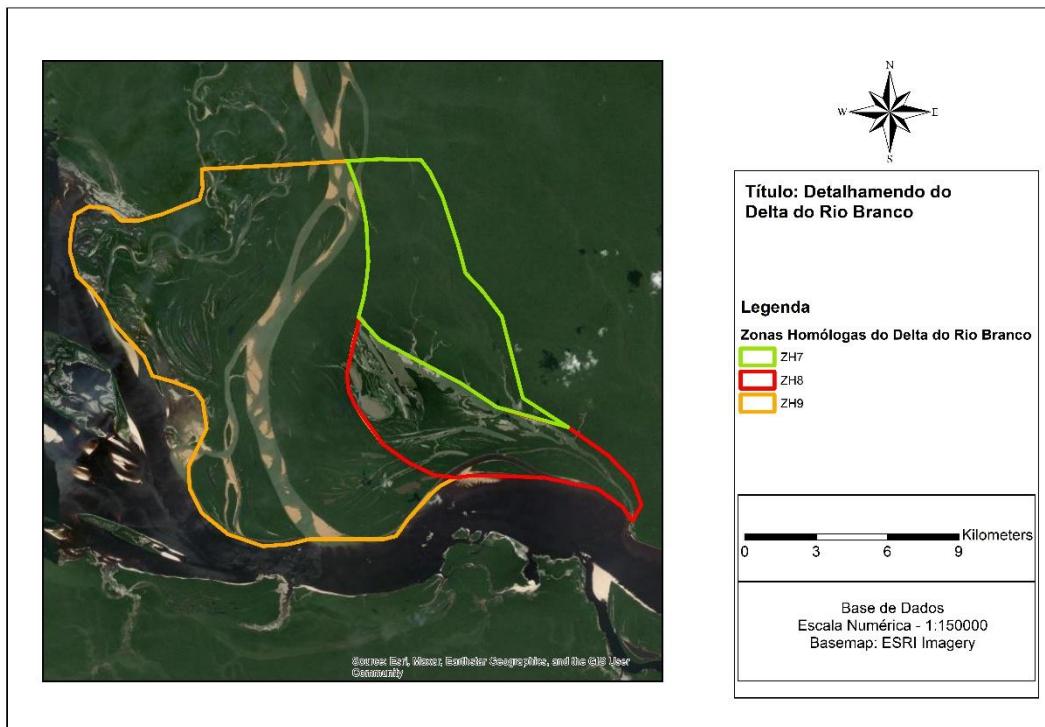


Fonte: O Autor

5.1.5.2 Zonas Homólogas

As Zonas Homólogas (ZHS) do Delta do Rio Branco são áreas que possuem características similares entre si, e que são associadas a diferentes períodos geológicos. A descrição das ZHS 7, 8 e 9 apresenta informações importantes sobre a evolução geológica da região.

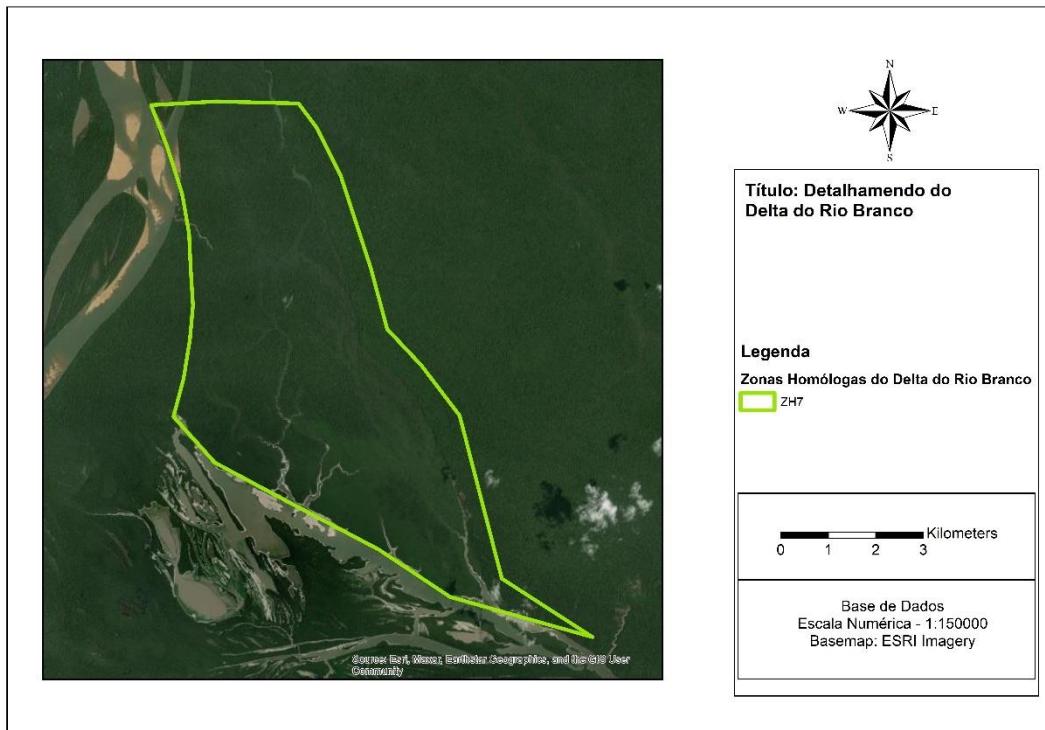
Figura 43 - Classificação das zonas homólogas da foz do rio Branco



Fonte: O Autor

A ZH7 é associada ao possível antigo leito do rio Branco, e apresenta paleodrenagens e drenagens capturadas na direção NNW-SSE, truncada pelo Lineamento da foz do rio Branco.

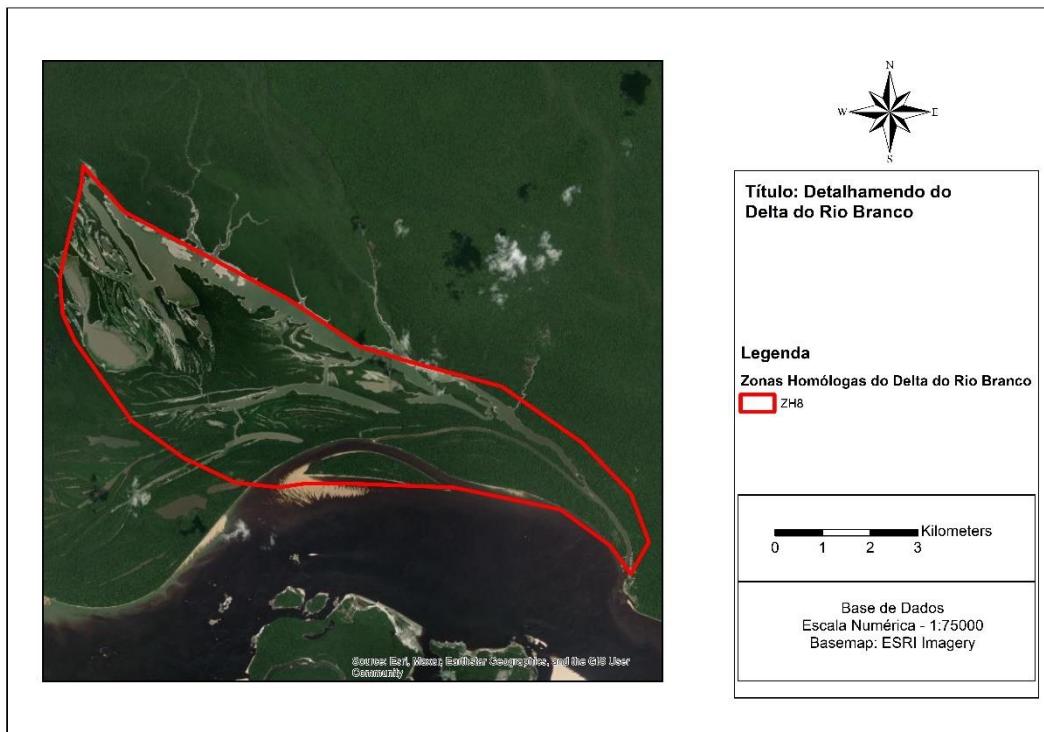
Figura 44 - Zona Homóloga 7



Fonte: O Autor

Já a ZH8 é uma zona que apresenta um aglomerado de arquiteturas geomorfológicas, desde espiras de meandro que avançam na direção NE-SW, seguindo a curvatura atual do rio Branco, como também ilhas alinhadas com a direção do suposto paleocanal da ZH7. Essa zona se apresenta posterior ao lineamento, onde atualmente se comporta como um lago, recebendo a sedimentação de rios de baixa ordem da região. Além disso, ela sofre influência direta da cheia do rio Negro.

Figura 45 - Zona Homóloga 8

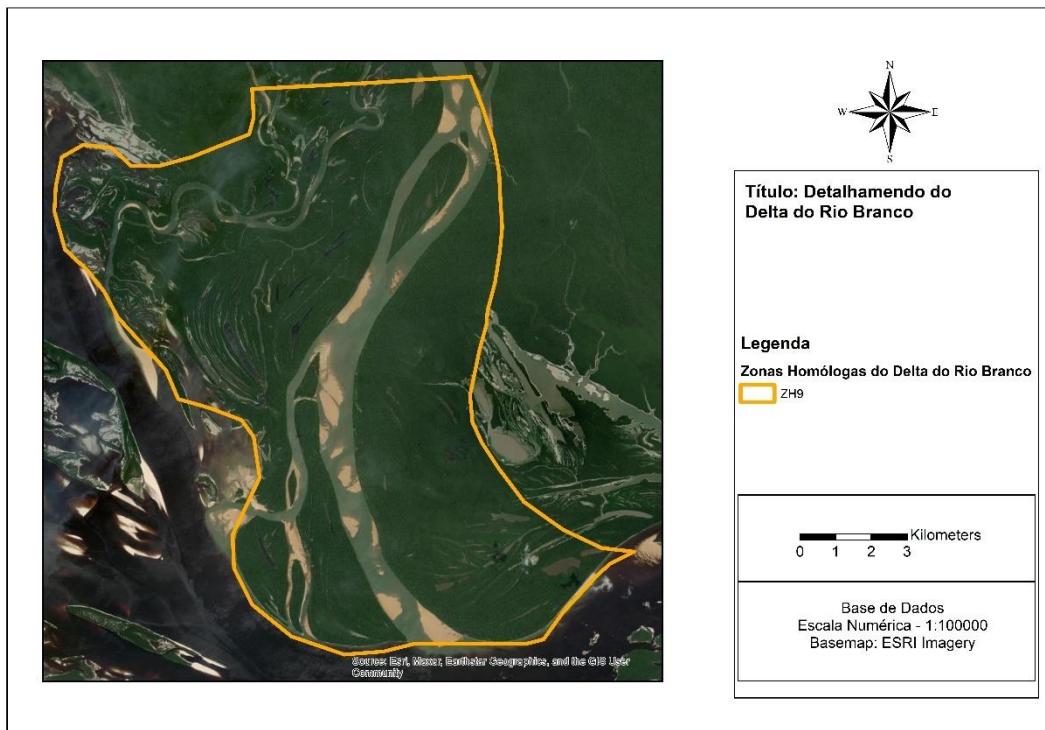


Fonte: O Autor

Por fim, a ZH9 é uma zona que apresenta depósitos fluviais e um padrão de drenagem meandrante e altamente sinuoso. Ela não é truncada pelo lineamento da foz do rio Branco, apesar de algumas drenagens se encaixarem nele. Além disso, forma um dique marginal no canal do rio Branco, o que sugere que os depósitos associados a essa zona são mais novos que o lineamento.

Essas informações são importantes para entender a evolução do delta do rio Branco ao longo do tempo, e as características geológicas que influenciaram na formação da paisagem atual da região.

Figura 46 - Zona Homóloga 9



Fonte: O Autor

A análise das zonas homólogas na região da foz do rio Branco revela que a área não é uniforme geomorfologicamente, com diferentes áreas truncadas e não conformes com o lineamento da foz. Além disso, verifica-se que a foz do Branco está em processo de reajuste do canal, possivelmente impulsionado por uma migração lateral do rio na direção E-W.

Esse processo de reajuste do canal também parece estar relacionado a uma mudança na direção do rio Branco, que pode ser atribuída ao ajuste hidromorfológico resultante da formação do lineamento da foz do Branco.

O ajuste hidromorfológico pode ter sido promovido por uma movimentação vertical de blocos e a criação de desniveis na região da foz, contribuindo para a complexidade da área e para a formação de diferentes tipos de zonas homólogas.

5.2 Análise da Drenagem

5.2.1 Classificação dos canais

5.2.1.1 Rio Branco

Antes de sua confluência com o rio Negro, o rio Branco apresenta uma alternância entre as direções do canal, sempre seguindo em direção ao sul. A dinâmica fluvial anterior na região é evidenciada pela presença de ilhas fluviais com espiras de meandro, sugerindo uma ativa dinâmica de sedimentação.

Na confluência com o rio Negro, o canal do rio Branco apresenta uma curva para o oeste. Nesta região, é possível observar a presença de depósitos sedimentares de fundo de canal, como barras laterais e longitudinais, que apresentam características arenosas. Esses depósitos sedimentares indicam uma dinâmica fluvial ativa e constante na região.

A margem direita do rio Branco é marcada pela presença de um subsistema de canais que se desenvolve em uma região plana, caracterizado por uma rede anastomosada de canais e paranás. Essa dinâmica é resultado da interação complexa entre os processos fluviais, a topografia e a hidrologia da região. A alternância entre os canais curvilíneos e os paranás com áreas alagáveis é uma característica marcante desse subsistema.

Além disso, é possível observar a presença de espiras de meandro, indicando uma dinâmica fluvial anteriormente mais ativa nessa região. A formação dessas espiras está relacionada a mudanças no fluxo do rio e na erosão das margens, que geram a formação de um novo canal e o abandono do canal antigo.

5.2.1.2 Rio Negro

Na região à montante da confluência com o rio Branco, o canal do rio Negro é marcado pela presença de vários canais, que se alternam entre as ilhas fluviais do arquipélago de Mariuá, o que caracteriza a morfologia *Anabranching* mencionado na literatura. Essa dinâmica de multicanais é um fenômeno comum em rios de grande porte, como o rio Negro, e está relacionada às mudanças na topografia do leito, gerando áreas de menor resistência que facilitam a formação de canais secundários.

Já na região da confluência com o rio Branco, apesar da curva nas margens, o canal do rio Negro apresenta características de um canal reto, com alta velocidade e poucos depósitos aluvionares. Esse trecho é marcado pela ausência de meandros e a presença de bancos rochosos na calha do rio, o que indica uma maior estabilidade do canal em relação a outros trechos. A geomorfologia local, com suas formações rochosas, é responsável por essa configuração do canal, que se mantém praticamente inalterada ao longo do tempo.

Além disso, na região da confluência, as ilhas fluviais do rio Negro são predominantemente rochosas, ao contrário das ilhas de sedimentação do rio Branco. Essa diferença na composição das ilhas é um reflexo das características dos sedimentos transportados por cada rio, aliados a morfologia do leito.

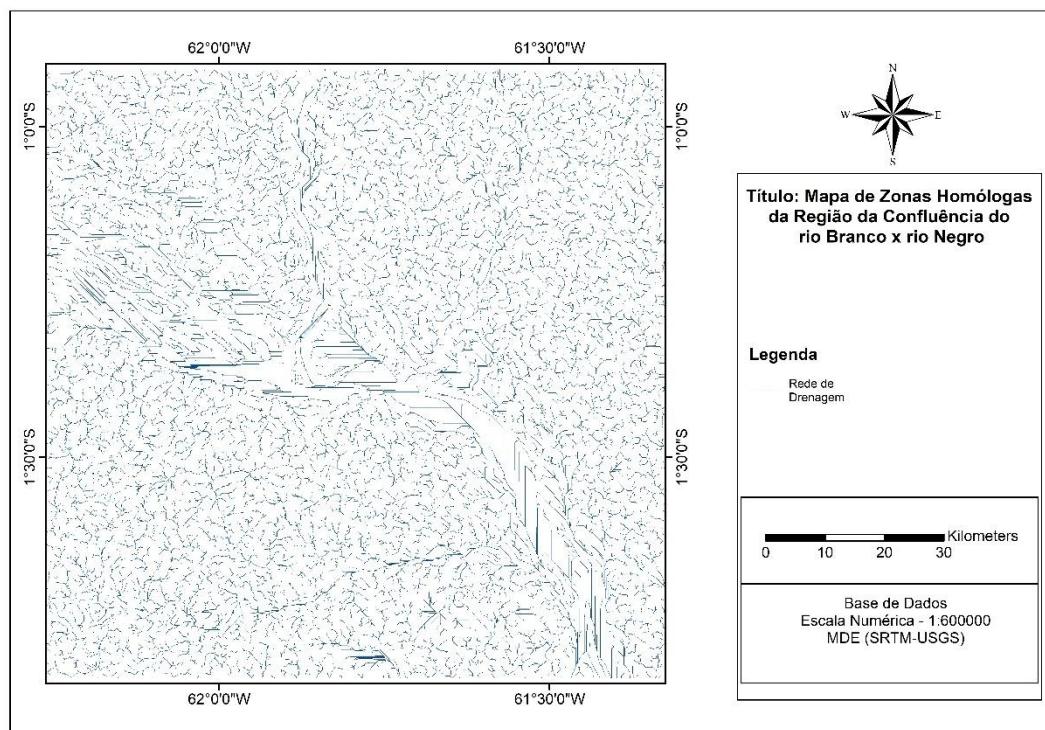
O rio Negro transporta águas de cor escura, ricas em nutrientes, mas com poucos sedimentos em suspensão. Já o rio Branco é um rio de água clara, que carrega uma grande

quantidade de sedimentos em suspensão, responsáveis pela formação de bancos de areia e ilhas de sedimentação.

5.2.2 Índices de Drenagem

O processamento do SRTM da região da confluência do rio Branco com o rio Negro permitiu a extração da drenagem, e o cálculo de índices importantes para a análise hidrológica da região, conforme o mapa (Figura 47) e a tabela abaixo:

Figura 47 - Mapa de drenagem da região da foz do rio Branco x rio Negro



Fonte: O Autor

Área Km ²	Comprimento Total dos Canais (Km)	Amplitude Altimétrica	Nº de Canais	Perímetro	Densidade da Drenagem (DD) Km/Km ²	Índice de Rugosidade	Densidade Hidrográfica (DH)	Razão de Textura
10662	11992,3	85	12094	413,046	1,1248	95,608	1,1343	29,28

Tabela de Índices de drenagem

Fonte: O Autor

Foi verificado que a amplitude altimétrica da região é de 85 metros, o que indica uma variação considerável de altitude em toda a região.

Outro dado relevante é o número de canais, que totalizou 12094, evidenciando a grande quantidade de rios e córregos presentes na área estudada. A densidade da drenagem calculada foi de 1,1248 km de seguimentos fluviais por km², indicando uma baixa densidade de drenagem, levando em consideração a escala de extração dos cursos d'água da região. Isso

mostra que a área possui uma baixa capacidade de infiltração dos cursos d'água, que pode ser resultado direto o substrato composto por rochas ígneas e metamórficas – rochas com baixíssima porosidade primária, favorecendo o escoamento em detrimento da infiltração (DEMATTÉ & DEMÉTRIO, 1998).

Além disso, o índice de rugosidade obtido foi de 95,608, o que sugere que a região possui muitas variações altimétricas, criando um relevo mais acidentado e irregular. A densidade hidrográfica foi de 1,1343 seguimentos fluviais por km², o que indica uma elevada concentração de cursos d'água na região.

Por fim, a razão de textura de 29,28 seguimentos fluviais por km, aponta para uma textura fina, com grande variedade de tamanhos e larguras de canais fluviais na região, o que pode ser um indicativo de diferentes condições geológicas ou hidrológicas presentes em diversas áreas da região.

5.2.3 Hierarquias de Drenagem

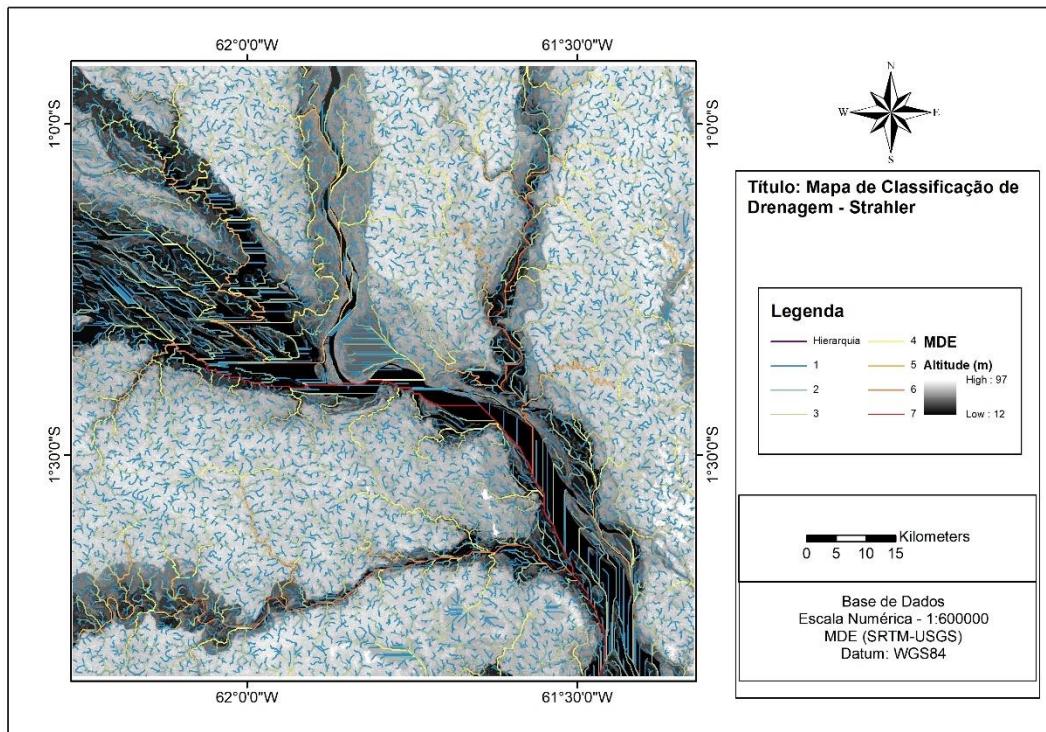
5.2.3.1 Strahler

A região da confluência do rio Branco com o rio Negro, a maioria das drenagens é de baixa ordem, no contexto da região estudada. A classificação da drenagem pelo método de Strahler, considera a ordem de uma drenagem a partir da junção de dois rios de mesma ordem. Dessa forma, quantitativamente, a maioria das drenagens da região é de baixa ordem, entre a 1^a e 2^a ordem, enquanto rios de médio porte já caracterizam as ordens 3 e 4.

No entanto, a região apresenta rios de grande porte que alcançam ordens maiores, como a ordem 6, que está associada ao Rio Branco, Rio Jauaperi, Rio Unini, Rio Caurés e ao Rio Jufari, e a ordem 7, que está associada ao Rio Negro, onde esses rios possuem seu exutório (Figura 48).

É importante ressaltar também, que a área de estudo não caracteriza uma bacia hidrográfica, portanto, a classificação de Strahler não leva em consideração um ponto único de exutório.

Figura 48 - Classificação de Hierarquia de drenagem - STRAHLER



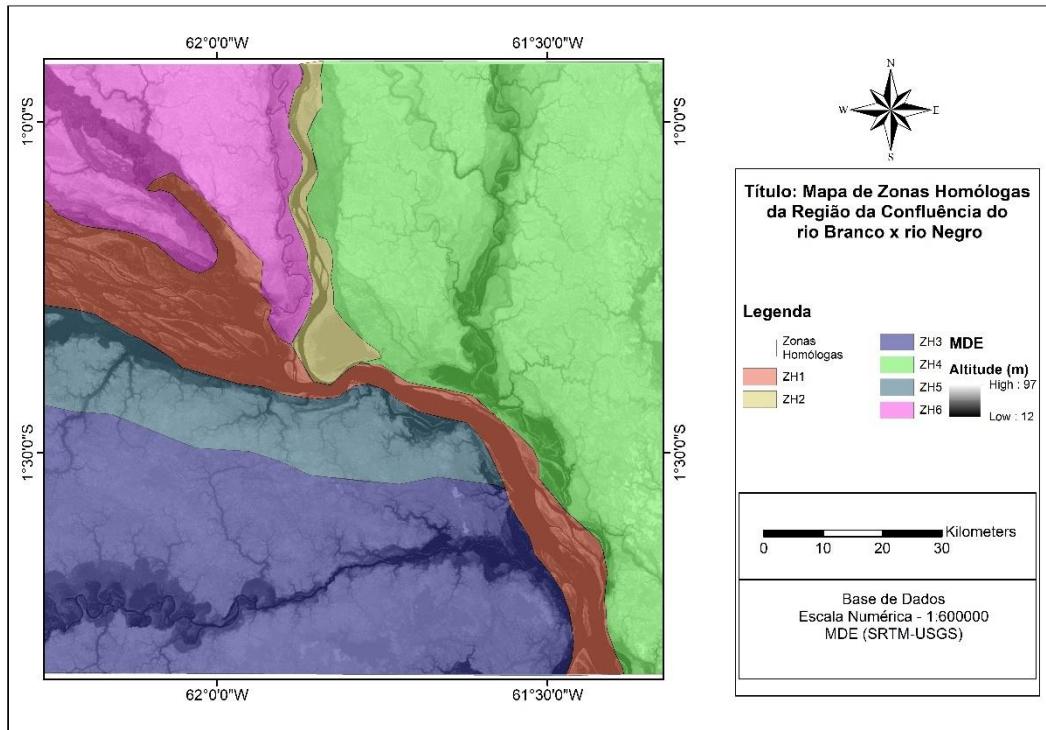
Fonte: O Autor

5.2.4 Zonas Homólogas

A classificação das zonas homólogas foi feita baseada em análise de padrões de drenagem, onde foram considerados aspectos como a densidade de drenagem, a morfometria dos canais, as características dos trechos fluviais e a presença de processos geomorfológicos relacionados à dinâmica fluvial.

Esses aspectos foram utilizados para identificar zonas com padrões de drenagem semelhantes, conforme abaixo (Figura 49):

Figura 49 - Zonas Homólogas da região da confluência do rio Branco x rio Negro



Fonte: O Autor

As zonas homólogas ZH1 e ZH2 estão associadas aos canais fluviais do rio Negro e do rio Branco, respectivamente. Na ZH1, que é caracterizada pelo canal do rio Negro, é possível encontrar ilhas fluviais, rochas expostas e outros processos de sedimentação e transporte fluvial. Já na ZH2, associada ao canal do rio Branco, destacam-se as ilhas fluviais e as áreas alagáveis do delta fluvial.

No entanto, é importante ressaltar que, devido à extensão dos canais, a extração automática da rede de drenagem pode gerar seguimentos retilíneos com alta densidade, o que pode levar a erros nas análises geométricas. Esses segmentos retos precisam ser descartados em análises futuras, uma vez que estão relacionados diretamente com as limitações do levantamento dos dados do SRTM.

As Zonas Homólogas 3 e 4 são regiões de terra firme com drenagem multidirecional desordenada, meandros e curvas anômalas nos rios, além de apresentarem densidade de drenagem média.

A Zona Homóloga 5, por sua vez, está associada à margem direita do rio Negro e caracteriza-se por canais de baixa ordem e baixa extensão. No entanto, ainda apresentam drenagens multidirecionais, de baixa angulosidade e densidade média.

Por fim, a Zona Homóloga 6 é uma região de terra firme com drenagem multidirecional ordenada, baixa angularidade e densidade de drenagem alta. É importante

destacar que a delimitação dessas zonas não leva em consideração a existência de uma bacia hidrográfica única na região da confluência do rio Branco com o rio Negro, mas sim a similaridade das características geológicas e geomorfológicas entre as áreas delimitadas.

A compreensão das interações homólogas pode contribuir para a elaboração de políticas públicas e tomada de decisão em relação ao uso e ocupação do solo, bem como para a conservação e preservação da região.

5.2.5 Anomalias de Drenagem

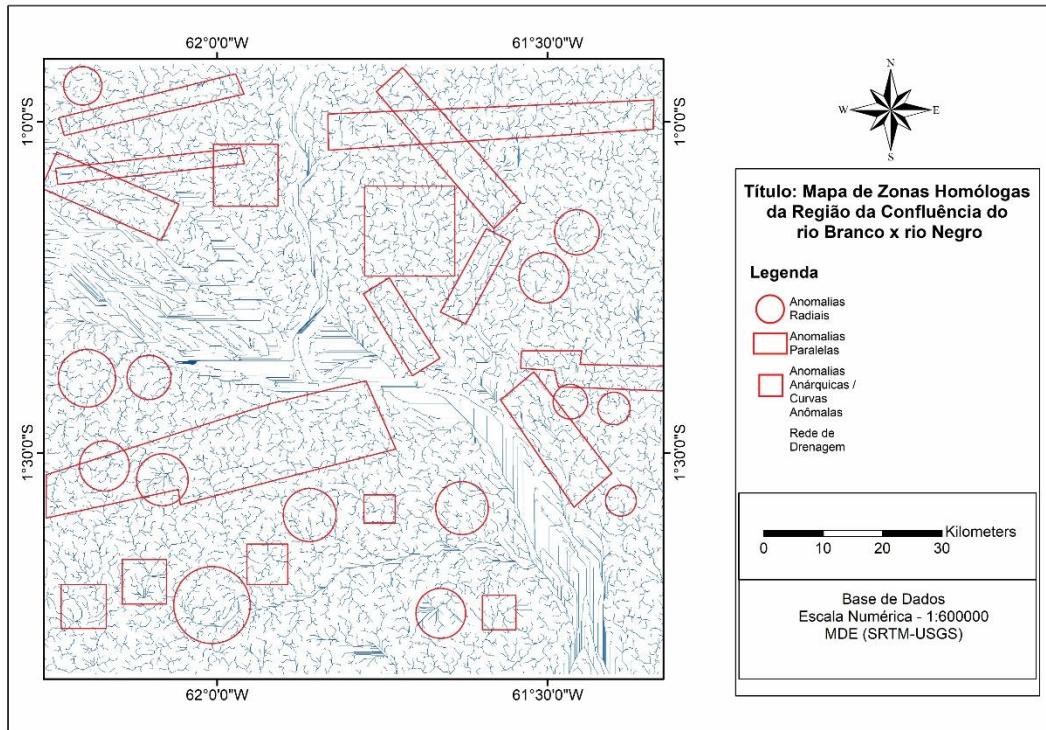
De modo geral, a rede de drenagem da região pode ser classificada como subdendrítica (PARVIS, 1950), porém localmente ocorrem variações nesse padrão (Figura 50).

Na área de confluência do rio Branco com o rio Negro foram identificados três tipos gerais de anomalias com base na classificação de Howard, 1967. As anomalias radiais, que ocorrem predominantemente de forma centrífuga, podem estar associadas a estruturas circulares positivas, como domos ou morros, ou negativas, como bacias. A presença dessas anomalias na zona homóloga 3 também ocorre de forma centrípeta.

As anomalias paralelas, por sua vez, caracterizam padrões fluviais do tipo treliça direcional e padrões angulares (HOWARD, 1967), são associadas a extensões de drenagens que possuem a mesma direção, e foram identificadas nas zonas homólogas 3, 4, 5 e 6.

Já as anomalias anárquicas ou curvas anômalas estão associadas padrões de drenagens contorcidos, resultantes de mudanças pontuais e disruptivas na forma dos canais fluviais, com alta angulosidade, e ocorrem na forma de meandros isolados de alta sinuosidade e curvas abruptas do canal. Essas anomalias podem indicar uma mudança na resistência do substrato ou uma acomodação reológica do canal.

Figura 50 - Anomalias de drenagem da região da foz do rio Branco x rio Negro



Fonte: O Autor

5.3 Análise da Confluência

5.3.1 Características Hidrográficas da Confluência

Parameter	Negro river	Branco river
Drainage Area (km ²)	403,973	193,964
Slope (mm.mm)	0.08	0.10
Sinuosity	1.13	1.22
Water discharge (m ³ .s ⁻¹)	24,127	3,187
Average velocity (m.s ⁻¹)	0.80	0.68
Average depth (m)	15.15	5.44
Average width (m)	2,242	955
width/depth	148	176
pH	4.74	6.91

Tabela de dados hidrográficos dos rios Branco e Negro.

Fonte: Marinho *et.al.* (2022)

A tabela apresenta parâmetros comparativos entre os rios Negro e Branco, da região amazônica. O rio Negro possui uma área de drenagem consideravelmente maior, com 403,973 km², em comparação com os 193,964 km² do rio Branco. Em relação à declividade, o rio Branco é mais inclinado, com 0,1 mm/mm, enquanto o rio Negro possui 0,08 mm/mm.

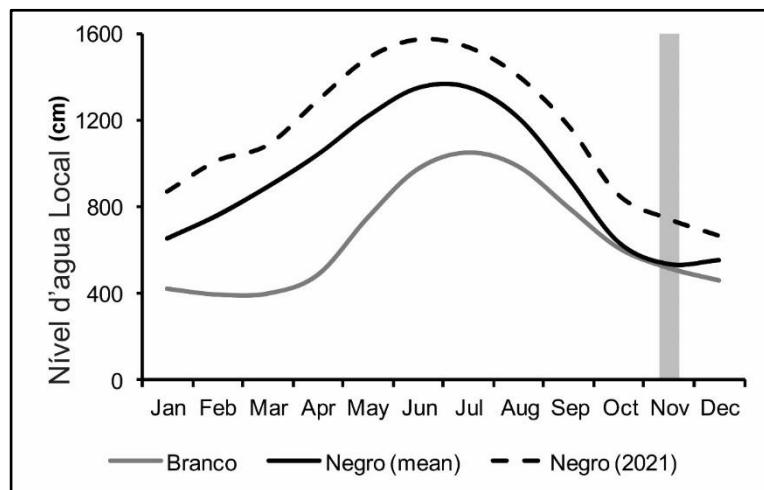
O índice de sinuosidade é outra medida comparativa importante, indicando o grau de curvatura do canal. O rio Branco apresenta um índice de sinuosidade de 1,22, sendo mais curvo do que o rio Negro, cujo índice é 1,13.

Quanto à descarga, o rio Negro tem uma média de 24,127 m³/s, muito maior do que os 3,187 m³/s do rio Branco. Essa diferença pode ser atribuída à área de drenagem maior do rio Negro e sua posição em relação à bacia amazônica, onde recebe contribuições do clima, floresta e águas subterrâneas.

Em termos de velocidade média, o Negro registra 0,8 m/s, enquanto o Branco apresenta 0,68 m/s. Além disso, o rio Negro é mais profundo, com uma média de 15,15 m, em comparação com os 5,44 m do rio Branco. A largura média do Negro também é maior, com 2242 m, em comparação com os 955 m do Branco.

Por fim, o pH do rio Negro é ácido, com 4,74, enquanto o rio Branco é menos ácido, com um pH de 6,91. Esses parâmetros destacam as diferenças entre os dois rios e suas características hidrológicas e químicas distintas.

Figura 51 - Hidrograma comparado dos rios Branco e Negro



Fonte: Marinho *et.al.* (2022)

A análise das curvas hidrográficas dos rios na região de confluência permite observar o seu comportamento ao longo do ano (Figura 51). Nota-se que as curvas são semelhantes, com épocas de cheia entre os meses de abril e agosto e de seca entre setembro e dezembro.

Essa similaridade se deve à influência da alta descarga do rio Negro na região, que promove tanto o barramento, quanto facilita o escoamento do rio Branco. Destaca-se ainda a diferença das médias de nível d'água, que só diminuem no mês de outubro-novembro, período em que os rios apresentam o mesmo nível d'água.

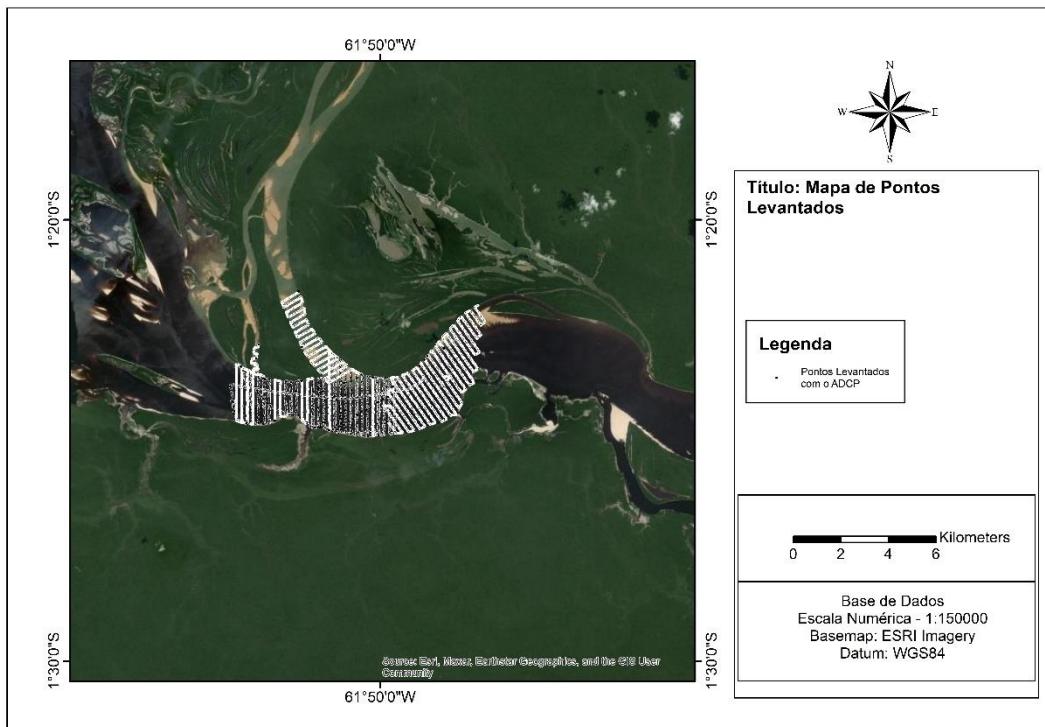
No entanto, é importante ressaltar que eventos extremos, como a cheia histórica do rio Negro em 2021, podem alterar significativamente o comportamento hidrológico da região (Porto de Manaus, 2022). Nesse caso, o aumento do nível d'água em cerca de 2 metros afetou a dinâmica dos depósitos aluvionares no rio Branco, que ficaram submersos durante a época de seca.

5.3.2 Estatística descritiva dos dados levantados em campo

Os dados coletados em campo foram realizados por meio de perfis transversais com um espaçamento de 250 m, iniciando sentido montante pela Pedra do Gavião e levantados por um período de 12 dias, em junho e novembro de 2021 (Figura 52).

Foram coletados dados antes da confluência, na confluência e após a confluência dos rios Branco e Negro, bem como em uma parte do paraná Panacarica. No mapa abaixo, é possível visualizar a disposição dos pontos de coleta de dados. Após o levantamento, os dados foram selecionados e tratados de acordo com a tabela fornecida.

Figura 52 - Dados levantados na confluência do rio Branco x rio Negro



Fonte: O Autor

	Negro River			Branco River
	Upstream Confluence	Confluence	Downstream Confluence	
Number of profiles	16	13	26	29
Average depth (m)	15.15	13.10	13.42	5.44
Maximum depth (m)	30.46	28.28	30.42	12.75
Minimum depth (m)	1.08	2.40	1.06	0.99
Median (m)	15.32	12.91	13.89	5.14
Standard deviation	5.60	6.47	5.71	1.90
Amplitude	29.38	25.88	29.36	11.76

Tabela da estatística descritiva dos dados levantados

Fonte: Marinho *et.al.* (2022).

5.3.3 Batimetria e Velocidade de Fluxo

5.3.3.1 *Geoformas deposicionais e batimétricas*

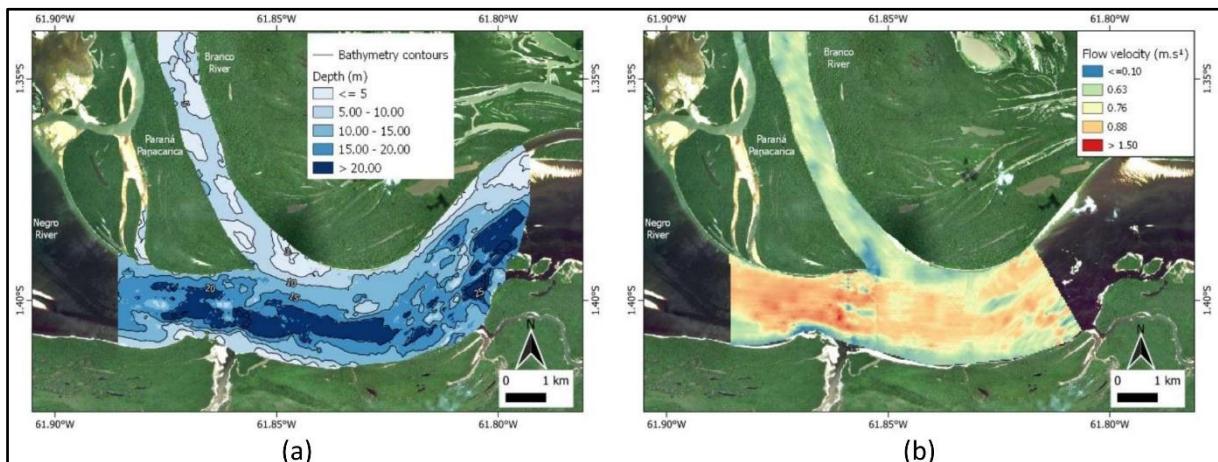
Uma diferença significativa entre os rios é a profundidade. Segundo a batimetria, o rio Negro é mais profundo do que o rio Branco, com uma diferença que pode chegar a uma razão de 3:1 em alguns pontos (Figura 53).

Outra diferença importante é a presença de depósitos fluviais e aluviais. Enquanto o Branco possui muitos desses depósitos, como barras laterais e longitudinais, o Negro tem uma ausência predominante desses depósitos. Além disso, as ilhas do Branco são formadas por acúmulo de sedimentos, enquanto as ilhas do Negro são rochosas, o que implica também, nas diferenças de rugosidade do leito, sendo alta no Negro (Figura 53).

A segmentação do rio Branco em direção à calha do rio Negro é claramente visível na batimetria, gerando uma pluma de sedimentos na direção NW-SE. No entanto, existe um limite acentuado entre os dois rios devido às diferenças de profundidade de seus leitos. Além disso, a largura do Negro é maior que a do rio Branco.

Foi traçado um perfil batimétrico na região da confluência, conforme a figura 56, que mostra as diferenças morfológicas dos leitos dos rios Branco e Negro. O rio Branco possui baixa variação batimétrica, resultando em baixas declividades e baixa rugosidade. Por outro lado, o leito do rio Negro apresenta as maiores profundidades, alta rugosidade e alta declividade. Os talvegues fluviais dos rios Branco e Negro têm uma diferença de profundidade de 20 metros.

Figura 53 - Batimetria e Velocidade de fluxo da confluência do rio Branco x rio Negro



Fonte: Marinho *et.al.* (2022)

5.3.3.2 Velocidade de Fluxo e Caracterização Hidrodinâmica

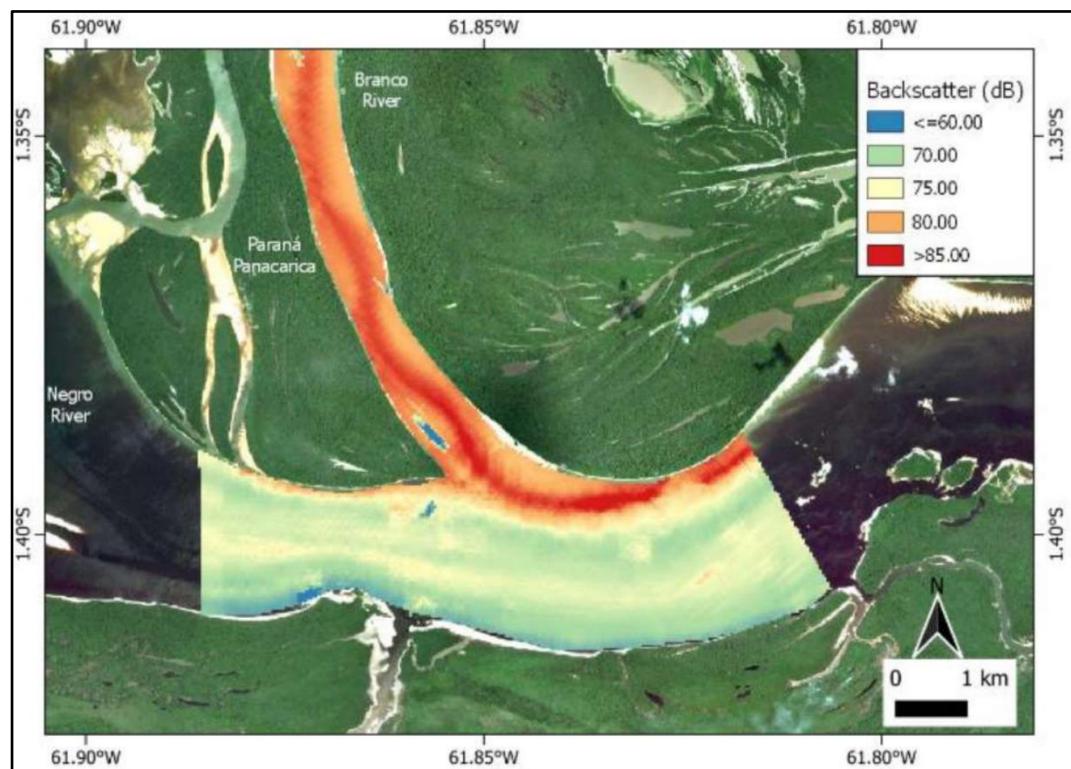
A velocidade do fluxo na confluência, como mencionado, apresenta características distintas entre os rios. Enquanto o Negro apresenta uma velocidade até três vezes maior que o rio Branco (Figura 53).

A variação na velocidade local do Branco está diretamente relacionada à morfologia do fundo, onde a presença de barras laterais ou longitudinais tende a aumentar a velocidade. Por outro lado, o Rio Negro apresenta suas maiores velocidades antes da confluência, onde ocorrem as maiores profundidades.

A alta velocidade do Rio Negro é explicada pelo ajuste de vazão. Antes da confluência, o Rio Negro possui cerca de 18 km de margem, e na região da confluência, essa largura é reduzida para até 1,5 km. Para manter a vazão, o Rio Negro aumenta a velocidade e, como resultado, a presença de depósitos arenosos no meio do canal é praticamente inexistente, à exceção da carga de fundo. Além disso, o Rio Negro apresenta rochas expostas em seu leito, o que gera vórtices, conhecidos regionalmente como rebojos. Esses vórtices podem ter impactos na navegação e na morfologia do fundo.

5.3.4 Retroespalhamento

Figura 54 – Disposição do retroespalhamento (sinal +dB) da confluência do rio Branco x rio Negro



Fonte: Marinho *et.al.* (2022)

A disposição espacial dos dados de retroespalhamento (dB) é um indicativo importante da variação do sedimento em suspensão (Filizola et al., 2004) na região da confluência entre o rio Branco e o rio Negro. Observa-se que o rio Branco apresenta os maiores valores de retroespalhamento, indicando uma grande quantidade de sedimento em suspensão (Figura 55).

Além disso, os sedimentos em suspensão desse rio apresentam suas maiores concentrações associadas ao leito do rio, o que permite inferir a posição do leito, no mapa. Em áreas próximas aos depósitos fluviais, o sinal de retroespalhamento é menor.

Já no caso do rio Negro, o sinal de retroespalhamento é muito pequeno, indicando possuir baixíssimas quantidades de sedimento em suspensão. Isso se deve às características gerais do rio Negro, que por possuir uma média velocidade baixa em relação aos demais rios da bacia amazônica, não carrega muito sedimento em suspensão.

Porém, localmente, devido às configurações geomorfológicas do canal do rio Negro, associadas ao enforcamento do canal pelo leque de dispersão de sedimentos do delta do rio Branco, o aumento da velocidade gera um barramento hidráulico nas águas do seu afluente, que impede que os sedimentos do Branco adentrem na região do leito do rio Negro, mantendo-os na margem esquerda do rio após a confluência.

Portanto, enquanto o rio Branco apresenta uma alta taxa transporte de sedimentos em relação ao Negro, que apresenta uma dinâmica sedimentar mais restrita, as interações entre a dispersão do sedimento são diretamente influenciadas pelo aumento da velocidade do negro na região da confluência, que se torna até três vezes mais rápido que seu afluente.

5.3.5 Relações Hidrodinâmicas

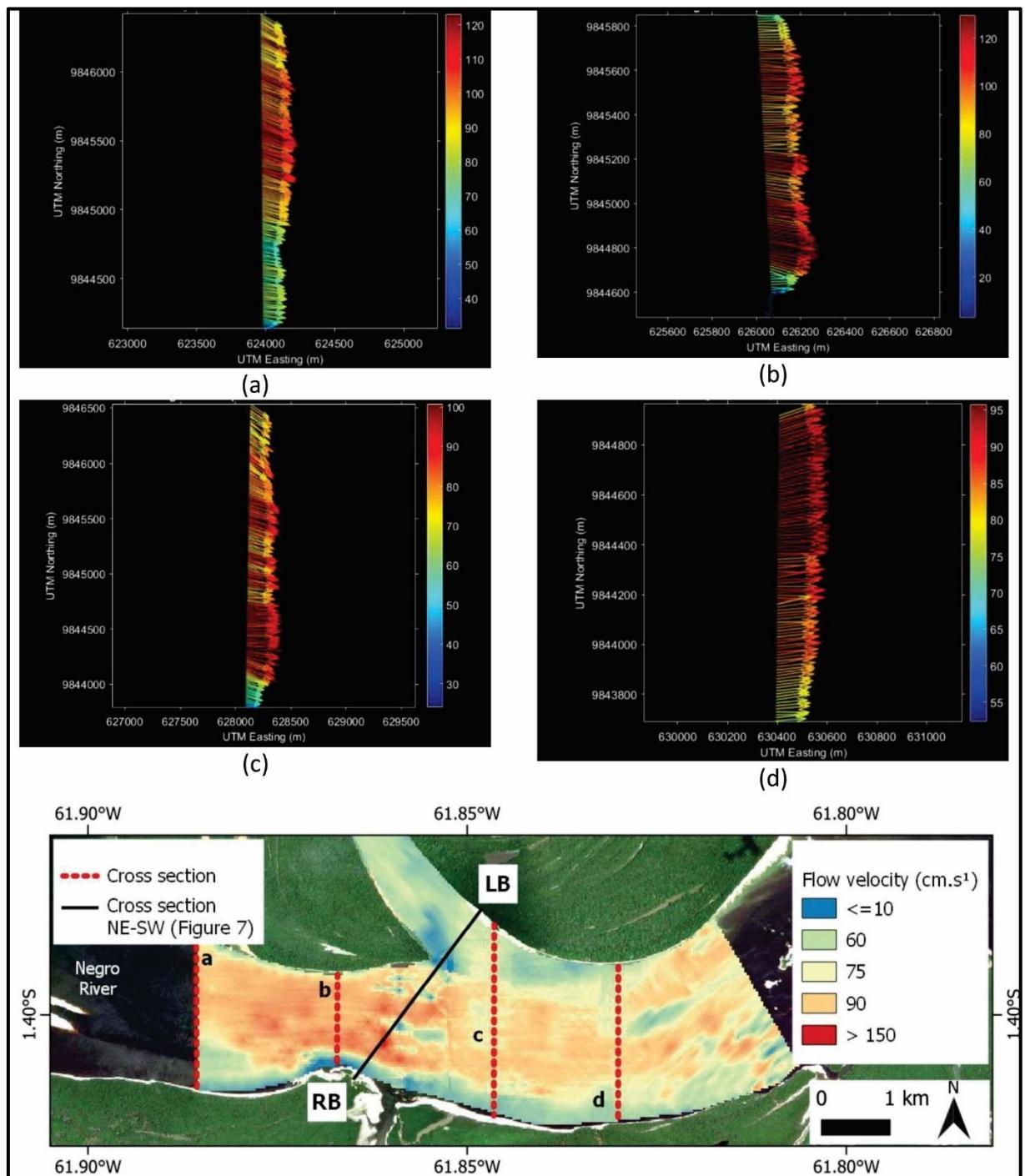
5.3.5.1 *Velocidade de Fluxo / Direção de Fluxo*

Os perfis de velocidade e direção de fluxo dos rios da confluência apresentam características distintas em cada um dos trechos analisados (Figura 55). No perfil A, localizado anteriormente à confluência, a direção de fluxo é uniforme, com velocidades variando de 40 a 120 cm/s, sendo que a parte central do perfil apresenta as maiores velocidades. Já o perfil B, também anterior à confluência, possui intercalações espaciais causadas pelo aumento da rugosidade do leito, mas ainda apresenta direção de fluxo uniforme.

Após a confluência, o perfil C apresenta uma disposição das linhas de fluxo na direção NE-SW na parte norte, associada ao canal do rio Branco, e na parte sul, apresenta a disposição anterior do rio Negro. Essa disposição permite confirmar o ângulo de incidência do canal do rio Branco no rio Negro. No perfil D, posterior ao perfil C, a direção de fluxo também é uniforme, mas ocorre uma variação na velocidade, com as maiores velocidades próximas da margem esquerda do rio.

As diferenças nos perfis de velocidade e direção de fluxo dos rios da confluência estão relacionadas às características dos rios e do leito fluvial em cada trecho analisado. A uniformidade na direção de fluxo e a variação na velocidade estão relacionadas à morfologia do fundo, à presença de depósitos fluviais, à rugosidade do leito e à variação na vazão dos rios.

Figura 55 - Perfis longitudinais comparativos da confluência do rio Branco x rio Negro



Fonte: Marinho *et.al.* (2022)

Figura 56 - Perfil batimétrico da confluência do rio Branco x rio Negro



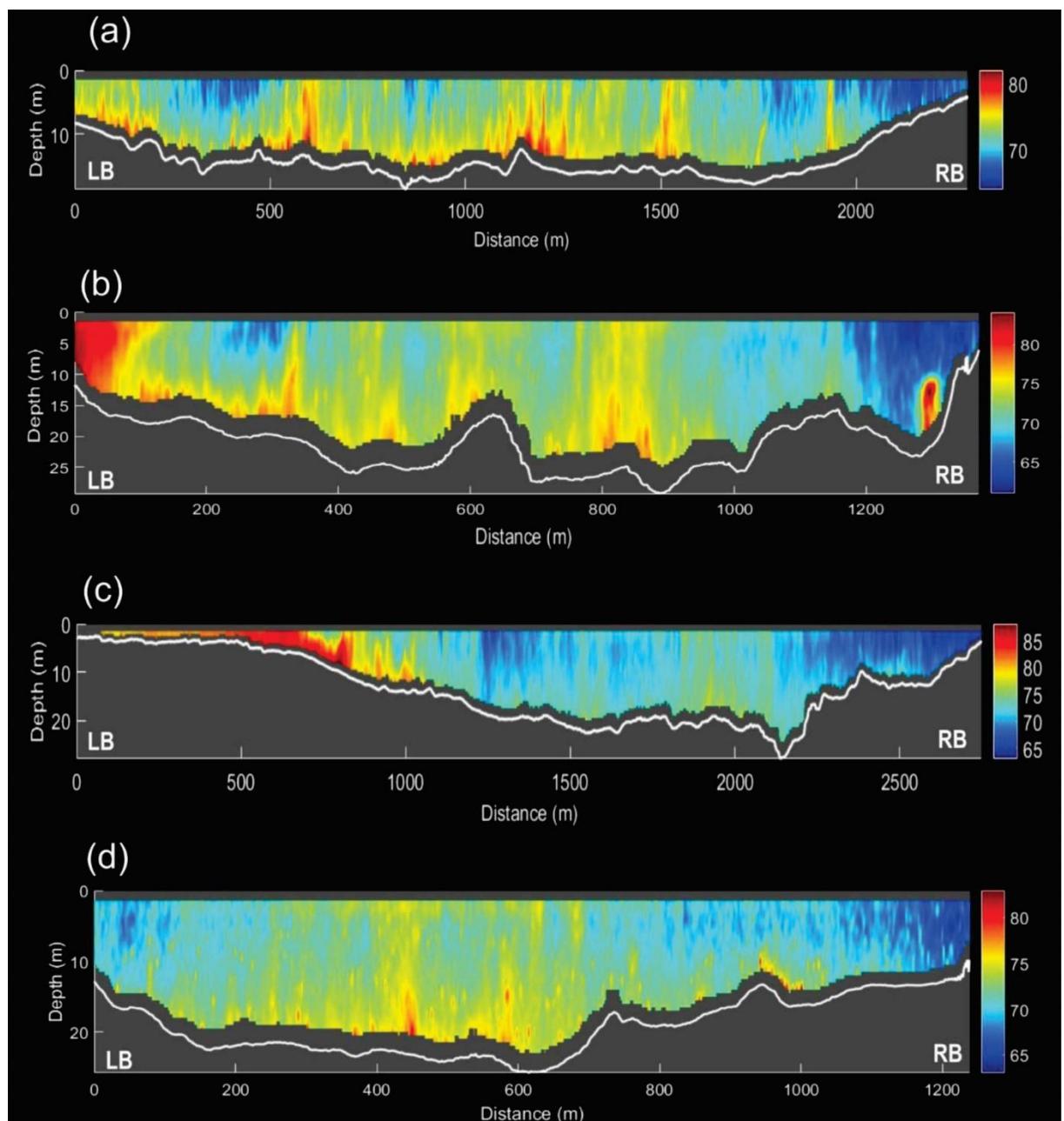
Fonte: O Autor

5.3.5.2 Profundidade x Retroespalhamento

A análise dos perfis de batimetria/retroespalhamento é importante para entender a distribuição dos sedimentos no fundo do rio e em suspensão na água (Figura 57). No perfil A, é possível observar que as maiores variações do retroespalhamento ocorrem no centro do canal em picos verticais, o que pode indicar a remobilização da carga de fundo devido à alta velocidade. Já no perfil B, além das variações observadas no perfil anterior, há uma concentração maior de sedimentos na margem esquerda do rio, que pode estar associada à entrada de um paraná do rio branco nessa área.

No perfil C, é possível identificar as variações batimétricas da calha do rio branco e do rio negro, associando às maiores concentrações de sedimentos em suspensão na calha do branco. Por fim, o perfil D apresenta uma situação semelhante ao perfil A, com o retroespalhamento associado à remobilização do material de fundo.

Figura 57 - Perfis profundidade x retroespalhamento da confluência



Fonte: Marinho *et.al.* (2022)

6 DISCUSSÕES

6.1 Análise do Relevo e Drenagem

A compartimentação geomorfológica do relevo quanto a sua altitude possui alta relevância no contexto de uma confluência onde há pouca ou quase nenhuma intervenção humana no terreno, baixa variabilidade da vegetação e baixa variação altimétrica. Com isso, a identificação e separação das planícies de inundação à semelhança de Cremon, 2016, mostra que o rio branco possui particularidades ao longo de sua extensão, onde o método comparativo entre imagens de satélite e radar pode não ser o mais eficiente em todo o rio Branco.

A região da confluência do rio Branco com o rio Negro apresenta múltiplos indicadores de controle tectônico, incluindo estruturas tectônicas e neotectônicas que possuem relações de corte entre si. Essa complexidade sugere que a drenagem possivelmente está sendo aproveitada por ambas as estruturas.

A análise dos lineamentos indica que os trends principais são evidenciados pelas anomalias de drenagem observadas. A declividade da região também parece estar associada aos lineamentos de relevo e drenagem, já que as áreas de maior declividade, em sua maioria, coincidem com os lineamentos de relevo.

Os perfis topográficos em faixa indicam uma assimetria topográfica tanto nas margens do rio Branco quanto nas margens do rio Negro, o que sugere que a evolução da paisagem pode estar relacionada tanto a fatores exógenos quanto endógenos.

6.1.1 Estrutural

A região também possui trends de lineamentos estruturais bem característicos ao modelo de transcorrência dextral da Amazônia, proposto por Costa et. al., 1996, onde os trends NW-SE correspondem a falhamentos normais, como o rio negro a montante da confluência, no arquipélago de Mariuá, falhamentos transcorrentes na direção E-W combinados a lineamentos NE-SW gerando anomalias de drenagem, porém um grande lineamento N-S, caracterizado pelo rio Branco não é citado pelo autor.

Apesar de possuir diversos lineamentos na área de estudo, os principais encontram – se nas margens do rio Negro e ao longo do rio Branco, lineamentos que não são completamente citados, a exemplo do rio Branco, onde apenas Rosseti et. al., 2019 faz uma menção, porém sem ainda caracterizar o movimento.

Nos falhamentos normais que ocorrem nas margens do rio Negro, existem caracterizações importantes como Alves et.al., 2020 e Forsberg, 2000, porém a extensão da

estrutura em sua margem direita se limita a antes da confluência, o que este trabalho mostra que se estende para depois do encontro dos dois rios.

Latrubesse & Franzinelli, 2005 mostram a evolução quaternária da região do arquipélago de Mariuá, e como a tectônica aliada a taxas de erosão e deposição ajudam a formar as ilhas e planícies de inundação.

A tectônica desempenha um papel fundamental na região, pois em rios com grandes volumes de água e alta taxa de sedimentação, os movimentos crustais causam alterações no canal, no espaço de acomodação e nas linhas de base, resultando em sedimentação em locais específicos.

A área de estudo apresenta sistemas de veios e fraturas com diversas hierarquias, o que sugere a ocorrência de mais de um evento de deformação. A presença de falhas transcorrentes, em diferentes cinemáticas e escalas, é visualizada em toda a região, desde afloramentos até escala regional.

Em conjunto com os *Knickpoints*, é possível identificar os principais lineamentos estruturais da área, que estão frequentemente associados aos rios. O lineamento da foz do rio Branco, por exemplo, possivelmente está relacionado a movimentação de blocos, seja por basculamento ou verticalmente. Além disso, sua direção é próxima à das falhas transcorrentes, logo a formação do lineamento teve um papel importante na configuração atual da confluência do rio Branco com o rio Negro.

6.1.2 Delta do rio Branco

A grande estruturação neotectônica situada na margem esquerda do Rio Negro produziu um espaço de acomodação gerado por movimentação de blocos com componente vertical. Este processo possibilitou a deposição dos sedimentos na região através de uma morfologia de delta no Rio Branco (LATRUBESSE & FRANZINELLI, 2005), que ao penetrar no vale do Rio Negro contribuiu de forma significativa para a atual morfologia desta confluência.

O detalhamento das geoformas deposicionais encontradas na foz do Branco, nos indica que aquela região possui uma idade relativamente menor quando comparada ao rio Negro, que permanece praticamente estática devido ao seu leito rochoso. Nesse sentido, as pequenas diferenças altimétricas entre os terraços do rio Branco indicam que o desenvolvimento de sistemas fluviais subordinados só pode ocorrer em sua margem direita, como se confirma por imagens de satélite.

A análise da geomorfologia permite compreender as características do delta, como a morfologia e a distribuição dos canais fluviais e dos depósitos sedimentares. A presença do lineamento tectônico é evidenciada pela existência de falhas transcorrentes e pela orientação dos canais fluviais e depósitos sedimentares, que acompanham a direção do lineamento.

O delta do rio Branco está em evolução, com processos dinâmicos que influenciam a paisagem local. Um dos principais fatores que contribuem para essa evolução é o processo de ajuste do canal do rio, devido à migração lateral no sentido E-W. Esse processo é evidenciado pelas espiras de meandro. À medida que o canal do rio se ajusta e se movimenta lateralmente, as espiras de meandro se formam e se deslocam com o canal, contribuindo para a mudança da paisagem local.

O lineamento da foz do rio Branco, como resultado de um processo tectônico, foi responsável por uma mudança drástica na direção do canal fluvial, causando uma rotação de aproximadamente 90º para o sudoeste. Essa mudança deixa um paleovale, que se transforma em uma atual zona alagada.

Como consequência, a mudança de direção do rio e o provável aumento do espaço de acomodação causaram um aumento significativo na taxa de sedimentação na foz do rio Branco, o que originou o atual Delta. Esse delta se acomoda no leito do rio Negro, o que resulta em um "enforcamento" de drenagem, ou seja, um barramento físico em seu leito. Esse processo de evolução é complexo e ainda está em andamento.

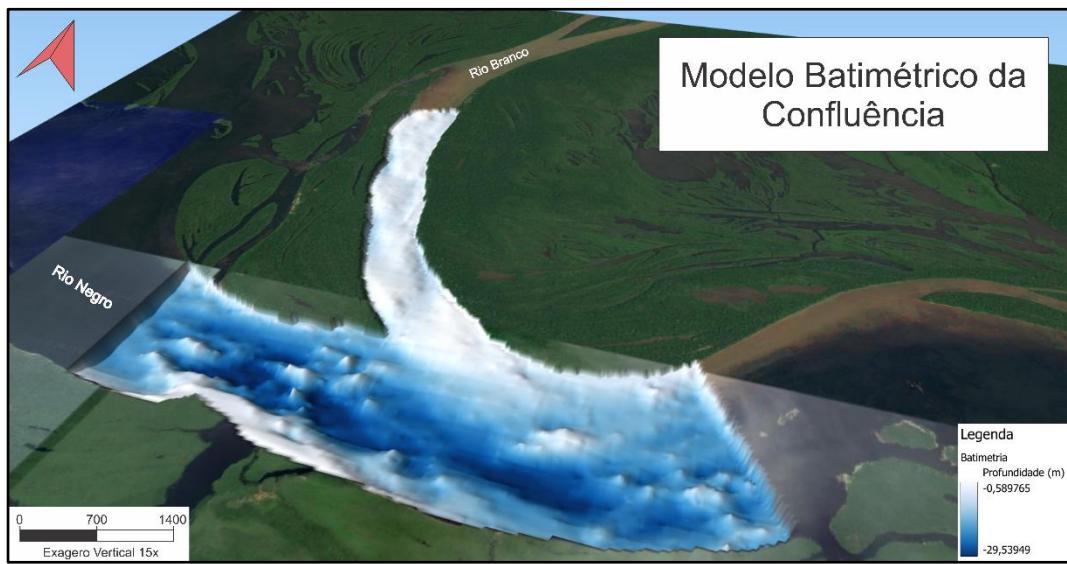
Logo, os dados fornecem uma importante constatação, para além das descrições geomorfológicas realizadas por Cremon (2017) e Latrubesse & Franzinelli (2005): A paisagem da foz do rio Branco possui uma taxa de modificação ativa, está em processo de ajuste e possivelmente representa uma morfologia mais recente que os arquipélagos à montante (Mariuá) e à jusante (Anavilhanas), devido às relações estruturais encontradas.

6.2 Análise da Confluência

6.2.1 Morfologia de Fundo

A análise comparativa entre o rio Branco e o rio Negro evidencia marcantes contrastes morfológicos, com diferenças significativas nas profundidades dos seus leitos fluviais. O rio Branco apresenta um leito predominantemente arenoso, com o desenvolvimento de depósitos aluviais. A profundidade média máxima atinge 15m, variando de acordo com o regime hidrológico. Em contraste, o rio Negro possui um leito rochoso, com profundidade média de 25m e podendo chegar a até 35m no talvegue principal, também variando com o regime hidrológico.

Figura 58 - Modelo digital batimétrico da confluência



Fonte: O Autor

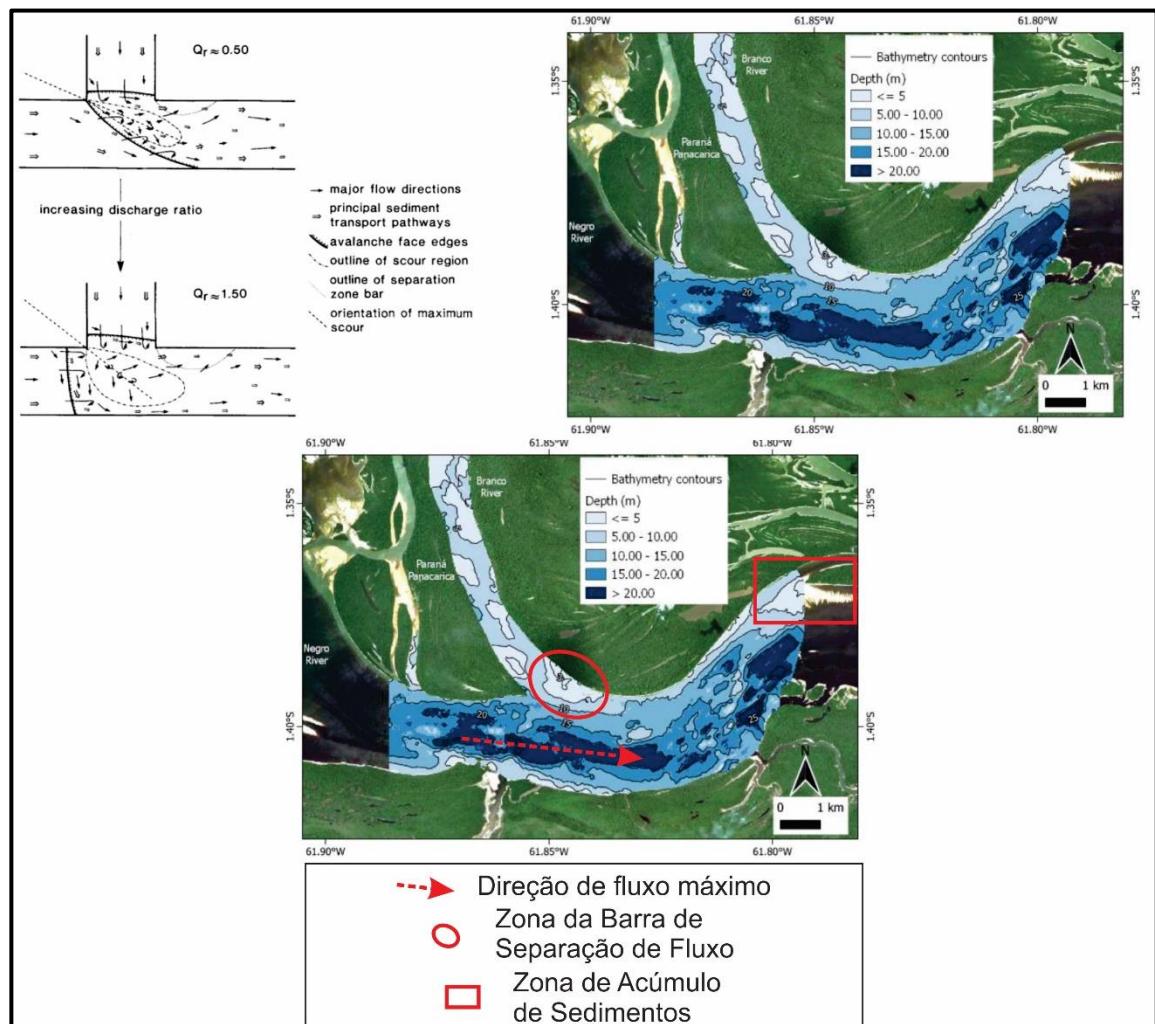
A diferença nas profundidades dos talvegues fluviais, chegando a até 20m, conforme observado em perfis batimétricos, limita a interação entre as cargas de fundo dos dois rios. Essa diferença de profundidade pode ser explicada pela influência tectônica da confluência entre o rio Branco e o rio Negro (Figura 58).

Através da batimetria da confluência, é possível correlacionar com os modelos propostos por Best (1987). Das cinco possíveis morfologias descritas por Best & Roads (2008), foram identificadas 2: A barra de separação de fluxo, formada na zona de separação de fluxo e a região de acúmulo de sedimentos. Apesar de possuir uma alta profundidade no leito do rio Negro, não é possível definir se as regiões mais profundas da confluência representam o poço de escavação ou apenas o leito natural do negro.

Ainda, Best define que o poço de escavação é formado após a zona de confluência, na bissetriz do ângulo de confluência, situação que não foi identificada na batimetria. As faces avalanche, nas saídas dos canais envolvidos na confluência também não ocorrem. Essas diferenças se dão pois o a confluência ainda pode estar em processo de definição dessas morfologias.

Além disso, em seus modelos, Best (1987) leva em consideração confluências que possuem talvegues fluviais no mesmo nível batimétrico, o que não ocorre na confluência estudada.

Figura 59 - Identificação de morfologia de fundo segundo Best (2008)



Fonte: Modificado de Marinho *et.al.* (2022) e Best & Roads (2008)

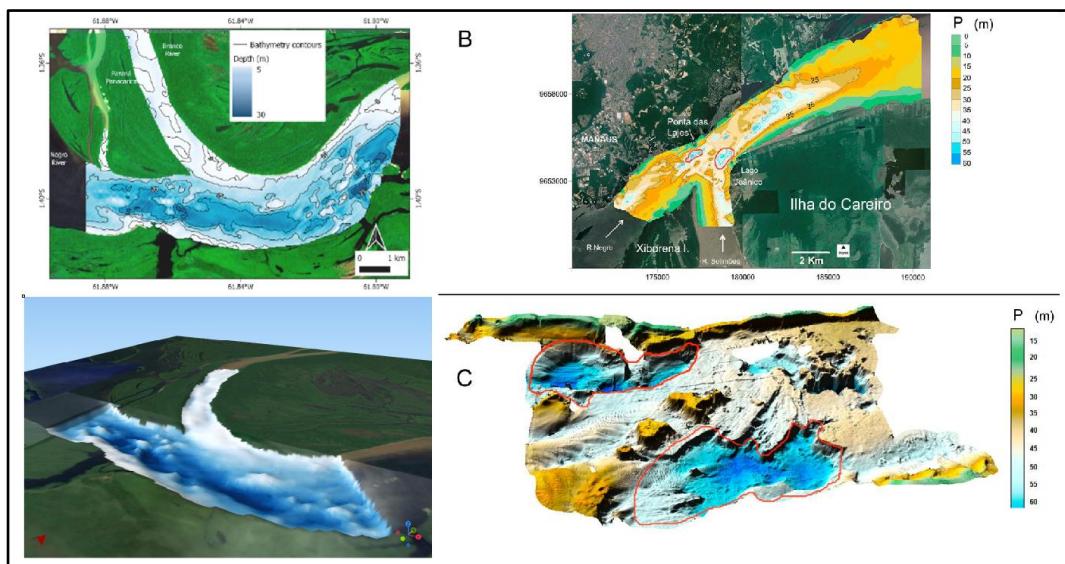
Em síntese, a análise morfológica dos rios Branco e Negro evidencia as diferenças significativas na profundidade dos seus talvegues, o que restringe a interação entre as cargas de fundo desses dois sistemas fluviais (Figura 58).

A confluência do rio Branco com o rio Negro apresenta algumas diferenças em relação à confluência do rio Negro com o Solimões. Uma das principais diferenças é a batimetria encontrada em cada uma das confluências. Enquanto na confluência do rio Negro com o Solimões a profundidade dos talvegues é semelhante, na confluência do rio Branco com o rio Negro existe uma diferença de cerca de 25 metros entre os talvegues desses rios, o que gera morfologias de fundo diferentes.

Outra diferença significativa é a depressão encontrada na boca dos rios (Nascimento, 2016) – na confluência do rio Negro com o Solimões, é possível identificar uma depressão que pode estar associada às faces avalanche descritas por Best (2008), já na confluência do rio Branco com o rio Negro, só ocorre depressão na região do Negro, alongada e indiferenciada

devido ao ajuste do canal “enforcado” pelo delta. Ainda, há um lineamento tectônico na margem direita do rio Negro, o que associa essa depressão a uma ação do aumento da velocidade de fluxo e escavação do canal juntamente com estruturas geológicas.

Figura 60 - Análise comparativa batimétrica entre as confluências dos rios Branco x Negro e Negro e Solimões



Fonte: Modificado de Marinho et.al. (2022) e Nascimento (2016).

Além disso, o aumento da velocidade do Rio Negro na confluência com o Rio Branco retroalimenta a depressão na batimetria. Portanto, o aumento da velocidade na confluência se dá por meio do efeito do barramento físico do Negro, aliado à estruturação tectônica, além da própria dinâmica de fluxos na confluência. Esses parâmetros não são considerados completamente, nos modelos atuais de confluência. Por fim, foram identificadas zonas de deposição de sedimentos, porém apenas na margem esquerda, associada ao Rio Branco (Figura 59).

6.2.2 Hidrodinâmica

Os rios apresentam contrastes significativos em relação à velocidade, densidade, quantidade de sedimentos em suspensão e temperatura. O rio Negro apresenta velocidades até três vezes maiores que o rio Branco, o que afeta a interação hidrodinâmica das águas na região da confluência (Figura 61).

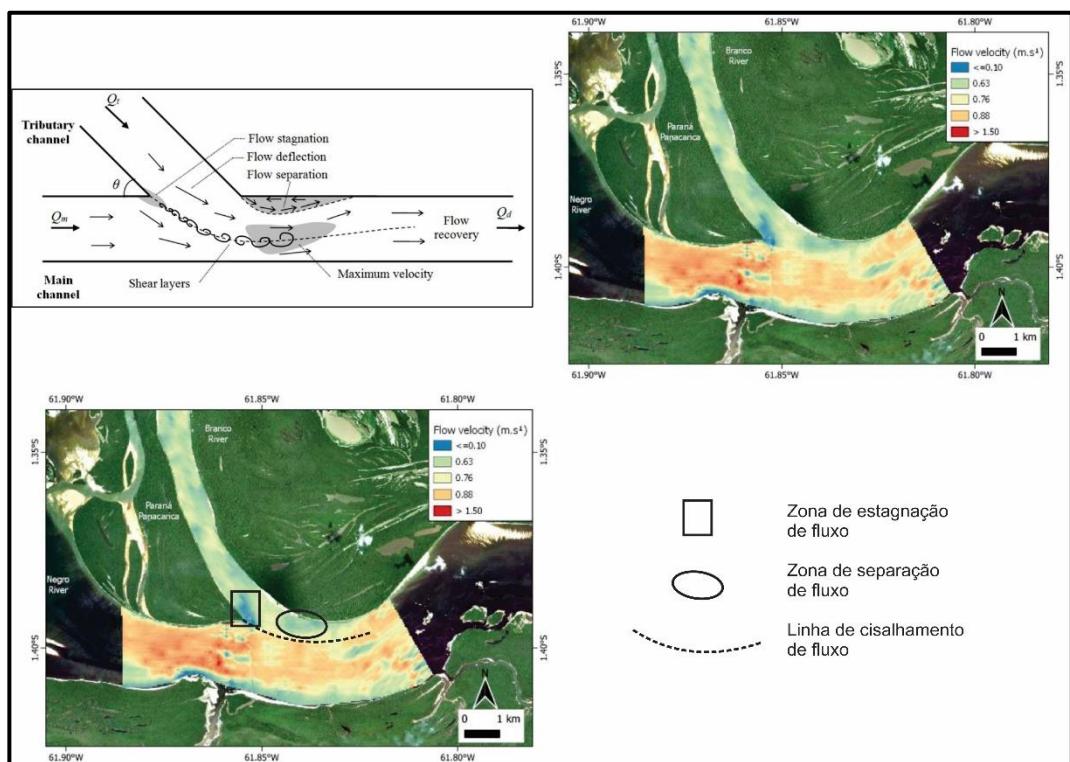
Após a análise do mapa de velocidade de fluxo e do sinal de retroespalhamento, foi verificado que os fluxos de ambos os rios interagem, independente da morfologia de fundo. Essa interação permite a identificação das seguintes zonas descritas por Best & Roads (2008):

- Zona de estagnação de Fluxo, que ocorre na margem direita do rio Branco, na sua saída;

- Zona de separação de fluxo, que ocorre na margem esquerda do branco, também na sua saída;
- Zona de cisalhamento e de fluxo helicoidal, ao longo do contato entre o fluxo do rio branco com o do rio Negro;

As zonas de ressurgência e de recuperação não foram identificadas, possivelmente por conta das limitações da área do levantamento. Possivelmente essas zonas se encontram mais a jusante da área levantada.

Figura 61 - Identificação de zonas de fluxo, segundo Best (2008)



Fonte: Modificado de Marinho *et.al.* (2022) e Best (2008)

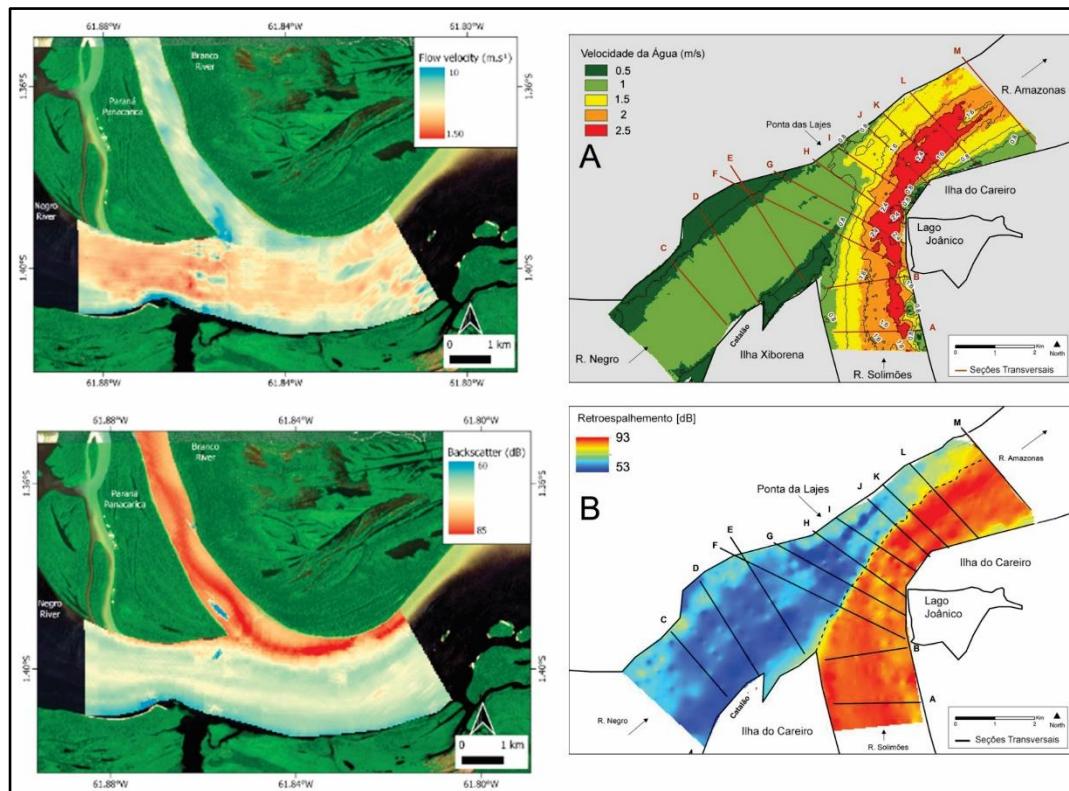
Verifica-se que os sedimentos carregados pelo rio Branco não possuem energia suficiente para adentrar no leito do rio Negro, o que gera um barramento hidráulico ao rio Branco. Essa interação é semelhante à que ocorre na confluência do rio Negro com o rio Solimões, mas de forma inversa, já que o Solimões barra o rio Negro hidráulicamente.

A presença desse barramento hidráulico tem implicações importantes na dinâmica fluvial da região. A interação hidrodinâmica entre os rios Branco e Negro é limitada, o que significa que as cargas de fundo dos dois rios têm pouca interação. Além disso, a presença desse barramento hidráulico afeta a sedimentação na região, influenciando a formação do delta do rio Branco.

Portanto, a compreensão das interações hidrodinâmicas entre o rio Branco e o rio Negro é crucial para entender a dinâmica fluvial da região e suas implicações para o meio

ambiente e para as comunidades locais. Ao comparar a confluência do rio Branco com o rio Negro e a do rio Negro com o Solimões, é possível perceber algumas semelhanças e diferenças entre esses dois cenários (Figura 62).

Figura 62 - Análise comparativa das confluências do rio Branco x rio Negro e rio Negro x Rio Solimões



Fonte: Modificado de Marinho *et.al.* (2022) e Nascimento (2016).

Uma das semelhanças entre esses dois locais é o barramento hidráulico ao fluxo, ou seja, em ambos os casos, um dos rios barram a passagem do outro. No caso da confluência do rio Branco com o rio Negro, o barramento é feito pelo rio Negro, enquanto na confluência do rio Negro com o Solimões, o barramento é feito pelo rio Solimões (Figura 62).

Outra semelhança que pode ser observada é a presença de zonas de fluxo. Nascimento (2016) identificou, através dos seus perfis, que o retroespalhamento do rio Solimões marca o seu canal, à semelhança do rio Branco. Essas zonas de fluxo são áreas em que o transporte de sedimentos é mais intenso e podem ter consequências diretas na formação de ilhas fluviais, por exemplo.

Embora existam semelhanças, também existem diferenças importantes entre esses dois locais. Enquanto na confluência do rio Branco com o rio Negro, é possível identificar um canal retilíneo com poucos depósitos aluvionares, na confluência do rio Negro com o Solimões, há uma mistura de águas muito mais intensa, o que pode gerar efeitos diferentes na dinâmica

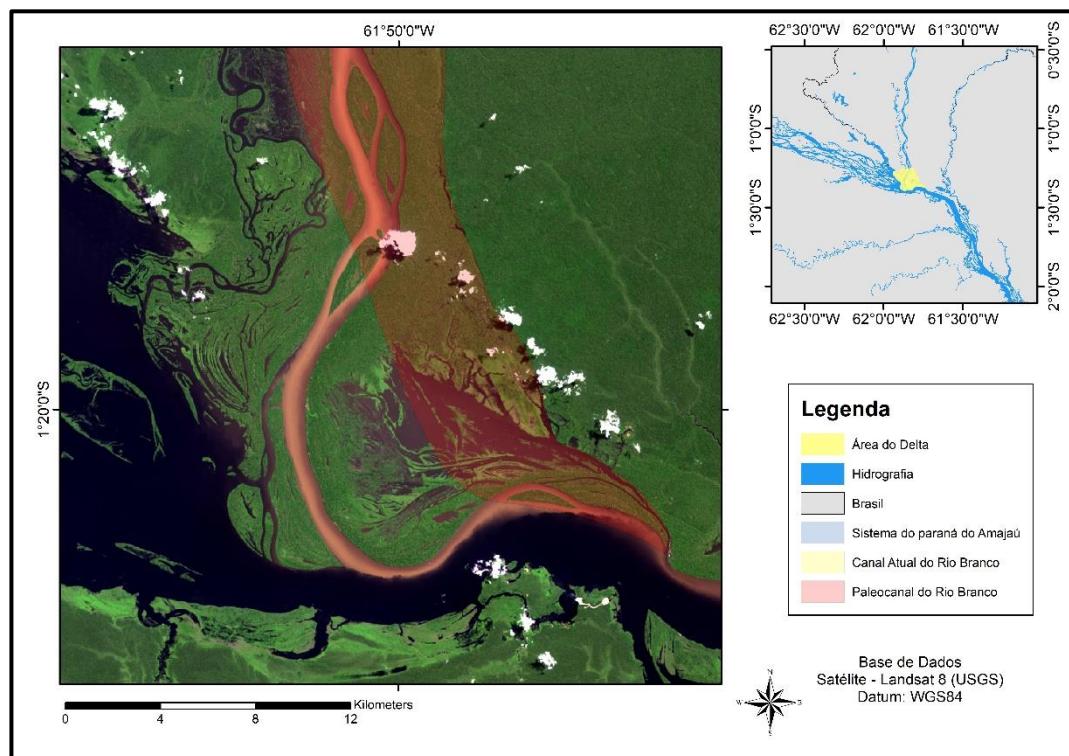
fluvial. No caso estudado, um rio de Águas escuras, e que possui uma média de velocidade menor, barra um rio de águas claras que localmente possui uma velocidade menor. Já na confluência do rio Negro com o rio Solimões, um rio de águas claras barra o rio Negro, de águas pretas.

6.3 Evolução do Relevo

Com base nos dados apresentados, é possível entender a evolução da paisagem na região da confluência do Rio Branco com o Rio Negro:

1. Inicialmente (Figura 63), o rio Branco apresentava uma direção de ataque na direção SE em sua confluência. Essa conclusão é baseada na direção do vale fluvial do rio Branco, que coincidem com a direção de paleodrenagens e ilhas na lagoa Cureru;

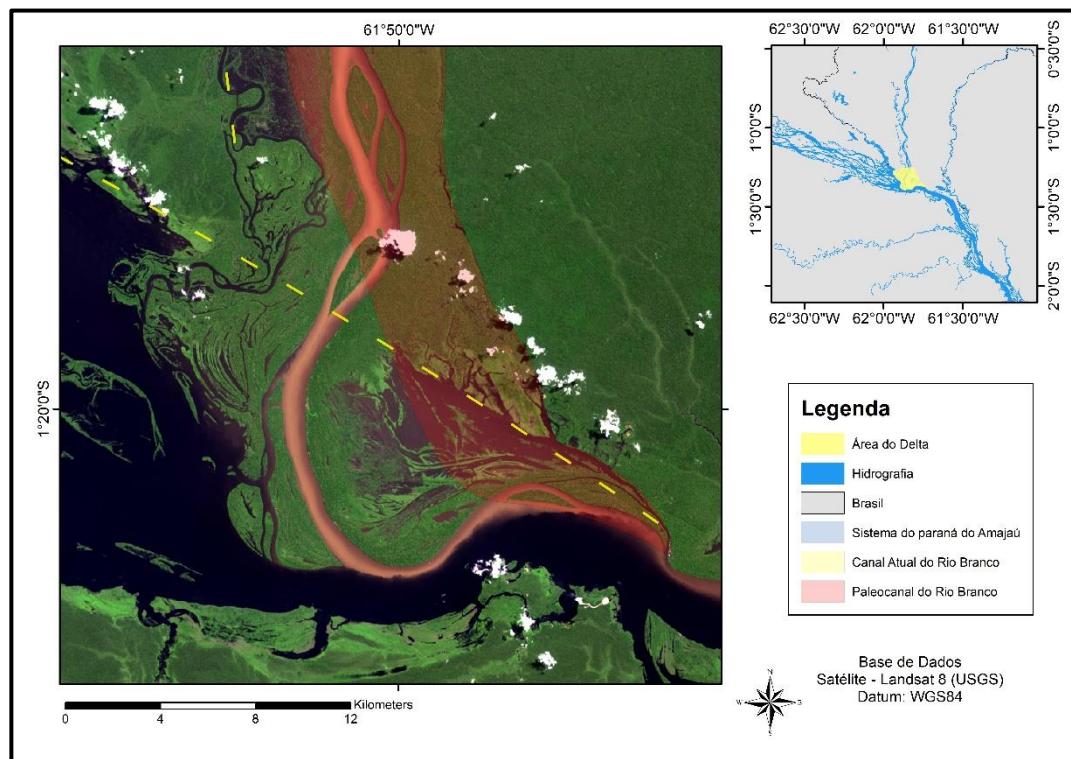
Figura 63 - Paleocanal do rio Branco



Fonte: O Autor

2. A neotectônica ativa da região, se manifesta através da formação do lineamento da Foz do rio Branco, responsável por gerar uma movimentação dos blocos da área da foz, provocando uma inclinação do pacote na direção SW. Essa inclinação tem grande influência na evolução da paisagem local, afeta a dinâmica fluvial da região pois força o rio Branco a ajustar o seu canal (Figura 64);

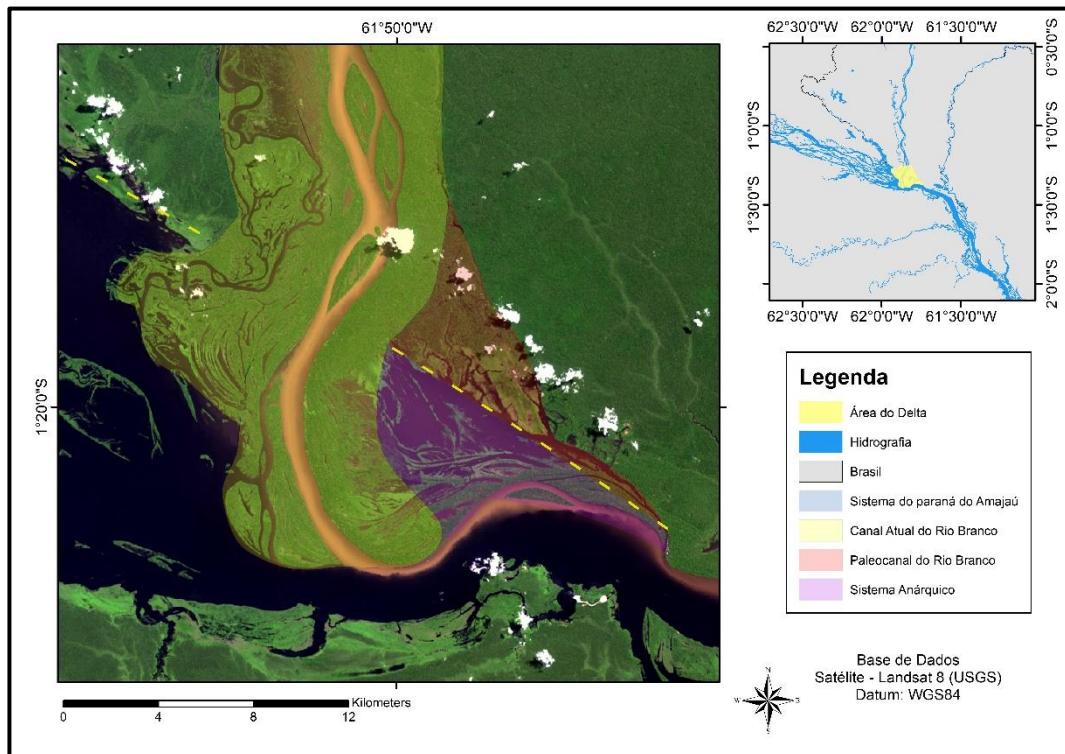
Figura 64 - Lineamento da foz do rio Branco



Fonte: O Autor

3. O canal principal do Rio Branco, na região de sua confluência com o Rio Negro, passou por um reajuste significativo devido à atividade tectônica da área. A inclinação do terreno na direção SW, provocada pelo lineamento da Foz do Rio Branco, gerou uma nova direção preferencial para o rio, que teve que se ajustar em seu curso em até 90° no sentido horário, em direção SW. Esse reajuste resultou na formação de geoformas deposicionais anárquicas na região da Lagoa Cureru. Esse ajuste levou à formação da curva do rio Branco, que avança no sentido leste-oeste e deixa registros da sua evolução na forma de espiras de meandro. Essas espiras de meandro são um exemplo da dinâmica fluvial que ocorre na região e evidenciam a influência dos processos geológicos na modelagem da paisagem. Com o tempo, a evolução dessas espiras de meandro pode levar à formação de novas curvas do rio, mudando ainda mais a paisagem da região (Figura 65).

Figura 65 - Canal atual do rio Branco



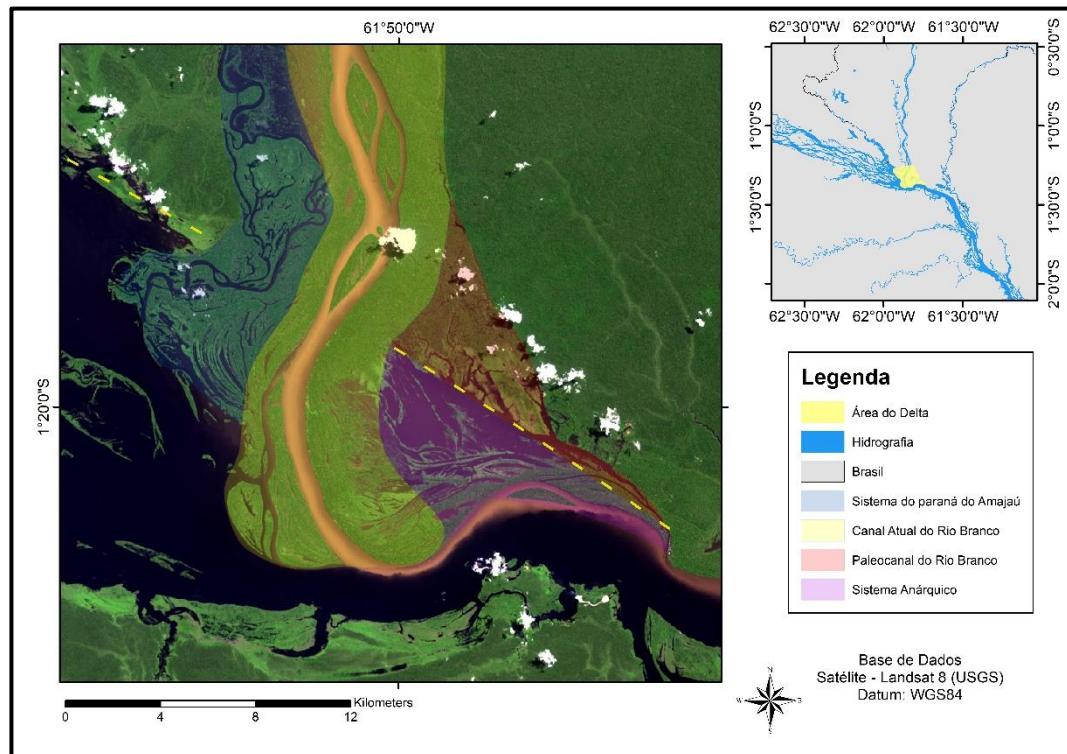
Fonte: O Autor

4. Após a formação da curva do Rio Branco na região da confluência, o canal principal passou por um período de ajuste da drenagem e formação de diques marginais (Figura 66). Esse processo, associado à diferença altimétrica entre as margens do rio Branco, evidenciado pelos perfis topográficos em faixa, foi responsável pelo estabelecimento de um sistema de drenagem paralelo - o paraná do Amajaú. Esse sistema apresenta padrões anastomosados e evolução ativa, o que pode ser observado através das espiras de meandro presentes na região.

A diferença altimétrica foi um fator importante para o estabelecimento do sistema de drenagem paralelo, uma vez que permitiu a formação de canais secundários que não se conectam diretamente ao rio Branco, devido seu dique marginal.

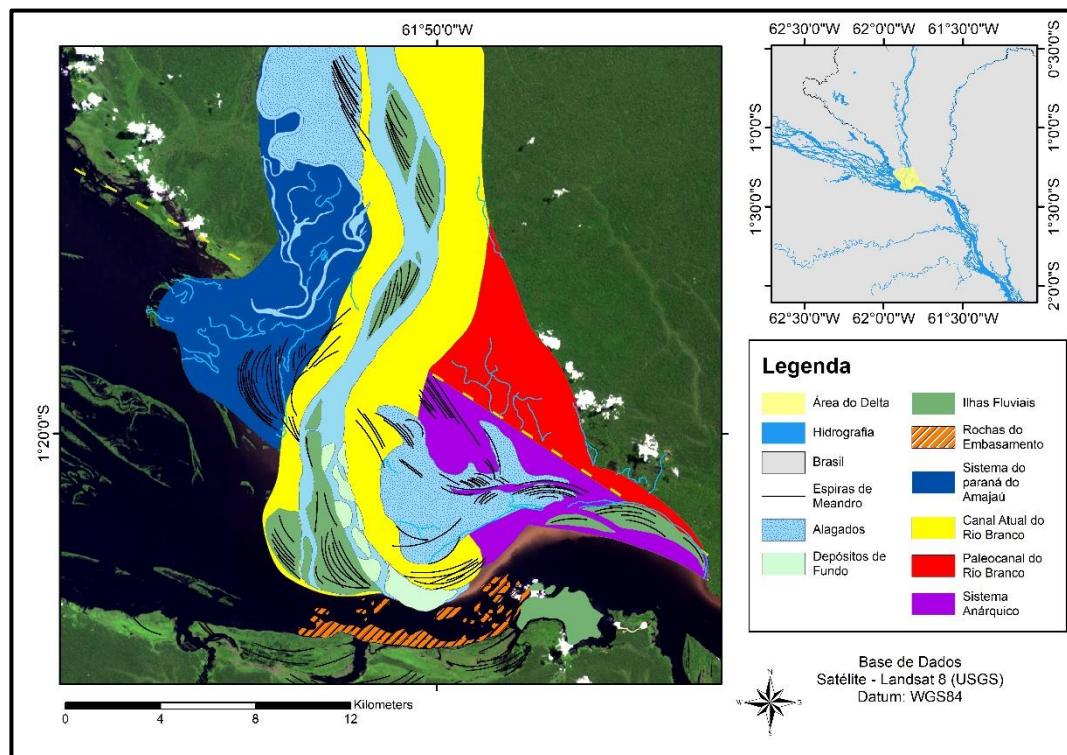
O Paraná do Amajaú apresenta um padrão anastomosado, o que significa que o canal principal é ramificado em vários canais menores. Esse tipo de padrão é comum em rios que apresentam baixa declividade e sedimentos finos, como é o caso do Rio Branco. Além disso, a evolução ativa do sistema de drenagem pode ser observada através das espiras de meandro presentes na região (Figura 67).

Figura 66 - Subsistema de drenagem paralelo ao rio Branco



Fonte: O Autor

Figura 67 - Evolução do Delta do rio Branco



Fonte: O Autor

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A confluência entre o rio Branco e o rio Negro na região da foz apresenta características peculiares resultantes da evolução do relevo local, influenciada principalmente pela atividade tectônica. O lineamento tectônico nessa área está associado a uma estrutura distensiva que permitiu a deposição massiva de sedimentos do Branco no rio Negro, formando um delta que se estende por até 10 quilômetros na margem esquerda do Negro e criando um barramento geográfico que reduz sua margem.

Como resultado desse barramento geográfico, o Negro aumenta sua velocidade de fluxo e profundidade para manter a vazão constante, superando em até três vezes a velocidade do rio Branco. Essa diferença de velocidade cria um barramento hidráulico do rio Negro sobre seu afluente, impedindo que os sedimentos em suspensão do rio Branco se depositem no leito do Negro, nesta região.

Essa interação entre os rios amazônicos ainda não é adequadamente considerada pelos modelos batimétricos convencionais, o que destaca a importância de estudos mais detalhados e integrados sobre as interações entre os processos tectônicos que moldam o relevo e as dinâmicas fluviais na Amazônia. Essa confluência em particular, devido ao controle estrutural e evolução geológica associada a eventos neotectônicos, apresenta diferenças de profundidade nas batimetrias e talvegues de cada rio, o que limita várias interações sedimentares e hidráulicas descritas nos modelos convencionais.

O trabalho ressalta a importância dos estudos hidrológicos e neotectônicos na região, uma vez que influenciam diretamente na configuração da confluência entre o rio Branco e o rio Negro. Pela característica da evolução da paisagem amazônica, a diferença batimétrica de talvegues fluviais, provocada por estruturação neotectônica, como fator limitador de interações entre fluxos e sedimentos pode ser, seguramente, repetida em outras confluências da bacia hidrográfica do Amazonas. Os modelos convencionais de confluências não conseguem prever totalmente as peculiaridades de um sistema fluvial de grande escala e proporções continentais, como o do rio Amazonas, portanto a formulação de modelos adequados é de extrema importância no gerenciamento territorial brasileiro.

7.1 Possibilidades futuras

Propostas de estudos para entender a região da confluência entre o rio Branco e o Rio Negro incluem diversas abordagens interdisciplinares. Uma delas é o detalhamento estrutural em afloramentos da região, que pode ser aliado à interpretação sistemática de imagens de satélite para definir as relações hierárquicas das estruturas e caracterizar os eventos de deformação associados. Com essa abordagem, é possível obter informações importantes a respeito da datação relativa de eventos de deformação crustal e movimento de blocos, o que implica na questão associada às relações de idade entre a foz do rio Branco, a captura do seu canal como descrito por Cremon (2017) e a definição de seu antigo ponto de foz, possivelmente associado à comunidade do Remanso.

Outra proposta é o levantamento de dados geocronológicos e sedimentares na região do delta do rio Branco, com base na evolução proposta nesse trabalho. Essa abordagem pode ajudar a estabelecer a evolução temporal e espacial do delta, com datações absolutas, permitindo assim entender melhor os processos que levaram à sua formação e como ele têm se modificado ao longo do tempo, bem como contribuir com informações a respeito da contribuição sedimentar do Branco no arquipélago de Anavilhanas.

Além disso, é importante analisar, através de levantamentos sedimentológicos, geocronológicos e estruturais, o impacto da mudança do sentido do rio Branco em sua foz e o barramento geográfico do rio Negro provocado pelo delta do rio Branco na formação e manutenção do arquipélago de Anavilhanas. Essa abordagem pode ajudar a entender como a interação entre esses rios e as mudanças do relevo têm influenciado a paisagem da região.

A integração de diferentes áreas do conhecimento, como geologia, geografia, e biologia, é fundamental para obter uma visão mais completa e precisa sobre a evolução da paisagem e dos processos que atuam nessa região.

8 REFERÊNCIAS

- ABRAHAMS, A.D., UPDEGRAPH, J. Some Space-filling controls on the arrangement of tributaries in dendritic channel networks. *Water Resources Research*, n. 23, p. 489-495. 1987.
- AB'SABER, Aziz Nacib. Geografia e planejamento. *Revista de História*, v. 39, n. 80, p. 257-271, 1969.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA): Dados Abertos – Cotas altimétricas do rio Negro, estação de Moura. Acessado em 02 de fevereiro de 2022. Disponível em: <<https://dadosabertos.ana.gov.br/>>
- ALMEIDA, Carolina Azevedo de. O Mosaico do Baixo Rio Negro: conservação da biodiversidade e sustentabilidade na Amazônia. 2014.
- ALMEIDA-FILHO, Raimundo; MIRANDA, Fernando P. Mega capture of the Rio Negro and formation of the Anavilhas Archipelago, Central Amazônia, Brazil: Evidences in an SRTM digital elevation model. *Remote Sensing of Environment*, v. 110, n. 3, p. 387-392, 2007.
- ALVES, André Campos et al. Análise multitemporal e morfodinâmica no entorno da confluência do rio Solimões com o rio Negro. 2019.
- ALVES, Fabio Corrêa; DE FÁTIMA ROSSETTI, Dilce; DE MORISSON VALERIANO, Márcio. Detecting neotectonics in the lowlands of Amazonia through the analysis of river long profiles. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 100, p. 102553, 2020. Amazon Princeton Editorial Associates Inc. (Copy editing) Manufactured in Hong-Kong ARCANJO, João Batista Alves. Fotogeologia: conceitos, métodos e aplicações. 2011.
- ÁVILA, Rafael André; MÖLLER JR, Osmar Olinto; ANDRADE, Mauro Michelena. Uso de um ADCP para estimar concentrações de material particulado em suspensão para o estuário da Lagoa dos Patos, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p. 299-309, 2014.
- BARBOSA, Francisco de Assis dos Reis; BEZERRA, Sebastião Rodrigues. Levantamento batimétrico e medição de vazão do rio Madeira no distrito de Calama. CPRM, 2013.
- BEST, James L. Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology. 1987.

BEST, James L. The morphology of river channel confluences. *Progress in Physical Geography*, v. 10, n. 2, p. 157-174, 1986. BEST, James L.; RHOADS, Bruce L. Sediment transport, bed morphology and the sedimentology of river channel confluences. *River confluences, tributaries and the fluvial network*, p. 45-72, 2008.

BHATTARAI, Pankaj et al. Quantitative slope stability mapping with ArcGIS: prioritize highway maintenance. In: *Proceedings of ESRI's 24th Annual International User's Conference*, San Diego. ESRI. 2004.

BIRON, P.; ROY, A. G.; BEST, J. L. Turbulent flow structure at concordant and discordant open-channel confluences. *Experiments in Fluids*, v. 21, n. 6, p. 437-446, 1996.

BLANCO, Claudio JC; SECRETAN, Yves; FAVRE, Anne-Catherine. Análise, aplicação e transposição de um modelo chuva-vazão para simulação de curvas de permanência de pequenas bacias da Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 205-216, 2007.

BOURGOIN, Laurence Maurice et al. Temporal dynamics of water and sediment exchanges between the Curuaí floodplain and the Amazon River, Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 335, n. 1-2, p. 140-156, 2007.

BRISTOW, Charles S.; BEST, James Leonard; ROY, A. G. Morphology and facies models of channel confluences. *Alluvial Sedimentation*, p. 89-100, 1993.

CAMPOS, C. [Organização] Diversidade socioambiental de Roraima: subsídios para debater o futuro sustentável da região. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2011. 64 p.

CAPUTO, Mario Vicente; SOARES, Emilio Alberto Amaral. Eustatic and tectonic change effects in the reversion of the transcontinental Amazon River drainage system. *Brazilian Journal of Geology*, v. 46, p. 301-328, 2016.

CASSETI, Valter. *Geomorfologia*. [SI]. 2005.

CENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. *Mecânica dos fluidos-3*. Amgh Editora, 2015.

CHARLTON, Ro. *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge, 2007.

CHIEN, Ning; WAN, Zhaoxi. *Mechanics of sediment transport*.

CHRISTOFOLETTI, A., Geomorfologia Fluvial. São Paulo: Edgard Blucher, 1981.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. Geomorfologia. Editora Blucher, 1974.

COSTA, João Batista Sena et al. Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. Geonomos, 1996.

COSTA, João Batista Sena et al. Tectonics and paleogeography along the Amazon River. Journal of South American Earth Sciences, v. 14, n. 4, p. 335-347, 2001.

CPRM, 2019. Boletim de Monitoramento Hidrometeorológico da Amazônia Ocidental. Manaus, AM. Nº 32. Disponível em <https://www.cprm.gov.br/sace/boletins/Amazonas/20190809_18-20190809%20-20182553.pdf>

CPRM. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. In: BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.; GONÇALVES, J. H. (Eds.). Brasília: CPRM, 2003. 692 p. [Texto, mapas & SIG].

CREMON, É. H. Evolução quaternária do Rio Branco-Norte da Amazônia-com base em dados orbitais e geológicos. São José dos Campos, p. 39 – 41, 2016.

DE FÁTIMA ROSSETTI, Dilce; DE TOLEDO, Peter Mann; DE MORISSON VALERIANO, Márcio. Neotectonics and tree mortality in a forest ecosystem of the Negro basin: geomorphic evidence of contemporary seismicity in the intracratonic Brazilian Amazonia. *Geomorphology*, v. 329, p. 138-151, 2019.

DE MANAUS, Porto. Nível do rio Negro, acessado em 15 de julho de 2022. Disponível em: <<https://www.portodemanaus.com.br/?pagina=nivel-do-rio-negro-hoje>>.

DEMATTÊ, José Alexandre Melo; DEMÉTRIO, Valdemar Antônio. Caracterização de solos por padrões de drenagem e sua relação com índices de intemperismo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, n. 1, p. 87-95, 1998.

DEMEK, J.; KIRCHNER, K.; MACKOVÈIN, P.; SLAVÍK, P. 2007. The map of morphostructures of the Czech Republic. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*, 7: 5-14.

ESPINOZA VILLAR, Jhan Carlo et al. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 29, n. 11, p. 1574-1594, 2009.

ETCHEBEHERE, Mario Lincoln et al. Aplicação do Índice Relação Declividade-Extensão-RDE Na Bacia do Rio do Peixe (SP) para Detecção de Deformações Neotectônicas. *Geologia USP: Série Científica*, p. 43-56, 2004.

EVANGELISTA, R.O.; SANDER, C.; WANKLER, F.L. Estudo preliminar da distribuição pluviométrica e do regime fluvial da bacia do rio Branco, estado de Roraima. In: SILVA, P.R.F.; OLIVEIRA, R.S. (Org.). *Roraima 20 anos: As geografias de um novo estado*. Boa Vista: Editora da UFRR, p. 142-167. 2008.

FERNANDEZ, Oscar VQ. Relações da geometria hidráulica em nível de margens plenas nos córregos de Marechal Cândido Rondon, região oeste do Paraná. *Geosul*, v. 19, n. 37, p. 115-134, 2004.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L.; MOLINIER, M.; GUIMARÃES, V.; DE OLIVEIRA, E.; DE FREITAS, M. A. V. Caracterização Hidrológica da Bacia Amazônica. In: Rivas & Freitas (Org.) *Amazônia uma perspectiva interdisciplinar*. Manaus: Ed. EDUA, 2002. p.33-53.

FILIZOLA, Naziano & GUYOT, Jean-Loup. The use of Doppler technology for suspended sediment discharge determination at the River Amazon. *Hydrological Science Journal* 49(1) Feb. 2004.

FILIZOLA, Naziano; GUYOT, Jean Loup. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. *Brazilian Journal of Geology*, v. 41, p. 566-576, 2011.

FISCH, Gilberto F.; JANUÁRIO, Mauro; SENNA, Renato C. Impacto ecológico em Tucuruí (PA): climatologia. *Acta Amazonica*, v. 20, p. 49-60, 1990.

FLODKVIST, Herman. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river fyris. 1936.

Forsberg, B. R., Hashimoto, Y., Rosenqvist, A., & Miranda, F. P. (2000). Tectonic fault control of wetland distributions in the Central Amazon revealed by JERS-1 radar imagery. *Quaternary International*, 72, 61–66.

FOSSEN, Haakon. Structural geology. Cambridge university press, 2016.

FRANZINELLI, Elena. Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil). Brazilian Journal of Geology, v. 41, n. 4, p. 587-596, 2011.

FREITAS, A. Geografia e história de Roraima. Manaus: Grafima, 1996. 154p.

GeoSBG: Repositório de Dados Geológicos do Serviço Geológico do Brasil – SIG Geodiversidade do Estado do Amazonas, acessado em 14 de junho de 2021. Disponível em: <<https://geosgb.cprm.gov.br/>>

GOULDING, Michael; BARTHEM, Ronaldo; FERREIRA, Efrem Jorge Gondim. The Smithsonian atlas of the Amazon. 2003.

GROTZINGER, John; JORDAN, Tom. Para Entender a Terra-6. Bookman Editora, 2013.

GUALTIERI, Carlo et al. A 3D analysis of spatial habitat metrics about the confluence of Negro and Solimões rivers, Brazil. Ecohydrology, v. 13, n. 1, p. e2166, 2020.

GUALTIERI, Carlo et al. A field study of the confluence between Negro and Solimões Rivers. Part 1: Hydrodynamics and sediment transport. Comptes Rendus Geoscience, v. 350, n. 1-2, p. 31-42, 2018.

GUIMARÃES, Valdemar et al. O uso do ADCP (correntômetro de perfilagem acústico por efeito Doppler) para medição de vazão e estimativa do fluxo de sedimentos nos grandes rios da bacia amazônica (L'emploi de l'ADCP pour la mesure du débit et l'estimation du flux de sédiments dans les grands fleuves du bassin amazonien). XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 1, p. 545-552, 1997.

GUIMBERTEAU, Matthieu et al. Discharge simulation in the sub-basins of the Amazon using ORCHIDEE forced by new datasets. Hydrology and Earth System Sciences, v. 16, n. 3, p. 911-935, 2012.

GUY, Max. Quelques principes et quelques expériences sur la méthodologie de la photo-interprétation. Acte du II Symposium International de Photo-Interpretation, v. 1, p. 21-41, 1966.

GUYOT, J. L. et al. Medição de vazão com ADCP—Primeiros resultados na bacia Amazônica (Mesures de débits avec l'ADCP—Premiers résultats dans le bassin amazonien, en portugais). A Água em Revista, v. 3, n. 4, p. 26-30, 1995.

HIROSHI, YOSHIOKA; TOMOTSUKA, TAKAYAMA; SHIGEATSU, SERIZAWA. ADCP application for long-term monitoring of coastal water. *Acta oceanologica sinica*, n. 1, p. 95-100, 2005.

HORBE, A. M. C. et al. A laterização na gênese das superfícies de aplanamento da região de Presidente Figueiredo – Vila Balbina, nordeste do Amazonas. In: COSTA, M. L.; ANGÉLICA, R. S. (Orgs.). Contribuições à geologia da Amazônia. Belém: FINEP-SBG/NO, 1997. v. 2. cap.5. p. 145-176.

IANNIRUBERTO, Marco et al. A field study of the confluence between Negro and Solimões Rivers. Part 2: Bed morphology and stratigraphy. *Comptes Rendus Geoscience*, v. 350, n. 1-2, p. 43-54, 2018.

JENKS, GF. (1967), The Data Model Concept in Statistical Mapping, International Yearbook of Cartography, 7, pp. 186-190.

KRUEGER, C.P., Levantamentos Batimétricos, Revista INFOGEO 39 (MUNDOGEO) setembro 2005.

LANDIM, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. 2. Ed. Rev. e Ampl. – São Paulo: Editora UNESP, 2003. 253 p.

LATRUBESSE, Edgardo M.; STEVAUX, José Cândido; SINHA, Rajiv. Grandes sistemas fluviais tropicais: uma visão geral. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 6, n. 1, p. 1-18, 2005.

LATRUBESSE, E.; FRANZINELLI, E. The holocene aluvial plain of the middle Amazon river, Brazil. *Geomorphology*, [Holanda], n. 44, p. 241-257, 2002.

LATRUBESSE, Edgardo M. et al. The Late Miocene paleogeography of the Amazon Basin and the evolution of the Amazon River system. *Earth-Science Reviews*, v. 99, n. 3-4, p. 99-124, 2010.

LATRUBESSE, Edgardo M.; FRANZINELLI, Elena. The late Quaternary evolution of the Negro River, Amazon, Brazil: Implications for island and floodplain formation in large anabranching tropical systems. *Geomorphology*, v. 70, n. 3-4, p. 372-397, 2005.

LEON, Juan Gabriel et al. Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges. *Journal of hydrology*, v. 328, n. 3-4, p. 481-496, 2006.

MAGALHÃES, Regiane Campos; VIEIRA, A. F. S. G. As características hidrológicas do solo de várzea e sua vulnerabilidade ao processo de terras caídas na Amazônia Central (BR). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 11, n. 03, p. 773-788, 2018.

MAIA, Maria Adelaide Mansini et al. Geodiversidade do Estado do Amazonas. 2008.

MARINHO, Rogério Ribeiro et al. Riverbed morphology and hydrodynamics in the confluence of complex mega rivers-A study in the Branco and Negro rivers, Amazon basin. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 118, p. 103969, 2022.

MARINHO, Rogério Ribeiro. Integração de dados de campo e sensoriamento remoto no estudo do fluxo de água e matéria no Arquipélago de Anavilhas, Rio Negro-Amazonas, Brasil. 2019.

MARINHO, Rogério Ribeiro; DUAILIBE, Nayara Caroline Soares; JUNIOR, Naziano Pantoja Filizola. Influência da amostragem na construção de superfície batimétrica de grandes rios—estudo de caso no Baixo Rio Negro-AM, 2018.

MENDES, J.C. Elementos de Estratigrafia. São Paulo: T.A. Queiroz/EDUSP, 1984, p.34.

MILLAR, Robert G. Influence of bank vegetation on alluvial channel patterns. *Water Resources Research*, v. 36, n. 4, p. 1109-1118, 2000.

MOLINIER, Michel et al. Hidrologia da bacia do rio Amazonas. 1994.

MOSLEY, M. Paul. An experimental study of channel confluences. *The journal of geology*, v. 84, n. 5, p. 535-562, 1976.

NASCIMENTO, André Zumak Azevedo et al. Características hidro-geomorfológicas do baixo curso dos Rios Solimões e Negro, e sua confluência, Amazônia, Brasil. 2016.

PARSONS, D.R. JACKSON, P. R. CZUBA, J. A. ENGEL, F. L. RHOADS, B. L. OBERG, K. A. BEST, J. L. MUELLER, D. S. JOHNSON, K. K. RILEY, J. D. Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for movingvessel ADCP measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*. v. 38. p. 1244–1260, 2013.

PARSONS, D.R. JACKSON, P. R. CZUBA, J. A. ENGEL, F. L. RHOADS, B. L. OBERG, K. A. BEST, J. L. MUELLER, D. S. JOHNSON, K. K. RILEY, J. D. Velocity Mapping Toolbox (VMT): a processing and visualization suite for movingvessel ADCP measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*. v. 38. p. 1244–1260, 2013.

PARSONS, Daniel R. et al. Large river channel confluences. *River confluences, tributaries and the fluvial network*, p. 73-91, 2008.

PÉREZ-PEÑA, José Vicente et al. SwathProfiler and NProfiler: Two new ArcGIS Add-ins for the automatic extraction of swath and normalized river profiles. *Computers & Geosciences*, v. 104, p. 135-150, 2017.

Plano Nacional de Recursos Hídricos: <<http://pnrh.cnrh-srh.gov.br>>

QUEIROZ, Gustavo Lopes; SALAMUNI, Eduardo; DO NASCIMENTO, Edenilson Roberto. AzimuthFinder: ferramenta para a extração de dados e apoio na análise estrutural. *Geologia USP. Série Científica*, v. 14, n. 1, p. 69-80, 2014.

QUEIROZ, MS de; TOMAZ NETO, A. G. A influência dos Rios Negro e Solimões nas comunidades rurais ribeirinhas no município de Iranduba-Amazonas. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Fortaleza-CE, 2019.

RD INTRUMENTS. Acoustic Doppler Solutions 2003 WinRiver User's Guide International Version. P/N 957-6171-00. [S.l: s.n.], 2003. v. 00.

REIS, N. J.; FRAGA, L. M., FARIA, M. S. G. de; ALMEIDA, M. E. Geologia do estado de Roraima, Brasil. In: BRGM (Ed.). *Geology Of France and Surrounding Areas : Special Guiana Shield*. N. 2-3-4, p. 121-134, 2003.

REIS, N.J.; D'ANTONA, R. de J.G.; OLIVEIRA, M.A. Evidências de sedimentação pleistocênica no flanco oriental do arco Purus, estado do Amazonas: Formação Içá. In:

SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9., 2006a, Belém. Resumos Expandidos... Belém: SBG – Núcleo Norte, 2006a. CD-ROM.

REVENGA, C., MURRAY, S., ABRAMOVITZ, J. & HAMMOND, A. 1998. Watersheds of the world: Ecological Value and Vulnerability. World Watch Institute. U.S.A. 164pp.

RHOADS, B. L. KENWORTHY, S. T. Flow structure at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology*, v. 11, n. 4, p. 273-293, 1995.

RIKER, Silvio Roberto Lopes et al. Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus, Estado do Amazonas: escala de integração 1: 500.000: estado do Amazonas. CPRM, 2016.

SALAMUNI, Eduardo et al. Knickpoint Finder: ferramenta para a busca de geossítios de relevante interesse para o geoturismo. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 70, 2013.

SANDER, Carlos et al. CHEIAS DO RIO BRANCO E EVENTOS DE INUNDAÇÃO NA CIDADE DE BOA VISTA, RORAIMA (Branco river floods and flood events in the Boa Vista city, Roraima, Brazil). 2012.

SANTOS, J. O. S.; HARTMANN, L. A.; FARIA, M. S. G. de; RIKER, S. R. L.; SOUZA, M. M. DE; ALMEIDA, M. E.; MCNAUGHTON, N. J. A compartimentação do cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 9., 2006, Belém. Anais... Belém: SBG/Núcleo Norte, 2006. CD-ROM.

SANTOS, V.C., 2015. Ambientes de confluências no contexto da rede de drenagem: Exemplo da bacia hidrográfica do rio Ivaí, Estado do Paraná. Tese de Doutorado – UNESP/IGCE, Rio Claro, SP.

SCHUMM, Stanley A. Patterns of alluvial rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v. 13, n. 1, p. 5-27, 1985.

SCHUMM, Stanley A.; LICHTY, Robert W. Time, space, and causality in geomorphology. *American journal of science*, v. 263, n. 2, p. 110-119, 1965.

SILVA, Andréa Leme da. Animais medicinais: conhecimento e uso entre as populações ribeirinhas do rio Negro, Amazonas, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, v. 3, p. 343-357, 2008.

SILVA, Clauzionor L. et al. Analysis of tectonic-controlled fluvial morphology and sedimentary processes of the western Amazon Basin: an approach using satellite images and digital elevation model. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 79, p. 693-711, 2007.

SINHA, Rajiv; LATRUBESSE, Edgardo Manuel; STEVAUX, José Cândido. Grandes sistemas fluviais tropicais: uma visão geral. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 6, n. 1, 2005.

SIQUEIRA, Luan Ferreira. Estudo hidrológico do efeito de barramento hidráulico no Rio Tarumã-Açu, Manaus-AM. 2019.

STERNBERG, H. O. Vales tectônicos na planície amazônica. *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, v. 12, n. 4, p. 513-534, 1950.

STEVAUX, José Cândido; LATRUBESSE, Edgardo Manuel. *Geomorfologia fluvial*. Oficina de Textos, 2017.

STRAHLER, Arthur N. Dynamic basis of geomorphology. *Geological society of america bulletin*, v. 63, n. 9, p. 923-938, 1952.

STRAHLER, Arthur N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. *Geol. Soc. America Bulletin*. 63:1117-1142 (1952).

TEIXEIRA, Wilson et al. *Decifrando a terra*. 2009.

TELEDYNE, Apresentação de produto. Disponível em <https://www.comm-tec.com.br/rio_grande_ds_lr>

WISE, Stephen. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrological processes*, v. 14, n. 11-12, p. 1909-1929, 2000.

TULIO¹, Sergio; GAMARO, Paulo Everardo Muniz; MALDONADO, Luiz Henrique. Avaliação do uso do medidor de vazão doppler com feixe vertical em levantamentos batimétricos. 2011.

VALE, Roseilson do et al. A cheia de 2009 na Amazônia Brasileira. *Brazilian Journal of Geology*, v. 41, p. 577-586, 2011.

VAN DEN BERG, Jan H. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers. *Geomorphology*, v. 12, n. 4, p. 259-279, 1995.

VAUCHEL, Philippe et al. A reassessment of the suspended sediment load in the Madeira River basin from the Andes of Peru and Bolivia to the Amazon River in Brazil, based on 10 years of data from the HYBAM monitoring programme. *Journal of Hydrology*, v. 553, p. 35-48, 2017.

9 ANEXO

Artigo publicado na South America Earth Sciences
“Riverbed morphology and hydrodynamic in the confluence of complex mega rivers –
A study in the Branco and Negro rivers, Amazon basin”

Autoria:

Rogério Ribeiro Marinho, Zumak Azevedo Nascimento, Albert Reis Furtado,
Naziano Pantoja Filizola Junior, Vanessa Cristina dos Santos

Publicado em:

Volume 118C, 2022, Páginas 103969