

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISE PALEOHIDRÁULICA DAS ESTRUTURAS DE BARRAS PRESERVADAS EM
TERRAÇOS DO PLEISTOCENO NO INTERFLÚVIO JAPURÁ-NEGRO, AMAZONAS,
BRASIL**

Jhesika Pena Gomes de Souza Silva

Orientador: Prof. Dr. Renato Paes de Almeida

Co-orientador: Carlos Eduardo Majon Mazoca

MONOGRAFIA

(TF – 21/17)

SÃO PAULO

2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,
Selma e Agnaldo.

AGRADECIMENTOS

Durante os caminhos percorridos nesta vida, encontramos pessoas dispostas ou não a nos encorajar a seguir em busca de nossos sonhos. Meus agradecimentos são para as pessoas que mesmo diante de todas as dificuldades que encontrei ao trilhar meu caminho até ingressar na Universidade de São Paulo, sempre estiveram ao meu lado me dando forças para realizar este sonho e tornaram as dificuldades mais leves para que neste dia se tornasse uma grande vitória.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Selma e Agnaldo, que desde o meu nascimento, proveram a melhor educação dentro do possível para que este sonho um dia se tornasse realidade e que e nunca deixaram de acreditar em mim, sempre me dando forças quando eu mesma achei que não tivesse. A minha irmã, Jenniffer, por sempre promover conversas maravilhosas sobre a vida e me apresentar o pensamento crítico desde pequena. Aos meus avós, por compartilhar as experiências ao longo da vida e a minha sobrinha, Clara, por ser a melhor sobrinha que alguém poderia ter.

Agradeço imensamente aos diversos amigos que conquistei nessa caminhada geológica, especialmente meus amigos da turma 59, que fizeram dessa turma a melhor que eu poderia estar. Agradeço especialmente aos meus amigos do grupo “The N.”: Trevas, Pams, Kalipso, Migança e Rico por tornarem essa caminhada extremamente divertida e leve. Agradeço ao Futsal Feminino da Geologia “Cobras” e as grandes amizades que conquistei dentro de campo. Agradeço ao GGE (Grupo da Geo de Espeleologia), que me trouxe experiências incríveis e perrengues que jamais poderia imaginar passar e aos amigos de grupo: Tom, Kiby, Waze, Bibifa e Menos. Agradeço a minha amiga Kiwi, que foi minha parceira de vários momentos e que até hoje é uma grande amiga. E não poderia deixar de agradecer aos meus amigos e companheiros de muitas aventuras e viagens Dilma, Lezera, Baby e Baba.

Agradeço aos meus professores do ensino médio, Kassiano, Renata, Michelle e Patrícia, que sempre proporcionaram aos alunos e a mim, a melhor educação básica que poderia ter em escola pública. E agradeço aos professores do Instituto de Geociências pelos ensinamentos ao longo desses seis anos e aos motoristas e funcionários, que são essenciais para o desenvolvimento das atividades acadêmicas.

Agradeço ao meu companheiro e amigo Andrews Gabriel, que pude encontrar em outro estado do Brasil durante essa jornada geológica e que desde então vem compartilhando momentos e se aventurando comigo nesse mundo que é a Geologia.

Agradeço ao meu orientador Renato Paes de Almeida, por ter aceitado trabalhar comigo e por sempre fazer o possível para me ajudar no desenvolvimento deste trabalho mesmo diante das dificuldades impostas pelo atual momento que vivemos. Além disso,

agradeço por ter me ensinado desde as aulas de Estratigrafia a questionar e a enxergar a Geologia por outros olhos, aprimorando meu pensamento científico. Agradeço também ao meu co-orientador, Carlos Eduardo Majon Mazoca, por sempre tirar minhas dúvidas mesmo quando não tinha tempo.

Por fim, agradeço as agências de fomento FAPESP (2018/15123-4) e CNPq (426654/2018-8) por financiar os projetos que deu origem a este trabalho de formatura.

RESUMO

A bacia do rio Amazonas refere-se a uma extensa região com cabeceiras nos escudos das Guianas a norte e do Brasil Central a sul, e cordilheira Andina a oeste. As idades sugeridas para o estabelecimento do sistema fluvial moderno vão do Mioceno ou até idades mais jovens desde o Plio-Pleistoceno até meados do final do Pleistoceno. Nesse contexto, a compreensão do processo evolutivo dos depósitos quaternários que fazem parte da construção dos terrenos de terra firme entre o interflúvio Japurá-Negro é de extrema importância proporcionando implicações para a Geologia, Paleogeografia e Biogeografia. Nessa região, terraços do Pleistoceno com estruturas de canais fluviais indicam um grande sistema fluvial fluindo para o Rio Negro, com as hipóteses do Rio Japurá ou o próprio Rio Solimões terem sido os responsáveis. A fim de testar essas hipóteses, este trabalho tem como objetivo: a obtenção de medidas de raio de curvatura das *scroll bars* das planícies ativas dos rios Solimões e Japurá, e das estruturas preservadas nos terraços Pleistocénicos no interflúvio Japurá-Negro, na região entre Maraã (AM) e Barcelos (AM); organizar uma base de dados com parâmetros estatísticos da hidrologia dos rios Japurá, Solimões, Purus, Içá e Juruá; avaliar estatisticamente e por testes de hipóteses se o sistema de terraços registra um paleocurso do Rio Solimões ou Japurá e correlacionar elementos da hidrologia dos rios Japurá e Solimões com a escala das *scroll bars* recentes e aprimorar assim a interpretação das estruturas. Diante dos objetivos apresentados, obteve-se os seguintes resultados: a construção de uma base de dados obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA) bem como o tratamento desses dados em *script* escrito em Python; obtenção dos raios de curvatura de *scroll bars* nas planícies recentes de rios ativos e correlação com a descarga fluvial dos rios. Considerando os resultados pode-se concluir que há grande semelhança na dimensão das *scroll bars* do Pleistoceno com as do Rio Solimões atual, sendo que a hipótese da semelhança com o Rio Japurá é descartada. Assim conclui-se que o Rio Solimões foi possivelmente um tributário do Negro no Pleistoceno tardio.

Palavras-chave: Bacia amazônica; Quaternário; Scroll bars; Rio Solimões; Rio Japurá;

ABSTRACT

The Amazon River basin is a wide region with watersheds in the Guiana shield to the North, the Brazilian shield to the South and the Andes to the West. Ages suggested for the establishment of the modern fluvial systems range between the Miocene to the Late Pleistocene. In this context, comprehending the evolution of the quaternary deposits that compose the terraces in the Japurá-Negro interfluve is of extreme importance for the Geology, Paleogeography and Biogeography in the region. In that area, Pleistocene terraces bearing channel structures indicate a large fluvial system flowing to the Negro River valley, bringing the hypotheses of the Japurá River or even the Solimões River being the responsible. In order to test these hypotheses, the present work aims at: obtaining measurements of scroll bar radius in the active alluvial plains in the Solimões and Japurá rivers as well as structures preserved in the Japurá-Negro interfluve, between Maraã (AM) and Barcelos (AM); organizing a database containing statistical parameters concerning the hydrology of the Japurá, Solimões, Purus, Içá and Juruá rivers; evaluate with statistical hypothesis tests whether the Pleistocene terrace system records a paleocourse of the Solimões or the Japurá; correlate the hydrology parameters of the active Japurá and Solimões rivers with the scale of the recent scrolls bars and improve the paleohydrological interpretations. In face of these objectives, the following results were achieved: the establishment of a structured database based on data from the Agência Nacional de Águas (ANA); the processing of such data in a script in Python; the measurement of scroll bars curvature radii in modern alluvial plains and correlation of these with discharge parameters of active rivers; and the interpretation of the scale and paleodischarge of the paleoriver responsible for the Pleistocene terraces in the target area. Based on the results it is possible to affirm that there is a great similarity between the scroll bars radii in the Pleistocene terraces and those in the modern Solimões River, and that the hypothesis of similarity with the Japurá River can be discarded. The main conclusion is that the Solimões River was probably a tributary to the Negro in the Late Pleistocene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Zonas de endemismo e espécies relacionadas, destaque para a região do Napo e Negro, da qual se insere essa pesquisa. (Ribas et al., 2012).....	3
Figura 2: Arcabouço estratigráfico da Bacia do Solimões, de acordo com Wanderley Filho et al. (2007)	7
Figura 3: Classificação de estilos de canais únicos e múltiplos canais, de (Nanson & Knighton, 1996). Retirado de Kleinhans & van der Berg (2011)	13
Figura 4: Classificação de canais que relacionam o padrão esperado, carga sedimentar e variáveis hidrológicas (Schumm, 1985)	14
Figura 5: Diagrama ilustrando a formação das scrolls bars (point bar sucession) (Hickin, 1974).	15
Figura 6: Mapa das estações de medição baixadas pela plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA)	18
Figura 7: Histograma da média de dados diários de vazão (m ³ /s) do rio Maranon (Solimões-Amazonas) na estação Borja de 1986 a 2013. Observa-se que a distribuição não é normal.	19
Figura 8: Histograma da média de dados diários de cotas (cm) do rio Maranon (Solimões-Amazonas) na estação Borja de 1986 a 2013. Observa-se que a distribuição não é normal.	19
Figura 9: Evolução temporal da descarga mediana do rio Maranon (Solimões-Amazonas) na estação Borja em janela móvel de 61 meses	20
Figura 10: Evolução temporal do percentil 85 da descarga (e intervalo de confiança de 95%) do rio Maranon (Solimões-Amazonas) na estação Borja em janela móvel de 61 meses	21
Figura 11: Descarga máxima com 1% de probabilidade de ocorrência em 100 anos (AEP1%). Intervalo de confiança de 95%.....	21
Figura 12: Gráfico de variação mensal de descarga média ao longo dos anos e descarga em (m ³ /s) no eixo y. Intervalo de confiança de ± 2 sigma. Meses representados por números de 1 a 12.	22
Figura 13: Gráfico de variação mensal de descarga (mediana) percentil ao longo dos anos e descarga em (m ³ /s) no eixo y. Intervalo de confiança de ± 2 sigma	22
Figura 14: Gráfico de variação mensal de cota média ao longo dos anos no eixo x e cota em (cm) no eixo y. Intervalo de confiança de ± 2 sigma.....	23
Figura 15: Gráfico de variação mensal da mediana das cotas ao longo dos anos no eixo x e cota em (cm) no eixo y. Intervalo de confiança de ± 2 sigma	23
Figura 16: Gráfico de variação de dias de inundação por cota (cm).....	24
Figura 17: Gráfico de amplitude de variação das cotas, em metros, ao longo dos anos de 1987 a 2002	24

Figura 18: Gráfico de mês de pico e baixa nas cotas ao longo dos anos, de 1987 a 2002 com variação mensal no eixo y e meses no eixo x. A cor laranja representa os níveis de baixa enquanto a cor azul os níveis de alta. Nota-se dois pontos de baixa extrema nos anos que variam em 1992 e 1995, entre os meses de fevereiro e abril e entre 2000 e 2002.....	24
Figura 19: Exemplo do processo de medição de arcos de curvatura de scroll bars em planícies ativa do Rio Solimões	25
Figura 20: Mapa de variação de amplitudes de cotas (\pm desvio padrão 1 sigma e com mês de pico para algumas estações). Amarelo- Rio Solimões, Azul claro- Rio Juruá Verde-Rio Purus, Violeta- Rio Madeira, Rosa- Rio Içá, Vermelho- Rio Japurá, Branco-Rio Negro.....	28
Figura 21: Histograma e curvas de densidade de probabilidade de amplitude sazonal de cotas para o Rio Solimões, Afluentes da Margem Sul e Afluentes da Margem Norte	28
Figura 22: Localização das estações de medida dos raios de curvatura dos terraços pleistocênicos do interflúvio Japurá-Negro (1-5 rosa) e das planícies holocênicas dos rios Solimões (6 a 9) e Japurá (10 e 11). Localidades: 1- Alto Aiiana, 2- Alto Cauini, 3- Alto Urubaxi b, 4- Alto Urubaxi a, 5- Baixo Cauini, 6- Solimões Tabatinga, 7- Solimões S.P. Olivença, 8- Solimões Içá, 9- Solimões Tefé, 10- Japurá_Vila Bitencourt, 11- Japurá Pós-Juami.....	29
Figura 23: Boxplots mostrando os raios de curvatura do terraços pleistocênicos do interflúvio Japurá-Negro (1-5 rosa) comparados aos raios de curvatura das planícies holocênicas dos rios Solimões (6 a 9) e Japurá (10 e 11). Localidades: 1- Alto Aiiana, 2- Alto Cauini, 3- Alto Urubaxi b, 4- Alto Urubaxi a, 5- Baixo Cauini, 6- Solimões Tabatinga, 7- Solimões S.P. Olivença, 8- Solimões Içá, 9- Solimões Tefé, 10- Japurá_Vila Bitencourt, 11- Japurá Pos-Juami.....	30
Figura 24: Correlações de dados de raio de curvatura de scroll bars da planície holocênica com dados de descarga média anual de estações próximas	31
Figura 25: Curvas de distribuição de probabilidade dos raios de curvatura de scroll bars para os sistemas estudados, mostrando a semelhança entre o Rio Solimões ativo e os terraços do Pleistoceno	33
Figura 26: Correlações de dados de raio de curvatura de scroll bars da planície holocênica com dados de descarga média anual de estações próximas. Topo - raio de curvatura médio. Centro- mediana do raio de curvatura, Base- percentil 75 do raio de curvatura. Retas pontilhadas demarcam os campos de mais ou menos 2 sigma de erro padrão dos resíduos da regressão (2 sigma de para rios de canal simples e para rios de canais múltiplos).....	35
Figura 27: Exemplo de histograma de medidas de scroll bars demonstrando forte assimetria.	
.....	35

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	2
3.	OBJETIVOS	4
4.	LEVANTAMENTOS BIBLIOGRÁFICOS	5
4.1	Bacias sedimentares amazônicas.....	5
4.2	Clima e paleoclima na região amazônica.....	9
4.3	Bacias Hidrográficas.....	10
4.4	Variáveis hidrológicas.....	11
4.5	Estilos de canal e depósitos.....	12
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	18
5.1	Análise de dados hidrológicos	18
5.2	Análise de imagens de satélite	25
6.	RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÃO	27
6.1	Dados Hidrológicos.....	27
6.2	Raios de curvatura de scroll bars	29
6.3	Correlação com raio de curvatura e descarga	30
7.	INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	32
7.1	Testes de hipóteses.....	32
7.2	Correlação com o raio de curvatura e descarga.....	33
7.3	Inferências sobre a paleodescarga	35
8.	CONCLUSÕES.....	37
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1. INTRODUÇÃO

A Bacia do Rio Amazonas refere-se a uma extensa região limitada pelos escudos das Guianas e do Brasil Central, a norte e sul respectivamente, e pela cordilheira andina a oeste. Sua altitude varia como um todo em sua extensão, comumente apresentando pontos mais altos com cerca de 5000 m de altitude na região dos Andes, ou 2000 m na região do escudo das Guianas, entretanto a maior parte da bacia encontra-se abaixo de 600 m de altitude.

Estudos têm sugerido idades do Mioceno para o estabelecimento do sistema fluvial moderno (e.g. Hoorn et al. 2010), ou ainda mais jovens desde o Plio-Pleistoceno (Campbell et al., 2006; Horbe et al., 2013; Nogueira et al., 2013) até meados do final do Pleistoceno (Rasanen et al., 1990; Rossetti et al., 2005, 2015). Recentemente, um cenário paleogeográfico alternativo foi abordado, sugerindo que o desenvolvimento da drenagem na Amazônia moderna ocorreu em etapas desde o final do Oligoceno/começo do Mioceno, até o Quaternário e não somente em um único evento (Van Soelen et al., 2017). Depósitos do Plio-Pleistoceno, chamados de Formação Içá (Maia et al., 1977) e outras formações sedimentares trazem importantes elementos para reconstrução do sistema fluvial amazônico.

A compreensão do processo evolutivo dos depósitos quaternários que fazem parte da construção dos terraços de terra firme entre o interflúvio Japurá-Negro, região não inundável, é essencial para o entendimento geológico, biológico e paleogeográfico da Bacia do Amazonas e do seu sistema fluvial. Este trabalho de formatura tem o intuito de contribuir para o entendimento de processos evolutivos através de feições sedimentares reliquias conhecidas como *scroll bars*, que são estruturas em terra firme análogas aos depósitos de rios ativos em planícies de inundação e de medidas de paleocorrente, sendo ambos indicativos da existência de um sistema fluvial que fluía para o rio Negro, a partir da região próxima a confluência entre os rios Japurá e Solimões.

O presente projeto pretende avaliar, através de estudos comparativos da escala das estruturas de *scroll bars* nos terraços com as da planície ativa, se o sistema de terraços da região de Maraã (AM) registra um paleocurso de um grande rio fluindo para a Bacia do Rio Negro e testar as hipóteses de este sistema representar um paleocurso do Rio Solimões ou do Rio Japurá. Além da comparação direta, pretende-se obter parâmetros estatísticos dos rios ativos, obtidos da base de dados da Agência Nacional de Águas, para tentar correlacionar elementos da hidrologia dos Rios Japurá e Solimões com as *scrolls bars* recentes e aprimorar a interpretação das estruturas análogas preservadas nos terraços.

2. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

A reconstrução dos sistemas fluviais na área de estudo traz implicações para diversas áreas científicas, em especial, a Geologia, a Paleogeografia e a Biogeografia. No que tange a Geologia, analisar e compreender a dinâmica do sistema fluvial moderno e os processos de formação dos terrenos de terra firme são fundamentais para tentar compreender, comparativamente, qual o comportamento desses rios em diferentes momentos do Quaternário e os depósitos que rios de diferentes portes deixaram no registro geológico.

Evidências geológicas e filogenéticas da Amazônia, quando comparadas com a formação dos Andes, relacionam-se em diversos aspectos, especialmente na evolução do ecossistema amazônico. A elevação dos Andes teve como resultados efeitos topográficos e climáticos responsáveis por mudanças fundamentais na paisagem amazônica, reconfigurando os padrões de drenagem e criando um vasto influxo de sedimentos na bacia (Hoorn et al., 2010). A explicação da dinâmica recente, entretanto tem escapado aos estudos do Quaternário na região, desse modo abordar um amplo sistema de terraços de incisão relativamente recente promoverá uma nova abordagem na compreensão da paleogeografia amazônica.

A Amazônia é um dos principais alvos dos estudos de biodiversidade e endemismo de espécies, e a explicação para o desenvolvimento dessa diversidade ainda é controversa. Os mecanismos causais do endemismo associam-se essencialmente a duas hipóteses: a primeira é a hipótese dos refúgios (Haffer, 1969) que identifica forçantes orbitais do clima e consequentemente expansão e contração das florestas úmidas, como promotora do isolamento e diferenciação. Uma segunda hipótese aponta que a dinâmica dos rios, mediada tectonicamente, tem sido a principal responsável pelo isolamento e endemismo de espécies (Ribas et al., 2012). Consequentemente pode-se dividir a região amazônica em zonas de endemismo (Figura 1), limitadas principalmente pelo curso de grandes rios. A indefinição sobre os limites entre as zonas do Jaú/Negro e do Napo, pode relacionar-se com a existência de um sistema aluvial que fluía da posição atual do Japurá ao Negro, e a descrição das feições deposicionais e da hidrologia desse sistema é justamente o mote desse trabalho.

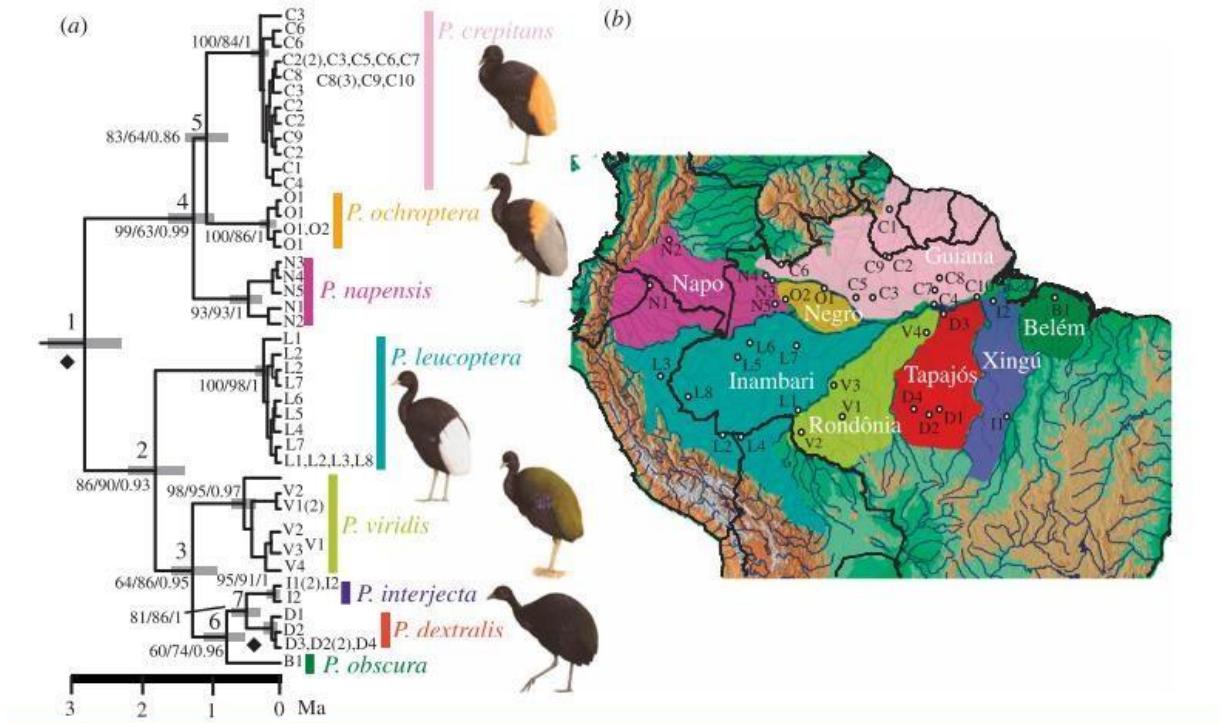


Figura 1: Zonas de endemismo e espécies relacionadas, destaque para a região do Napo e Negro, da qual se insere essa pesquisa. (Ribas et al., 2012)

Com este trabalho, espera-se obter resultados capazes de contribuir na compreensão da dinâmica fluvial dos Rios Japurá e Solimões, para entender a evolução dos depósitos da área de estudo, contribuir com os estudos de paleogeografia e de evolução biogeográfica da Amazônia Central.

3. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a obtenção de inferências paleohidrológicas dos sistemas aluviais responsáveis pelos depósitos dos terrenos de terra firme no sistema de terraços da região de Maraã, no interflúvio entre os rios Japurá e Negro. De modo mais específico, pretende-se cumprir os seguintes objetivos:

- Obter medidas de raio de curvatura das *scroll bars* das planícies ativas dos rios Solimões e Japurá e de estruturas análogas preservadas nos terraços do interflúvio Japurá-Negro na região entre Maraã (AM) e Barcelos (AM).
- Organizar uma base de dados com parâmetros estatísticos da hidrologia dos rios Japurá e Solimões com base nas estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas, disponibilizadas no site Hidroweb.
- Realizar análises estatísticas e testes de hipóteses para avaliar se o sistema de terraços da região de Maraã (AM) registra um paleocurso do Rio Solimões ou do Rio Japurá fluindo para o Rio Negro.
- Correlacionar tentativamente elementos da hidrologia dos Rios Japurá e Solimões (vazão efetiva, vazão de canal pleno, variabilidade sazonal, variabilidade inter-anual, intervalo de recorrência de cheias) com a escala das *scroll bars* recentes.
- Aprimorar a interpretação das estruturas de *scroll bars* preservadas nos terraços com base na correlação com elementos da hidrologia ativa.

Com a análise dos dados espera-se que ao final do trabalho seja possível estabelecer uma correlação entre o sistema atual e a paleodinâmica dos rios responsáveis pelos terraços.

4. LEVANTAMENTOS BIBLIOGRÁFICOS

4.1 Bacias sedimentares amazônicas

As bacias sedimentares amazônicas são limitadas por terrenos do Cráton Amazônico, sendo ao norte pelo Escudo das Guianas e ao sul pelo Escudo do Brasil Central. Juntos, esses terrenos são compartimentados em quatro províncias geotectônicas, que apresentam por sob continuidade as Bacias do Solimões e Amazonas (Cordani et al, 1984). A bacia do Solimões está sobreposta às províncias Rio Negro-Juruena e Cinturão Rondoniense (Caputo et al., 1991). As bacias sedimentares são limitadas de leste a oeste pelos arcos Gurupá, Puruse Envira, e pelos arcos Vaupés e Fitzcarrald, a norte e sudoeste respectivamente. (Cordani et al, 1984).

A área de estudo deste trabalho está inserida na Bacia do Solimões, situada na região Norte do Brasil, abrange uma área total de cerca de 600.000km², sendo separada a oeste pela Bacia do Acre e a leste pela Bacia do Amazonas, assim como pelos arcos de Iquitos e Purus, respectivamente (Caputo et al., 1991). Dentro da bacia, subdivide-se em duas áreas bem definidas e separadas pelo arco de Carauari: a Sub-bacia do Jandiatuba, a oeste, e a leste a Sub-bacia do Juruá (Wanderley Filho et al., 2007).

A Bacia do Solimões é uma bacia interior que pode ser classificada de acordo com a classificação de bacias de Kingston et al. (1983) como uma de bacia intracratônica. As bacias intracratônicas fanerozóicas do Brasil estão situadas no interior da Plataforma Sul-Americana (Almeida et al., 2000), onde se depositaram espessas sequências de rochas sedimentares Paleozoicas e Mesozoicas. Seus depocentros foram condicionados por estruturas herdadas do Ciclo Brasiliano Pan-Africano (Milani e Thomaz Filho, 2000). No Brasil, essas bacias abrangem tanto as sinéclises paleozoicas, como as bacias Mesocenozoicas e Cenozoicas, sendo que em alguns casos estão superpostas às sinécleses. A evolução dessas bacias consiste em uma combinação e sucessão de diversos processos de formação de bacias, que incluem a extensão continental, subsidência termal sobre grande área e ajuste isostático posterior (Klein, 1995).

No geral, essas bacias têm contorno oval ou arredondado e estão superpostas a riftes, sendo sua sedimentação continental ou marinha e de acordo o Sistema de classificação de Bacias de Kingston et al. (1983), podem ser dos tipos IF/IS, IS, MS e MSIS.

O embasamento da bacia do Solimões, distingue-se nas sub-bacias mencionadas. Na Sub-bacia do Jandiatuba, o substrato Proterozóico sobre o qual se implantou a Bacia do Solimões é constituído de rochas ígneas e metamórficas, enquanto na Sub-bacia do Juruá se destacam além dessas, rochas metassedimentares (Wanderley Filho et al., 2007). Conforme mencionado, a bacia do Solimões está sobreposta as províncias Rio-Negro-Juruena e Cinturão Rondoniense, referindo respectivamente aos substratos das Sub-bacias Juruá e

Jandiatuba (Wanderley Filho et al., 2007). Sobre esses cinturões instalou-se uma fase rifte no Paleoproterozoico que culminou na deposição de sedimentos em ambiente fluvial com influência marinha.

O arcabouço estratigráfico da Bacia do Solimões aqui apresentado baseia-se em pesquisas desenvolvidas e mencionadas ao longo deste trabalho, como (Silva, 1987ab), (Silva, 1988), (Caputo et al., 1991), (Eiras et al., 1994), (Wanderley Filho et al., 2007) e (Caputo, 2014)

De acordo com Wanderley Filho et al. (2007), o arcabouço estratigráfico da Bacia do Solimões (Figura 2) pode ser dividido em cinco sequências deposicionais limitadas por discordâncias regionais, a saber: Ordoviciano, Siluriano Superior-Devoniano Inferior, Carbonífero Superior-Permiano e Cretáceo Superior-Quaternário, sendo denominadas então como: Formação Benjamin Constant, Formação Jutaí, Grupo Marimari, Grupo Tefé e Grupo Javari.

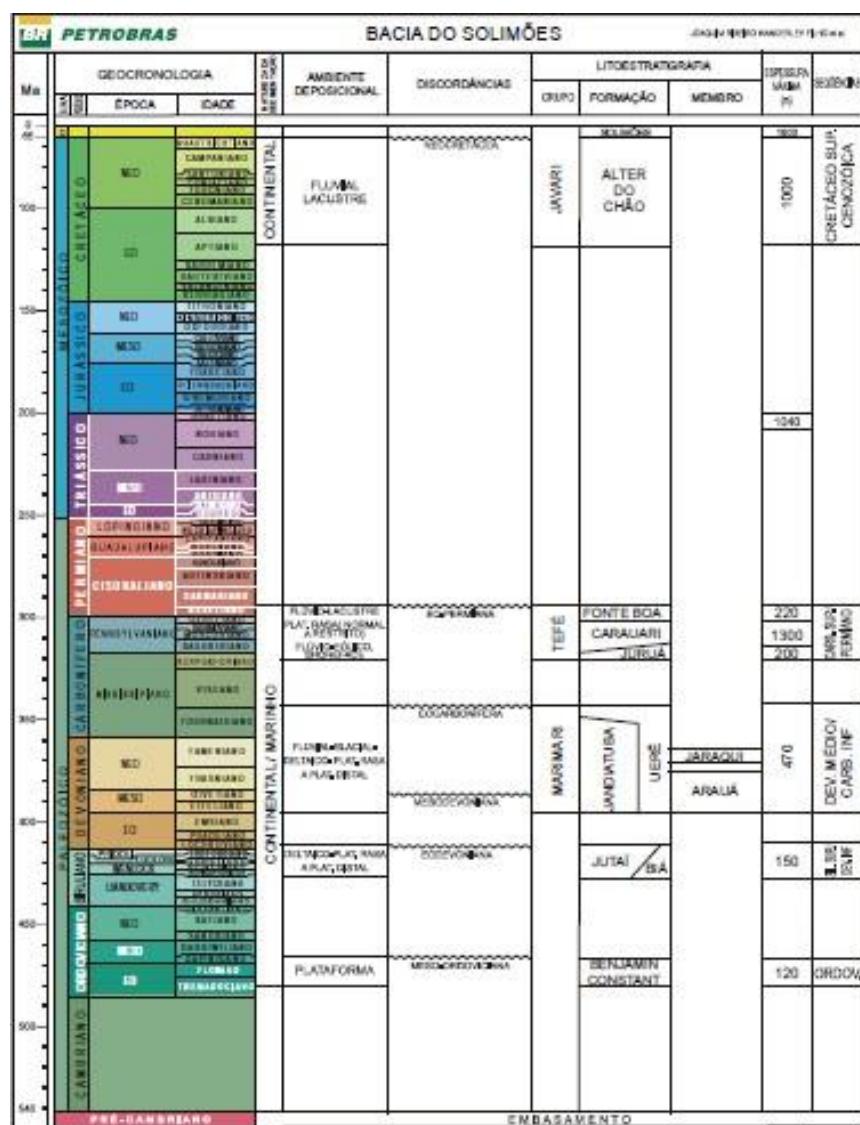


Figura 2: Arcabouço estratigráfico da Bacia do Solimões, de acordo com Wanderley Filho et al. (2007)

A Formação Benjamin Constant, Meso-ordoviciano, refere-se ao primeiro registro da transgressão marinha Fanerozóica na bacia, estando restrita à Sub-bacia do Jandiatuba. Suas variações faciológicas é reflexo dos ambientes de alta energia, possivelmente de praia ou marinho raso dominado por ondas, sendo depositado em *onlap* sobre o flanco oeste do Arco de Caraúri. (Wanderley Filho et al., 2007). Na Formação Jutaí, novas incursões marinhas aconteceram do Neossiluriano ao início do Devoniano, compondo o registro de pacotes transgressivo-regressivos. As fácies distais são argilosas, enquanto as proximais são arenosas, argilosas e subordinadamente, dolomíticas (Wanderley Filho et al., 2007). Além disso, assim como a Formação Benjamin Constant, a Formação Jutaí também está em *onlap* contra o arco de Caraúri, devido ao avanço do mar a leste, que em seu ciclo final atingiu a zona de charneira do arco, sedimentando toda a zona de charneira do arco de Caraúri.

Já no Mesodevoniano deu-se espaço para uma nova incursão marinha na região plataforma do Juruá. Neste período o mar ultrapassou o Arco de Caraúri, que já possuía uma feição positiva bem delineada, alcançando a área plataforma do Juruá que passou a ter comportamento subsidente (Wanderley Filho et al., 2007). Esta sequência deposicional representada pelo Grupo Marimari refere-se a de maior variedade faciológica na Bacia do Solimões, tendo em vista que a sedimentação foi bastante controlada por fatores tectônicos, climáticos e ambientais, enquanto na Sub-Bacia do Jandiatuba predominou uma sedimentação essencialmente argilosa em ambiente marinho mais profundo (Silva, 1987 e 1988). Este grupo subdivide-se em duas formações: Uerê, que contém as rochas com espículas silicosas, e Jandiatuba, que consiste em folhelhos pretos e diamictitos. Alguns arenitos proximais, com raras espículas de esponjas ou delas desprovidos. O recuo marinho observado nesta fase pode ser produto da orogênese Eo-Herciniana (Porsche, 1985; Silva, 1987ab e 1988).

Após a regressão marinha causada pela orogenia eo-Herciniana, a bacia passou por um longo processo de exposição e erosão, peneplanizando uma longa área. Um novo ciclo deposicional deu início no Mesocarbonífero, representado pelo Grupo Tefé, que inicialmente associou-se a uma sedimentação inteiramente de terrígenos com a deposição de sedimentos arenosos e argilosos em ambiente continental, subambientes fluviais e estuário e, depois, predominantemente eólico costeiro (Lanzarini, 1984; Cunha et al. 1988). Como o clima também mudou radicalmente, passando de frio para quente e árido, teve-se o desenvolvimento de dunas eólicas que foram afogadas e retrabalhadas posteriormente devido a quarta e última incursão marinha que também atuou em lençóis de areia e planícies salinas costeiras, ultrapassando a área elevada que hoje refere-se ao Arco de Purus interligando as bacias do Solimões e do Amazonas. (Wanderley Filho et al., 2007)

A oscilação do lençol freático, resultado da proximidade do mar, fez com que diversos depósitos eólicos fossem preservados. Este ciclo sedimentar consiste em um evento transgressivo-regressivo cíclico que teve como consequência a formação de pequenos ciclos evaporíticos resultantes do processo de transgressão, isolamento da bacia, perda de água por evaporação, formação de lagos hipersalinos, precipitação de evaporitos, nova transgressão e assim por diante. Com o final dessa grande regressão marinha, o ambiente continental voltou novamente com clima quente e árido o que culminou na deposição de camadas vermelhas essencialmente silticas, com raras lentes de anidrita nodular e calcário. (Wanderley Filho et al., 2007). O Grupo Tefé é composto pelas formações Juruá (sedimentos terrígenos basais) Carauari (evaporítica) e Fonte Boa (red beds) (Caputo, 1984).

De acordo com Wanderley Filho et al. (2007), já no Neocretáceo, a bacia apresentou novamente comportamento subsidente. Houve a implementação de um sistema fluvial de alta energia, que perdurou até o final do Cretáceo e foi responsável pela deposição de sedimentos essencialmente arenosos da formação Alter do Chão. Esse sistema fluvial foi implementado devido a mudança de clima seco e árido para úmido. Com começo do soerguimento da Cadeia Andina, ocorreu então o início do isolamento dessa bacia fluvial no Paleógeno e com a sobrecarga andina, ocorreu a flexura na placa litosférica, deslocando o depocentro da sedimentação para a região subandina. Com isso, os rios entrelaçados do Cretáceo cederam lugar a grandes lagos de água rasa e doce, que foram alimentados por um sistema fluvial meandrante de baixa energia.

A partir do Mioceno, época em que ocorreu uma aceleração nas atividades geológicas andinas, a bacia passou a ser assoreada pelo abundante aporte de sedimentos oriundos do cinturão andino, onde começou-se a implementar uma rede de drenagem em direção ao Oceano Atlântico. (Wanderley Filho et al., 2007) No Quaternário, como consequência da isostática da construção andina, alguns rios tiveram seus gradientes elevados e como consequência sua competência em transportar os sedimentos. Como resultado, houve a deposição de sedimentos essencialmente arenosos entre os rios Jutaí e Negro. Essa unidade cenozóica, essencialmente argilosa de cerca de 7000m de espessura refere-se a Formação Solimões e que junto da Formação Alter do Chão, faz parte do grupo Javari. (Wanderley Filho et al., 2007).

Outros trabalhos também trazem diferentes abordagens quanto à sedimentação e arcabouço estratigráfico da Bacia do Solimões. Como é o caso do trabalho de Caputo, (1991) onde este apresenta a ideia proposta por (Silva, 1888) na qual a sedimentação da Bacia do Solimões é dividida em sete sequências deposicionais, assim como a abordagem de (Eiras et al., 1994). As descrições abordadas por estes autores, restringem-se a mostrar de forma mais detalhada os sedimentos presentes em cada unidade estratigráfica. Sendo assim, optou-se

por salientar as duas formações mais importantes para este trabalho, a Formação Solimões e Içá.

A Formação Solimões é uma unidade composta por argilito vermelho e cinza com camadas de conchas e linhito. Trata-se de uma formação muito rica em fósseis vegetais e animais (Caputo et al., 1971). A unidade representa uma molassa distal do orógeno andino que ocorre em toda bacia (Caputo, 2014) e sugere-se um ambiente deposicional fluvial meandrante fino e lagos formados por canais abandonados (Eiras et al, 1994). A Formação Içá ocorre acima e é constituída principalmente por arenitos amarelo-avermelhados, friáveis, de granulometria fina a conglomerática, às vezes sílticos argilosos e conglomerados, siltitos e folhelhos cinza e variegados depositados em meio continental, ao longo das margens dos rios da região. Trata-se de um terraço depositado sobre a Formação Solimões no Quaternário, mais especificamente no Plio-Pleistoceno (Maia et al., 1977).

4.2 Clima e paleoclima na região amazônica

O clima na região amazônica é produto de uma combinação de vários fatores e, no geral, apresenta altas médias de temperatura que não variam muito, isso devido aos altos valores de energia que atingem a superfície e fazem com que a temperatura do ar não apresente muita variação ao longo do ano. Medidas realizadas na Amazônia Central, indicam que o calor recebido na superfície tem seu maior nível nos meses de Setembro/Outubro, enquanto que os mínimos são nos meses de Dezembro à Fevereiro (Horel et al., 1989). Possui uma precipitação média de aproximadamente 2300 mm/ano, muito embora algumas regiões localizadas na fronteira entre Brasil, Colômbia e Venezuela apresentem uma média anual de 3500mm (Fisch et al., 1991). Na parte norte da bacia, a precipitação é distribuída de maneira heterogênea, enquanto a parte sul tem estações seca e úmida distintas, tendo sua máxima precipitação no verão (Nobre et al., 2009)

Existem alguns sistemas atmosféricos que embora não seja os únicos, são essenciais no controle do clima na região amazônica, sendo alguns destes: a) linhas de estabilidade: são responsáveis pela chuva na costa litorânea dos estados do Amapá e Pará, além da precipitação na Amazônia Central no período de seca (Fisch et al., 1991) b) ENOS (El Niño/Oscilação Sul): devido ao aquecimento das águas no oceano Pacífico promove a alteração atmosférica da Célula de Walker, que atua inibindo a formação de atividades convectivas (Nobre e Rennó, 1985; Nobre e Oliveira, 1986) gerando períodos de seca entre janeiro e fevereiro. c) Circulação Geral e Alta da Bolívia: refere-se ao desenvolvimento de um anticiclone nos meses de verão situado no altiplano boliviano que tem sua manutenção associado a convergência da umidade que vem de nordeste e de leste, provocando forte convecção, condensação e liberação de calor latente (Fisch et al., 1991) d) chuvas orográficas devido a ascensão orográfica da umidade transportada pelos ventos alísios de leste da Zona de Convergência Intertropical (Fisch et al., 1991) e) sistemas frontais: refere-se a penetração

de uma intensa frente fria denominada de friagem, onde esse sistema provoca a organização e formação de uma banda de nuvens orientada no sentido NW/SE, aumentando assim o regime de precipitação.

Todo esse comportamento climático na Amazônia não foi constante durante os últimos 15.000 anos, o que é reflexo das alterações entre a quantidade de energia solar recebida na Terra. As mudanças climáticas e fitográficas que ocorreram durante o período Quaternário foram resultadas das frequentes alterações interglaciais e glaciais, as quais promoveram mudanças bruscas como a troca de vegetação de florestas para savanas, em períodos de clima frio e seco. As fases frias que ocorrem ao longo do Quaternário e as fases mais amenas dentro deste período são chamadas de estadiais e interestadiais. Os eventos interestadiais, que se referem ao aquecimento do Atlântico Norte, condizem com as condições de seca na Amazônia e os eventos de resfriamento são registrados como fases úmidas e abruptas continuadas. Além disso, durante o Holoceno, grandes áreas de savanas existiam na Amazônia (Fisch et al., 1991), e como consequência podemos interpretar que tais eventos de aridez ou umidade contribuem para um aporte sedimentar diferencial, desde as áreas fontes até a foz. Eventos como esses afetam a construção e destruição de terrenos, devido a mudança na competência dos canais e sendo assim, a compreensão de todo esse processo é essencial para auxiliar no entendimento da construção da paisagem amazônica.

4.3 Bacias Hidrográficas

Neste trabalho, o termo “Amazônica” é utilizado para referir-se a Bacia hidrográfica do Rio Amazonas, que tem uma área de cerca de 6.000.000 km² e abrange o Brasil, Bolívia, Peru, Equador, Colômbia, Venezuela, República da Guiana, Suriname e Guiana Francesa. O termo Amazônia também é designado para agrupar biomas ou um grupo administrativo chamado Amazônia Legal.

A Bacia Amazônica é considerada a maior bacia do planeta, sendo que o Brasil detém grande parte dela. A bacia tem a cordilheira andina como limites a oeste, e os escudos da Guiana e do Brasil Central como limites Norte e Sul, tendo como pontos mais altos os Andes ou o escudo das Guianas, indo de 6000m a 2000m respectivamente, entretanto a maior parte da bacia encontra-se abaixo de 600m.

O Rio Amazonas, passa por três países e possui nomes diferentes ao longo da sua trajetória, sendo chamado de Amazonas no Peru e Solimões e Amazonas no Brasil. É o principal rio da bacia amazônica e possui diversos tributários que formam sub-bacias de extrema importância para a sedimentologia, ocasionando ciclos anuais de deposição e erosão de sedimentos. Neste trabalho, as sub-bacias hidrográficas abordadas serão aquelas relacionadas aos rios aqui estudados, sendo eles: Juruá, Purus, Madeira, Japurá, Içá e Solimões.

- a) A sub-bacia do Juruá está localizada em grande parte nos estados do Acre e Amazonas, apresentando inúmeros meandros e uma vasta planície de alagamento, sendo que suas cabeceiras se originam no Peru e referem-se a cerca de 2% da descarga anual do rio Amazonas. A precipitação na bacia do Juruá, varia entre 1.800mm e 2.200mm, alagando suas planícies de dezembro a meados de maio.
- b) A sub-bacia do Rio Purus recobre uma área de cerca de 368.000 km², sendo que assim como o Juruá, grande parte de sua bacia está localizada nos estados do Acre e Amazonas e seu rio nasce no Peru, tendo precipitação semelhante ao rio Juruá, além do período de cheia do rio Purus coincidir com os do Rio Juruá. Suas planícies de alagamento apresentam diversos meandros abandonados e lagos de várzea, devido ao seu estilo de canal meandrante.
- c) A sub-bacia do rio Madeira refere-se a cerca de 20% de toda a bacia amazônica, e apresenta uma área de cerca de 1.4 milhões de km², tendo suas cabeceiras localizadas nos Andes, Bolívia e Brasil. É considerado o maior tributário do rio Amazonas, por contribuir com cerca de 15% de todo sedimento e água levada até o oceano Atlântico.
- d) A sub bacia do Japurá-Caquetá tem cerca de 289.000 km² e grande parte do rio Japurá passa pela Colômbia onde é conhecido como Caquetá e o restante passa pelo Brasil onde é conhecido como Japurá. A precipitação anual varia de 2.300mm a 3.000mm, chegando a 5.000mm nos andes.
- e) A sub bacia do Içá representa uma área de 148.000km² e está localizada na Colômbia, Equador, Peru e Brasil. As cabeceiras do rio encontram-se cerca de 4.000m de altitude nos Andes colombianos e recebem anualmente cerca de 3.000mm de chuva.
- f) A bacia do rio Solimões abrange uma área de cerca de 2.000.000 km² e possui uma precipitação média de 2300mm, embora ainda tenha regiões na fronteira entre Brasil, Peru, Colômbia e na encosta dos Andes em que o total anual atinge cerca de 3500 mm e 4000 mm. (Val et al., 2010)

4.4 Variáveis hidrológicas

A interpretação dos dados hidrológicos discutidos aqui neste trabalho tem como aspecto fundamental a compreensão dos conceitos relacionados a variáveis hidrológicas a fim de interpretar como cada uma delas se comporta em relação aos rios e planícies e a partir disso entender a reconstrução dos sistemas fluviais. Neste trabalho, têm-se algumas

principais variáveis hidrológicas como vazão, cota e outras, que juntas, serão discutidas abaixo.

A vazão ou descarga, refere-se ao volume de líquido que passa através de uma seção, em determinada unidade de tempo (ANA), tem como unidade (m^3/s) e pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$Q = \frac{V}{t}$$

sendo, Q = vazão, V = Volume de água e t = tempo.

A cota, ou cota fluviométrica, refere-se à altura da superfície de água referida ao zero em uma escala graduada em centímetros (ANA). Tem grande importância neste trabalho pois trata-se de uma das variáveis que permitem analisar a variação altimétrica que um sistema fluvial apresenta. A variação da vazão e cota estão associadas a outros fenômenos que ocorrem devido a alterações dessas variáveis e que afetam diretamente a sedimentação, estilo de canais, planícies aluviais, deposição e outros fatores importantes para o desenvolvimento do trabalho.

Os pulsos de inundação, definido por Junk (1989) é definido como a variação sazonal da descarga fluvial e ocorrem justamente quando a vazão acaba ultrapassando o nível em que é suficiente para manter o curso do rio confinado ao canal, especificamente quando a vazão é maior que a necessária para atingir a altura do banco, a cota acaba aumentando e ocorre o extravasamento para as planícies aluviais. Essa variação na cota fluviométrica é resultado da precipitação nas bacias, mais de um regime fluviométrico e a ocorrência de *backwater*. Como os principais tributários não apresentam sincronicidade entre a descarga e o rio principal, gerando *backwater* fazendo com que as cotas fiquem altas mesmo com a diminuição das descargas dos tributários (Meade et al., 1991). Esses fatores são de extrema importância pois é na fase de cheia que ocorre a criação dos depósitos de planícies e de ambientes biológicos aquáticos que são discutidos aqui neste trabalho.

4.5 Estilos de canal e depósitos

Os rios apresentam padrões morfológicos em planta distintos uns dos outros tendo sinuosidade, largura e outras características que juntas, promovem a classificação de diferentes estilos de canais. Inicialmente as classificações agrupavam rios em três padrões, como retilíneo, meandrante e entrelaçado (Leopold & Wolman, 1957), mas atualmente também são reconhecidos padrões com rios de canal único e rios com múltiplos canais (Nanson & Knighton, 1996) (Figura 3).

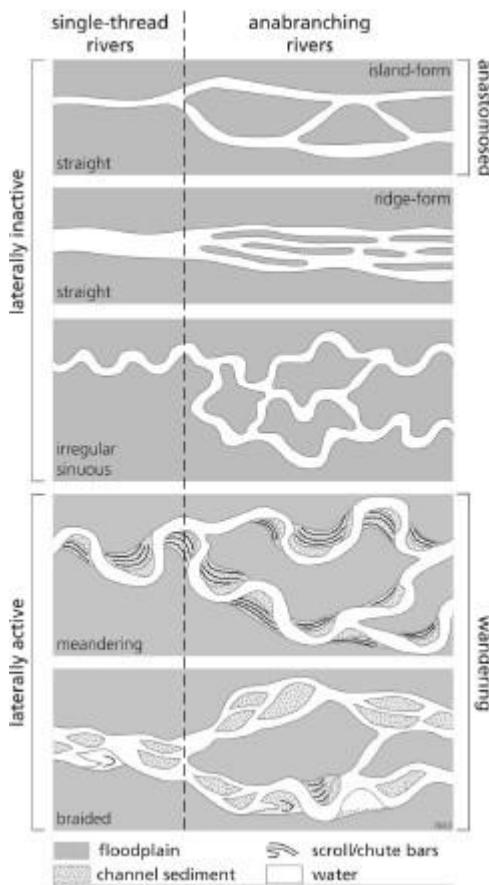


Figura 3: Classificação de estilos de canais únicos e múltiplos canais, de (Nanson & Knighton, 1996).
Retirado de Kleinhans & van der Berg (2011).

Para a classificação de um estilo de canal (Figura 4), as variáveis de velocidade do fluxo existente nos diferentes estilos, assim como a carga sedimentar e tipo de grão transportado ajudam a determinar alguns estilos, (Schumm, 1985) entretanto não são suficientes para explicar a ocorrência dos padrões de canal. O método mais comum para diferenciar numericamente os diferentes padrões de canal é por curvas de classificação de canal que relacionam variáveis como a declividade pela descarga média anual (Lane, 1957), declividade pela descarga de capacidade máxima (Leopold & Wolman 1957) e a razão declividade/número de Froude pela razão largura/profundidade (Parker, 1976).

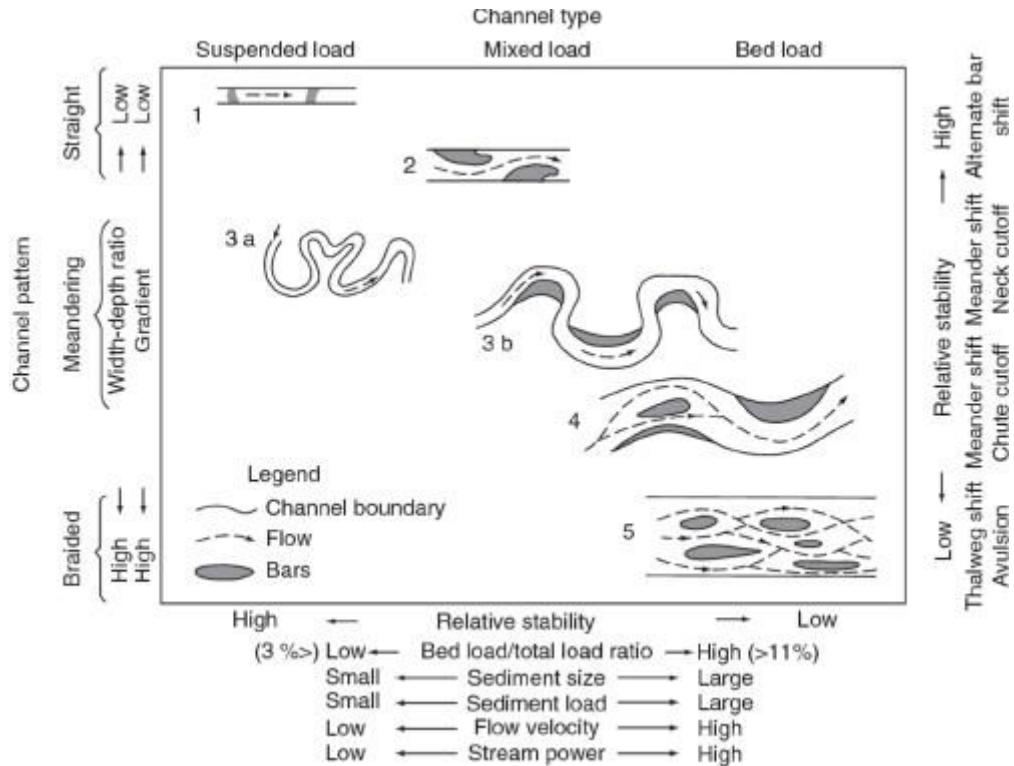


Figura 4: Classificação de canais que relacionam o padrão esperado, carga sedimentar e variáveis hidrológicas (Schumm, 1985).

Tendo em vista os diferentes estilos de canais mencionados acima, será abordado brevemente algumas características comuns a eles, dando mais atenção as feições fluviais morfológicas formadas a partir dos canais meandrantes, pois são essas as estruturas análogas preservadas nos terraços do interflúvio Japurá-Negro na região entre Maraã (AM) e Barcelos (AM) e que são estudadas neste trabalho.

Os rios meandrantes são ricos em meandros em que ocorre a erosão no banco externo (côncavo) e deposição no banco interno (convexo) devido a vazão formadora do canal. Durante a cheia o banco externo é erodido e a largura do canal aumenta, e na fase de menor vazão a competência diminui devido a maior largura e menor descarga ocorrendo a deposição no banco interno. Conforme ocorre o processo de deposição no banco interno forma-se um pacote de sedimento chamado de as barras de pontal (*scroll bars*) (Figura 5) e esses depósitos individualmente compõem uma sucessão de cristas (*ridges*) e depressões (*swales*).

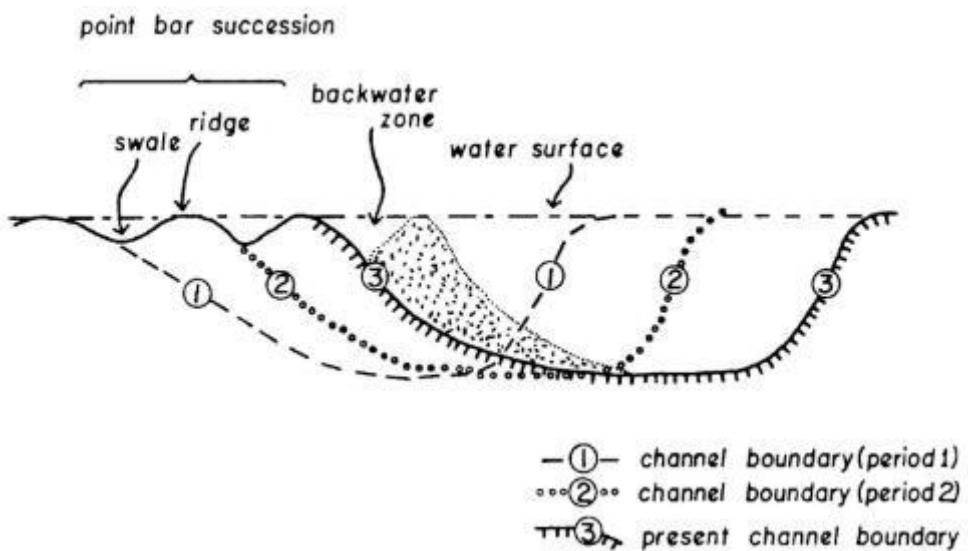


Figura 5: Diagrama ilustrando a formação das scrolls bars (point bar sucession) (Hickin, 1974).

Os rios entrelaçados apresentam erosão em ambos os bancos devido a alta declividade, sendo encontrado em áreas montanhosas, relacionado a ambiente de alta energia. Em períodos de menor descarga formam-se barras de meio de canal, característica desse estilo de canal.

Rios sinuosos e retilíneos apresentam baixa energia e promovem o transporte de pouca carga sedimentar e uma baixa erosão. Possuem baixa descarga e estão presentes em zonas de baixa declividade. Um exemplo desse estilo de canal é o Rio Purus que próximo da zona de convergência para o seu afluente o Rio Solimões, perde declividade e apresenta padrão retilíneo. O padrão fluvial anastomosado refere-se aos vários ramos de um canal retilíneo ou sinuoso que em momentos de instabilidade não apresentam potência para que haja a erosão dos bancos, promovendo a deposição progressiva e generalizada de sedimentos (agradação) gerando a avulsão, mudando assim a posição do canal (Kleinhans et al., 2011).

Os rios do tipo *anabranching* ocorrem em diferentes gradientes e apresentam intervalos de potência de corrente distintos. Formam um sistema com múltiplos canais separados por ilhas aluviais semi-permanentes (Nanson & Knighton, 1996). Os rios *wandering* são os estilos de multicanais de rios meandrantes e entrelaçados que se alternam em trechos de canal único e trechos de múltiplos canais. São estáveis, mas também instáveis, tendo a capacidade de erodir as duas margens criando ilhas e barras ao longo do percurso (Church, 1983). Um exemplo de rio neste estilo é o Amazonas/Solimões, e um exemplo de rio no estilo *anabranching* é o Japurá, que embora apresente múltiplos canais em quase todo o sistema ele raramente apresenta trechos de canal único, sendo *anabranching* mas não *wandering*.

O presente trabalho apresenta feições encontradas no interflúvio entre rio Japurá-Negro e por isso, será discutido um pouco sobre a dinâmica fluvial e feições morfológicas desse estilo de canal. O rio Japurá, é um dos maiores tributários amazônicos, com uma descarga média de 18.620 m³/s e comprimento de 2.820km, o rio nasce nos Andes colombianos, com o nome de Caquetá, drenando extensas áreas de unidades do Cretáceo e Paleogeno. O rio ainda drena terrenos de menor extensão do Neógeno e Quaternário. Na porção aluvial o rio drena apenas terrenos mais recentes até atingir a Serra de Chiribiquete, uma porção aflorante do Escudo das Guianas, e atravessar o estreito Cânion de Araracuara formando corredeiras, após o qual ele volta a fluir por terrenos do Quaternário até sua confluência com o rio Solimões (Shobbenhaus, C. & Bellizia, 2001).

No baixo curso do Japurá a morfologia dos terrenos não inundáveis é relativamente monótona, composta por terrenos amplos, de baixa altitude, e de topo plano, cujos limites podem ser graduais ou marcados por quebras de relevo de maior declividade. Em direção à montante sobressaem-se colinas, que surgem como ondulações na superfície devido aos efeitos da erosão causada pela intensa rede de drenagem (Fernandes et al., 1977, Maia et al., 1977). O pulso de inundação dos rios amazônicos promove o alagamento de amplas planícies, e esse fenômeno contribui para a individualização de duas zonas: uma “terra firme”, formada pelos “altos terraços” apresentando uma superfície relativamente plana não inundável, e outra constituindo uma faixa inundável de sedimentos recentes (quaternários) ao longo das calhas dos rios chamada de “várzea” (Ayres, 1993).

A Formação Solimões (Paleogeno-Neogeno) que aflora em toda a Bacia do Solimões e antecede as formações quaternárias, tem sua sedimentação associada a um ambiente redutor justificada pela presença de níveis carbonosos, com grande abundância de fósseis, indicando um ambiente de águas rasas e pouco movimentado (Maia et al., 1977). Sobreposta à Formação Solimões por discordância, a Formação Içá, de idade quaternária pleistocênica é composta por arenitos silto-argiloso, amarelo avermelhado, oxidado localmente conglomerático. Essa unidade litoestratigráfica é, de fato, um sistema de terraços pleistocênicos distribuídos em uma grande área e com complexa evolução temporal (Pupim et al., 2019) Sobre esses depósitos assenta-se os depósitos mais recentes aluvionares, acompanhando o curso dos rios, constituídos de cascalho, conglomerado, areia silto-argilosa e argilas variadas (Maia et al., 1977).

Altos terraços se formam nessa região não inundável, com estruturas de antigas barras visíveis em imagens de satélite e modelos digitais de terreno. As *scroll bars* são formas de deposição encontradas tipicamente em planícies de rios ativos em regiões não inundáveis próximas à planície de inundação dos rios. Essas marcas fluviais permitem identificar o curso dos rios abandonados (Ruokolainen et al., 2019) e fazer inferências sobre a escala do rio (Galeazzi, 2020).

Estas feições sedimentares atingem grande porte nos terraços de terra firme, e são comparáveis às do Solimões, onde o tamanho, forma e raio de curvatura apresentam correlação com a vazão do rio. O Rio Japurá é o terceiro rio de maior vazão da bacia do Amazonas e gera depósitos de grande porte. A dinâmica fluvial destes rios é, portanto, importante para definir o sistema responsável pela formação das feições observadas no interflúvio Japurá-Negro.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Análise de dados hidrológicos

Dados de 39 estações de medição (Figura 6) dos disponibilizados no sistema Hidroweb da Agência Nacional de Águas foram processados em *script* escrito em Python (Link de acesso para exemplo da estação 10064000, do rio Solimões: <https://colab.research.google.com/drive/1nvY9Vta4maSOUFK0IYYQSU5uxdKDWxDS?usp=sharing>), permitindo o cálculo de estatísticas anuais e sazonais relativas à vazão e cota. Essa base de dados foi utilizada para análises temporais e espaciais e comparações entre os diferentes rios estudados (Japurá, Içá, Purus, Juruá e Solimões).

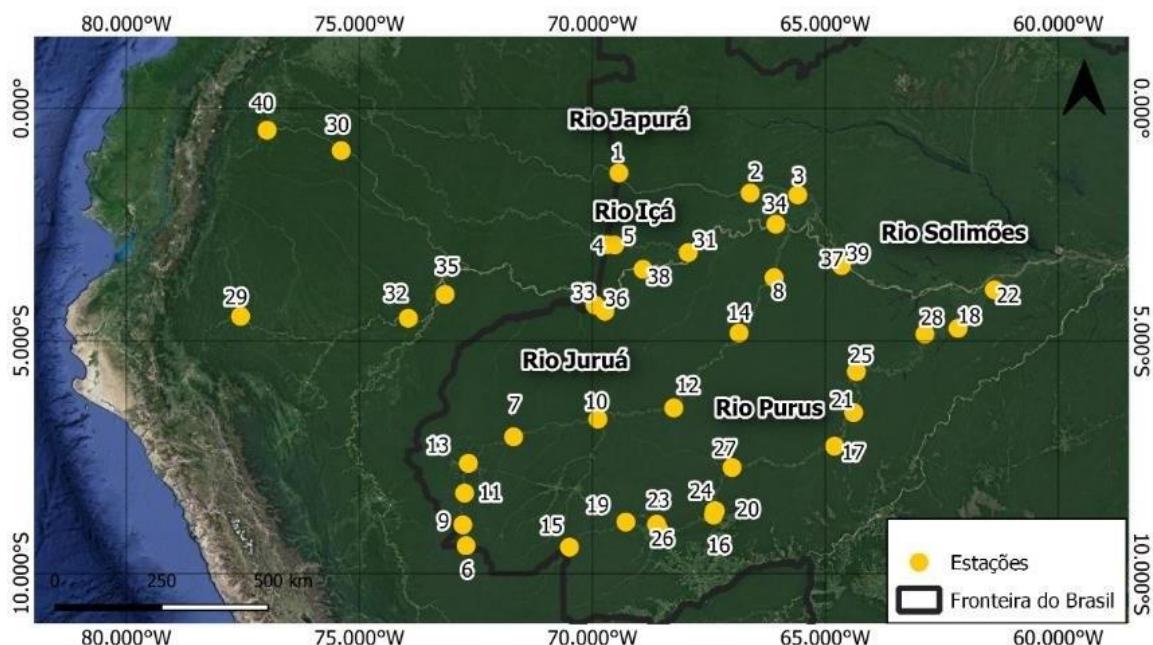


Figura 6: Mapa das estações de medição baixadas pela plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas (ANA).

A fim de alcançar o objetivo final de estabelecer uma planilha com todos os dados compilados e analisar as variações entre os sistemas fluviais estudados, processou-se os dados em códigos escritos em Python e comumente obteve-se gráficos ao longo das análises que serão discutidos abaixo. Para compreender quais parâmetros estatísticos seriam utilizados, optou-se por realizar a média das medidas obtidas ao longo da série histórica, gerando posteriormente histogramas de vazão e cota. (Figuras 7 e 8).

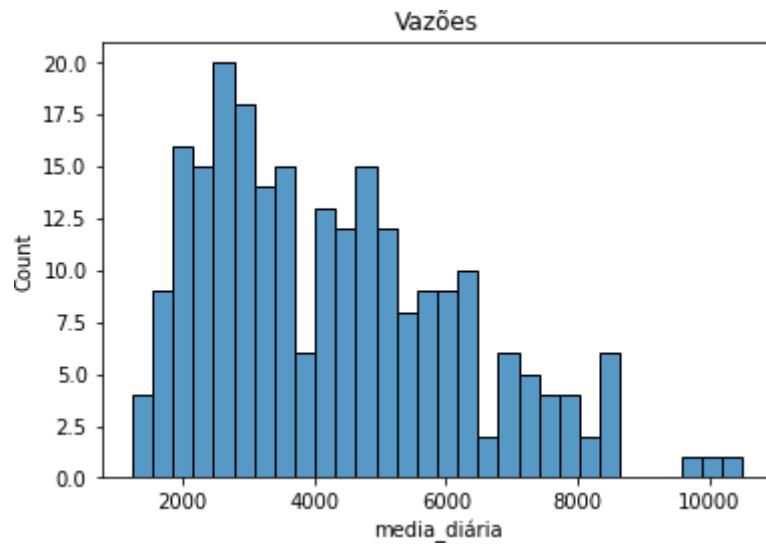


Figura 7: Histograma da média de dados diários de vazão (m^3/s) do rio Maranon (Solimões-Amazonas) na estação Borja de 1986 a 2013. Observa-se que a distribuição não é normal.

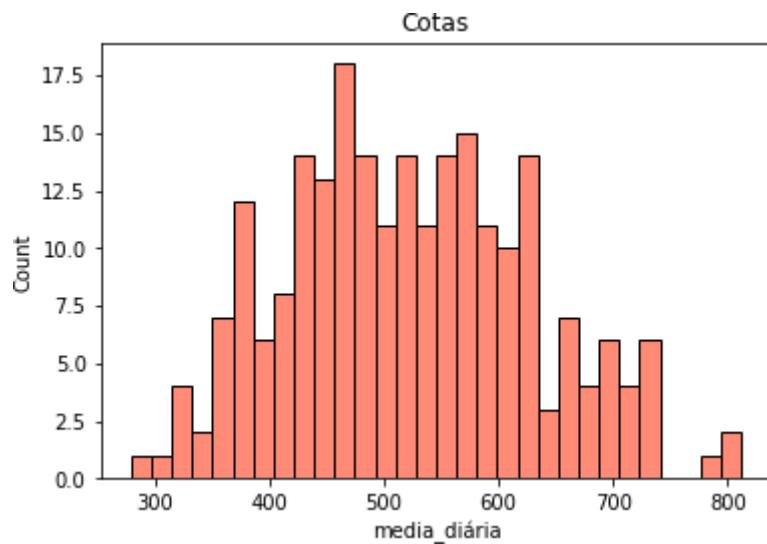


Figura 8: Histograma da média de dados diários de cotas (cm) do rio Maranon (Solimões-Amazonas) na estação Borja de 1986 a 2013. Observa-se que a distribuição não é normal.

Pelo fato da distribuição não ser normal então não podemos utilizar a evolução da média e do desvio padrão. Decidiu utilizar a mediana e percentis (Figuras 9 e 10) escolhidos para fazer o cálculo dos dados estatísticos.

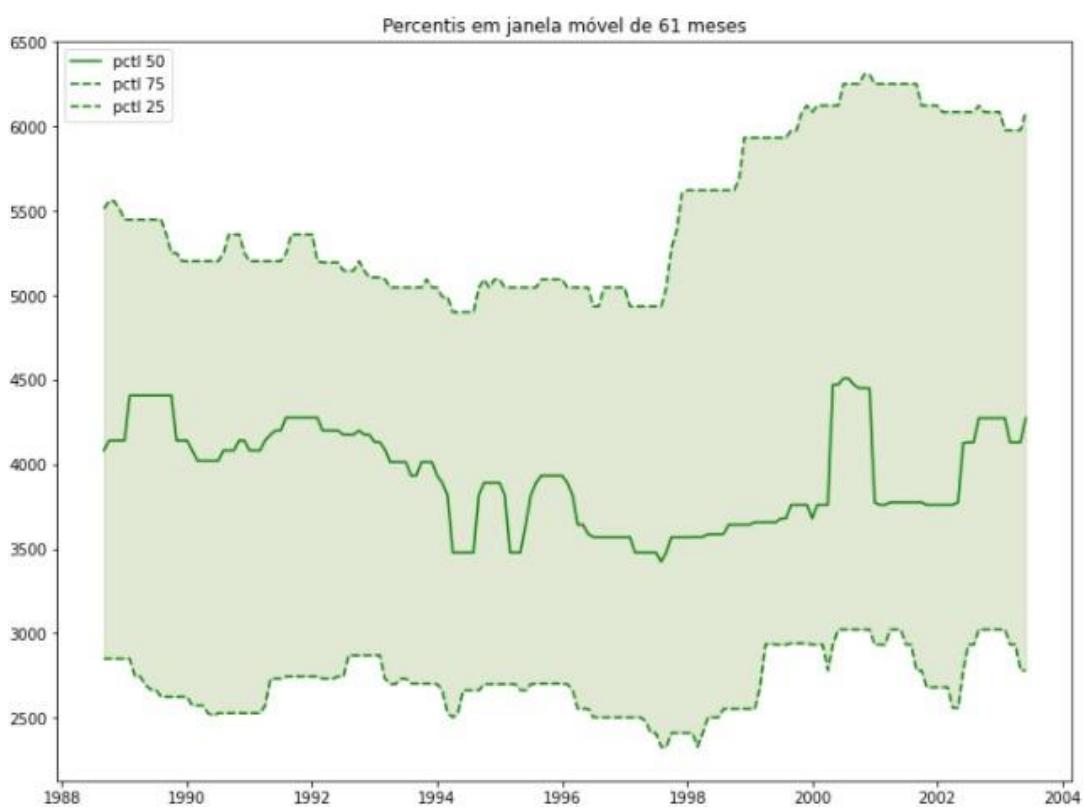


Figura 9: Evolução temporal da descarga mediana do rio Maranon (Solimões-Amazonas) na estação Borja em janela móvel de 61 meses.

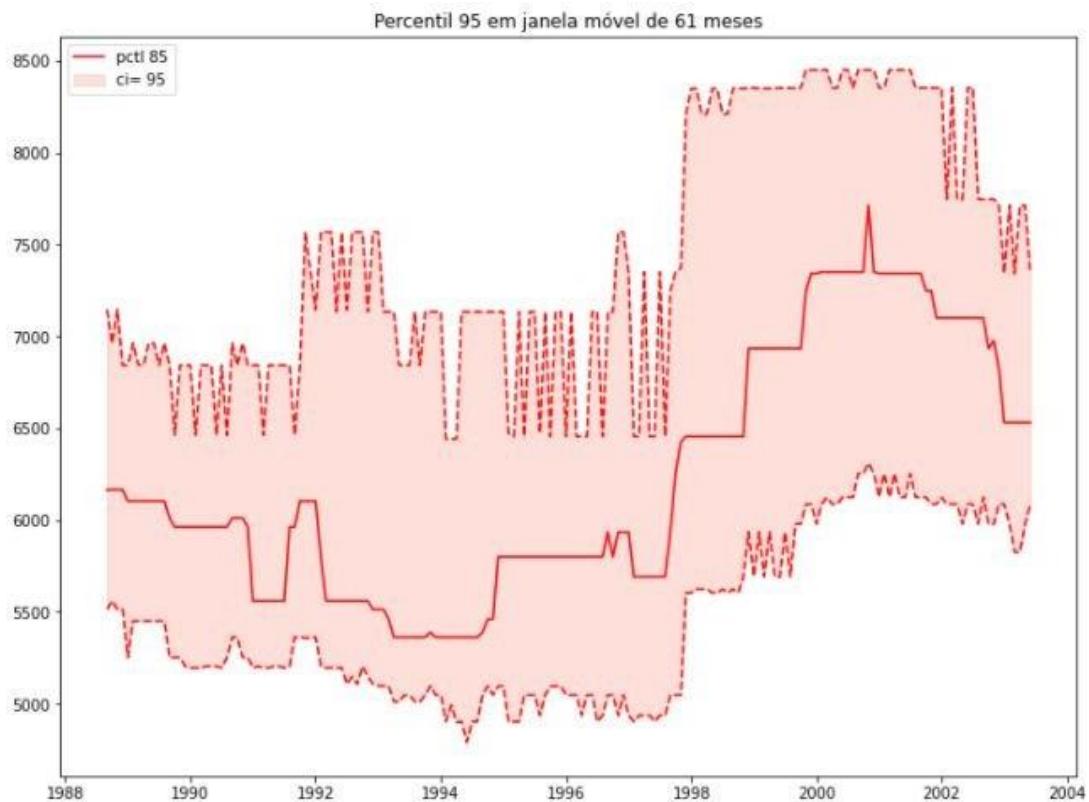


Figura 10: Evolução temporal do percentil 85 da descarga (e intervalo de confiança de 95%) do rio Maranon (Solimões-Amazonas) na estação Borja em janela móvel de 61 meses.

Gerou-se dados capazes de calcular a probabilidade de vazão (Figura 11) máxima em um ano de acordo com os dados obtidos de média diária.

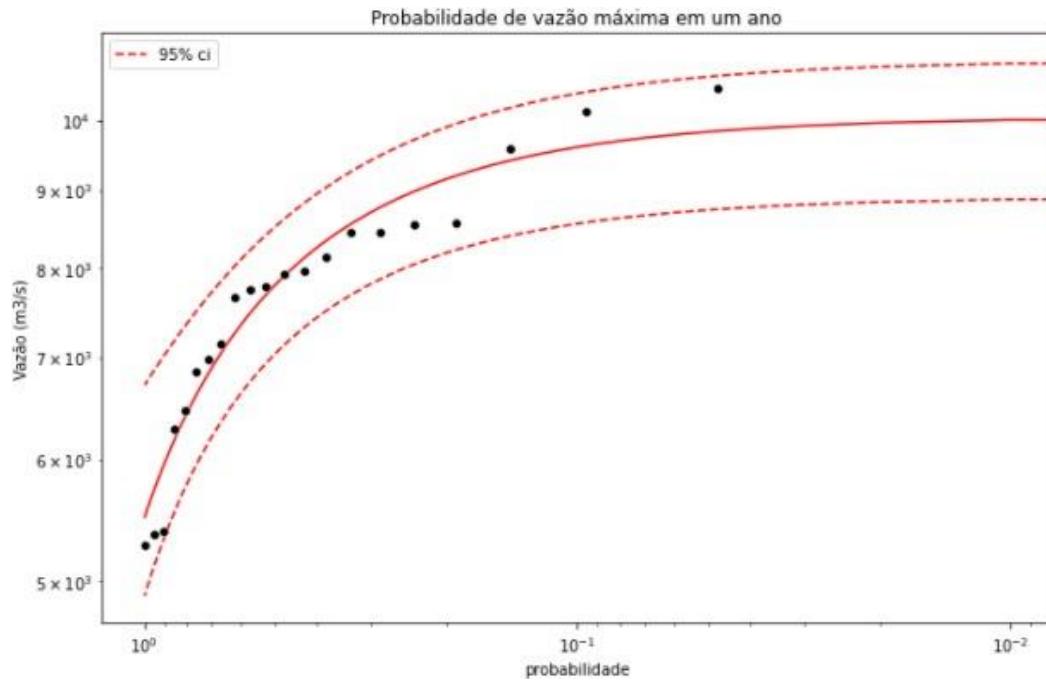


Figura 11: Descarga máxima com 1% de probabilidade de ocorrência em 100 anos (AEP1%).
Intervalo de confiança de 95%.

A fim de obter uma análise sazonal dos dados agrupou-se os dados de vazão mensal gerando estatísticas para cada mês ao longo de um ano, obtendo gráficos de variação mensal de descarga média (Figura 12) e variação mensal de descarga em percentis (Figura 13), conforme as figuras abaixo.

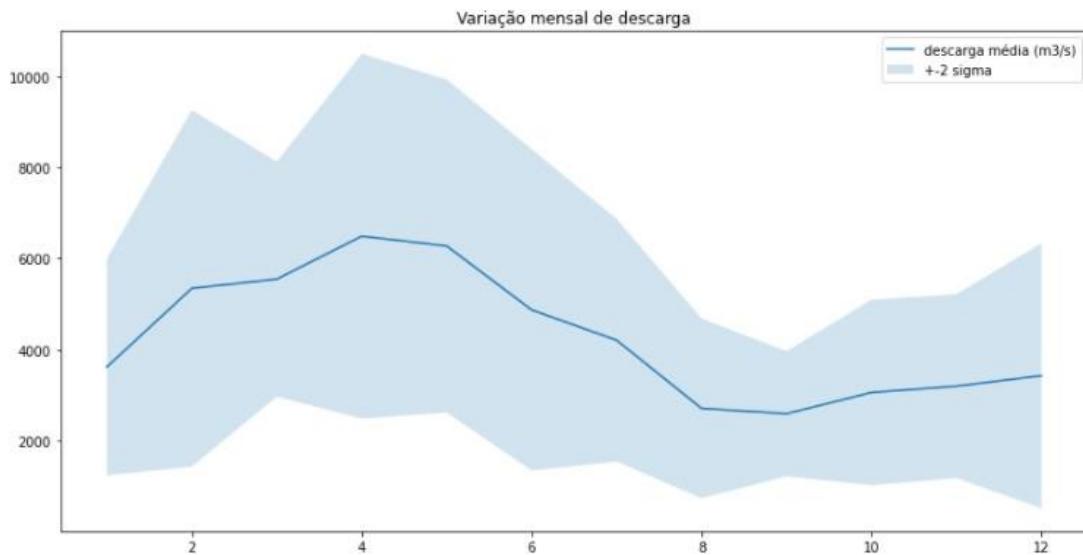


Figura 12: Gráfico de variação mensal de descarga média ao longo dos anos e descarga em (m³/s) no eixo y. Intervalo de confiança de ± 2 sigma. Meses representados por números de 1 a 12.

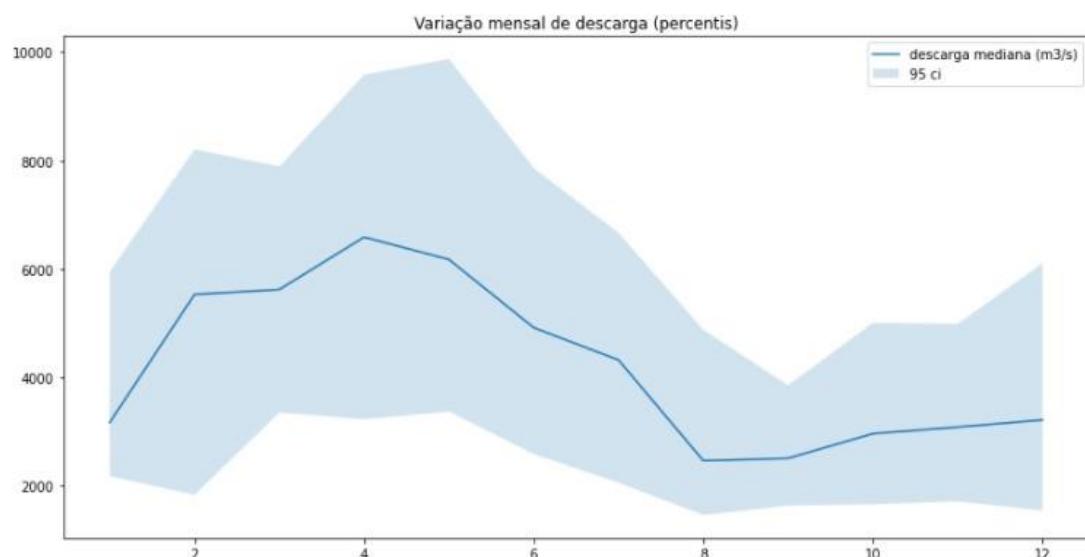


Figura 13: Gráfico de variação mensal de descarga (mediana) percentil ao longo dos anos e descarga em (m³/s) no eixo y. Intervalo de confiança de ± 2 sigma.

Fez-se o mesmo para os dados de cota obtidos em cada estação, a fim de obter a variação mensal média de cota e variação mensal de percentis (Figuras 14 e 15)

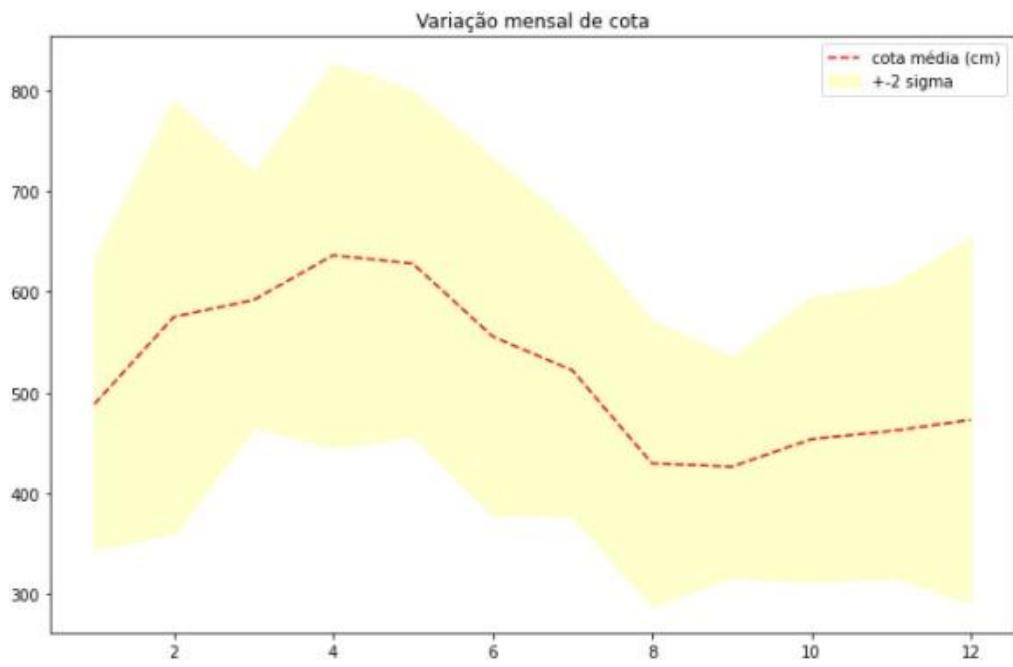


Figura 14: Gráfico de variação mensal de cota média ao longo dos anos no eixo x e cota em (cm) no eixo y. Intervalo de confiança de ± 2 sigma.

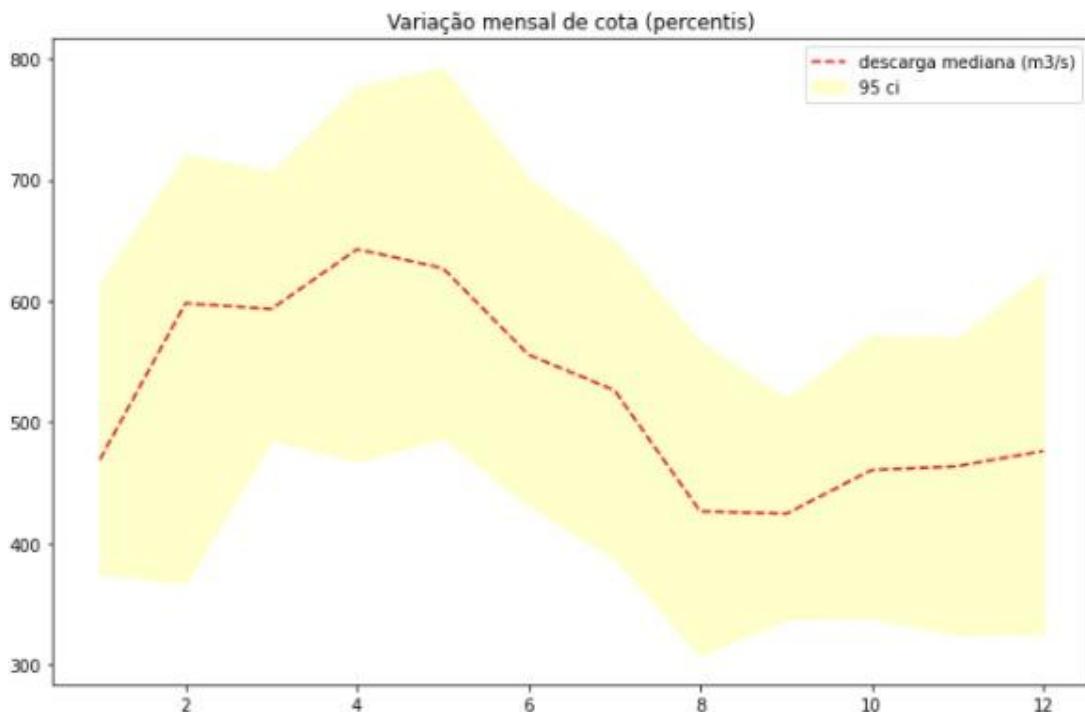


Figura 15: Gráfico de variação mensal da mediana das cotas ao longo dos anos no eixo x e cota em (cm) no eixo y. Intervalo de confiança de ± 2 sigma.

Para a análise do tempo submerso de cada cota, calculou-se o tempo de duração de cheia em cada cota para cada ano, obtendo gráficos de dias de inundação em cada ano, para

cada cota (Figura 16), amplitude de variação das cotas (Figura 17) e mês de pico e baixa nas cotas (Figura 18).

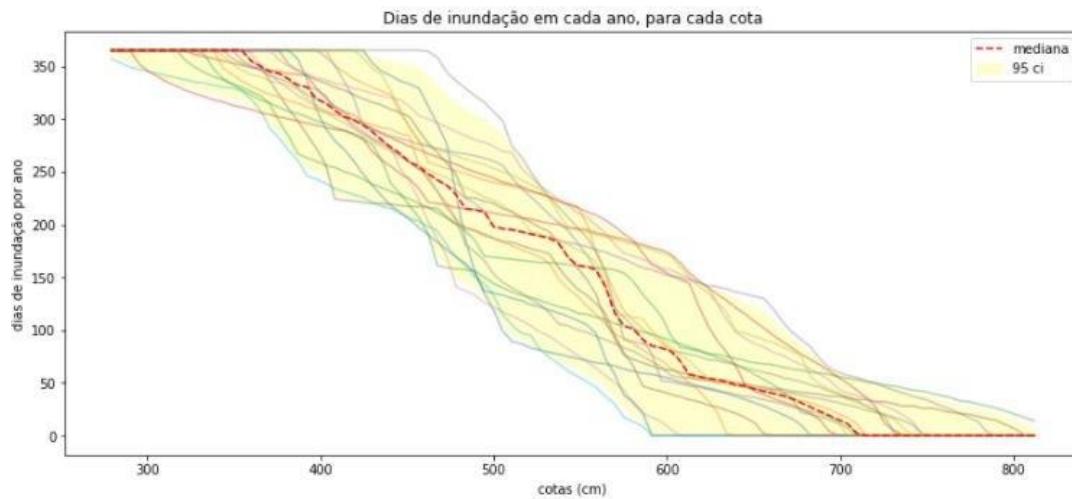


Figura 16: Gráfico de variação de dias de inundaçao por cota (cm).

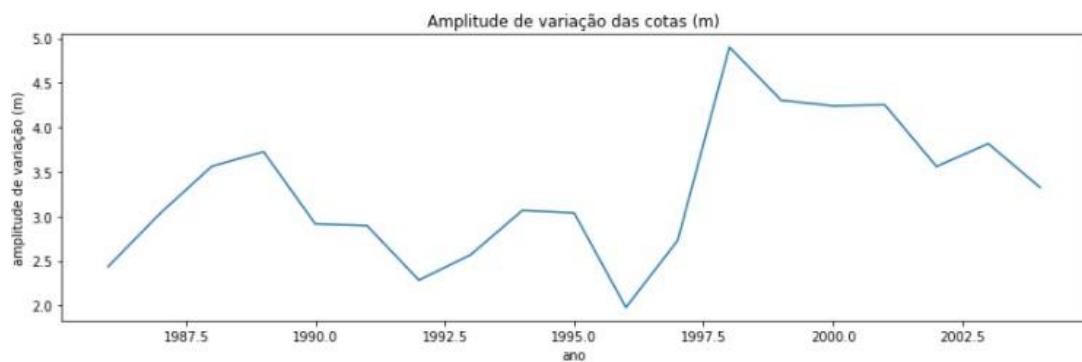


Figura 17: Gráfico de amplitude de variação das cotas, em metros, ao longo dos anos de 1987 a 2002.

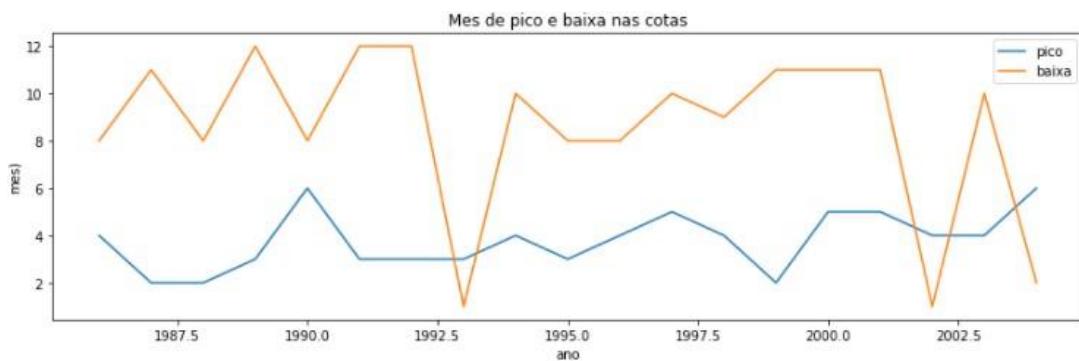


Figura 18: Gráfico de mês de pico e baixa nas cotas ao longo dos anos, de 1987 a 2002 com variação mensal no eixo y e meses no eixo x. A cor laranja representa os níveis de baixa enquanto a cor azul

os níveis de alta. Nota-se dois pontos de baixa extrema nos anos que variam em 1992 e 1995, entre os meses de fevereiro e abril e entre 2000 e 2002.

Diante de todos esses dados obtidos, foi possível realizar a análise dos sistemas fluviais estudados ao longo deste trabalho e elaborar uma base de dados para trabalhos posteriores.

5.2 Análise de imagens de satélite

Para a comparação entre a escala das *scroll bars* das planícies ativas dos rios Japurá e Solimões com os terraços do Pleistoceno, foram realizadas medidas de arcos de *scrolls* em imagens de elevação SRTM (Figura 19), com a obtenção de cinco pontos por arco, geração de arquivos .kml e tratamento dos dados em código em Python desenvolvido pelo grupo de pesquisa, conforme método descrito em Galeazzi (2020). Correções do espaçamento irregular são realizadas pelo código considerando interpolação e reamostragem em malha regular.

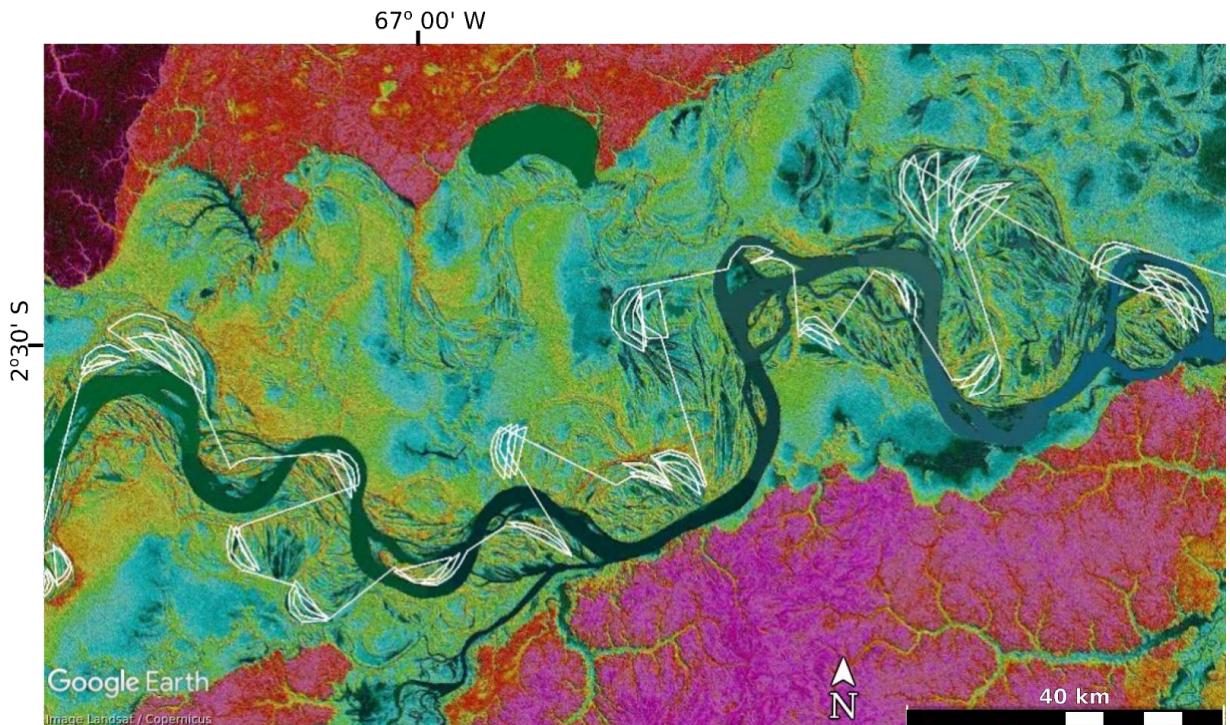


Figura 19: Exemplo do processo de medição de arcos de curvatura de scroll bars em planícies ativa do Rio Solimões.

Inicialmente utilizamos dados hidrometeorológicos a fim de descrever o sistema fluvial do Japurá e Solimões com dados de vazão efetiva, vazão de canal pleno, variabilidade sazonal, variabilidade inter-anual, intervalo de recorrência de cheias e outros. Gerando os dados estatísticos foi possível compreender a erosão na cheia e deposição na seca e

consequentemente a vazão formadora de canal, intervalo de recorrência e potência de corrente.

Diante dos resultados estatísticos obtidos com os dados hidrológicos, foi realizada correlação linear com dados de arco de curvatura de *scroll bars* em barras ativas nas proximidades de cada estação. Obtendo-se calibrações para estimativas de paleodescarga para depósitos de terraços pleistocênicos com *paleo-scroll bars*. Comparações diretas entre raios de curvatura dos Rios Solimões e Japurá, além dos terraços do interflúvio Japurá-Negro foram realizadas para testar as hipóteses sobre o rio responsável por esses terraços.

6. RESULTADOS OBTIDOS E INTERPRETAÇÃO

6.1 Dados Hidrológicos

O tratamento dos dados a Agência Nacional de Águas tratados em script escrito em Python permitiu a aquisição dos seguintes parâmetros:

Rio, Nome, Estação, Código ANA, Latitude, Longitude, Número Meses, Descarga Média Anual (m^3/s), Desvio Padrão da Descarga, Descarga máxima, Percentil 97.5 da Descarga, Percentil 75 da Descarga, Mediana da Descarga, Percentil 25 da Descarga, Percentil 2.5 da Descarga, Descarga mínima, Descarga Máxima com 1% de probabilidade de ocorrência em 100 anos (AEP1%), Descarga Bankfull +_5%, Mês de Pico, Descarga Média do Mês de Pico, Desvio Padrão da Descarga Pico, Descarga Mediana no Mês Pico, Percentil 97.5 do Mês Pico, Percentil 2.5 do Mês Pico, Mês Baixa, Descarga Média do Mês Baixa, Desvio Padrão do Mês de Baixa, Mediana do Mês de Baixa, Percentil 97.5 da Descarga do Mês de Baixa, Percentil 2.5 da Descarga do Mês de Baixa, Número de meses com cota medida, Cota Média Anual (m), Desvio Padrão da Cota, Cota máxima medida, Cota percentil 97.5, Cota percentil 75, Cota mediana, Cota percentil 25, Cota percentil 2.5, Cota mínima medida, Amplitude Média Cotas (m), Desvio Padrão da Amplitude das Cotas.

A tabela com os dados tratados pode ser consultada no Anexo 1 e é um dos principais resultados do presente trabalho, permitindo considerações sobre as relações entre hidrologia e sedimentologia em trabalhos futuros do grupo de pesquisa. A análise dos dados de descarga revela que a descarga média anual é bastante correlacionada com a descarga mediana e a descarga do percentil 75, próxima ao nível de cheia. Já a descarga “*bankfull*”, que reflete a vazão máxima contida dentro do canal antes do extravasamento para as planícies de inundação, por ser muito dependente da geometria local de cada canal, apresenta correlação ruim com os demais parâmetros. Desta forma, as análises posteriores, de comparação entre descarga e raios de curvatura de *scroll bars*, foram realizadas utilizando a descarga média anual.

Um outro resultado relevante é um mapa de amplitude de variação da cota (Figura 20), com implicações para a espessura das sucessões de topo de barra, elemento central para a caracterização de sistemas de grandes rios (Tamura et al. 2019).



Figura 20: Mapa de variação de amplitudes de cotas (\pm desvio padrão 1 sigma e com mês de pico para algumas estações). Amarelo- Rio Solimões, Azul claro- Rio Juruá Verde-Rio Purus, Violeta- Rio Madeira, Rosa- Rio Içá, Vermelho- Rio Japurá, Branco-Rio Negro.

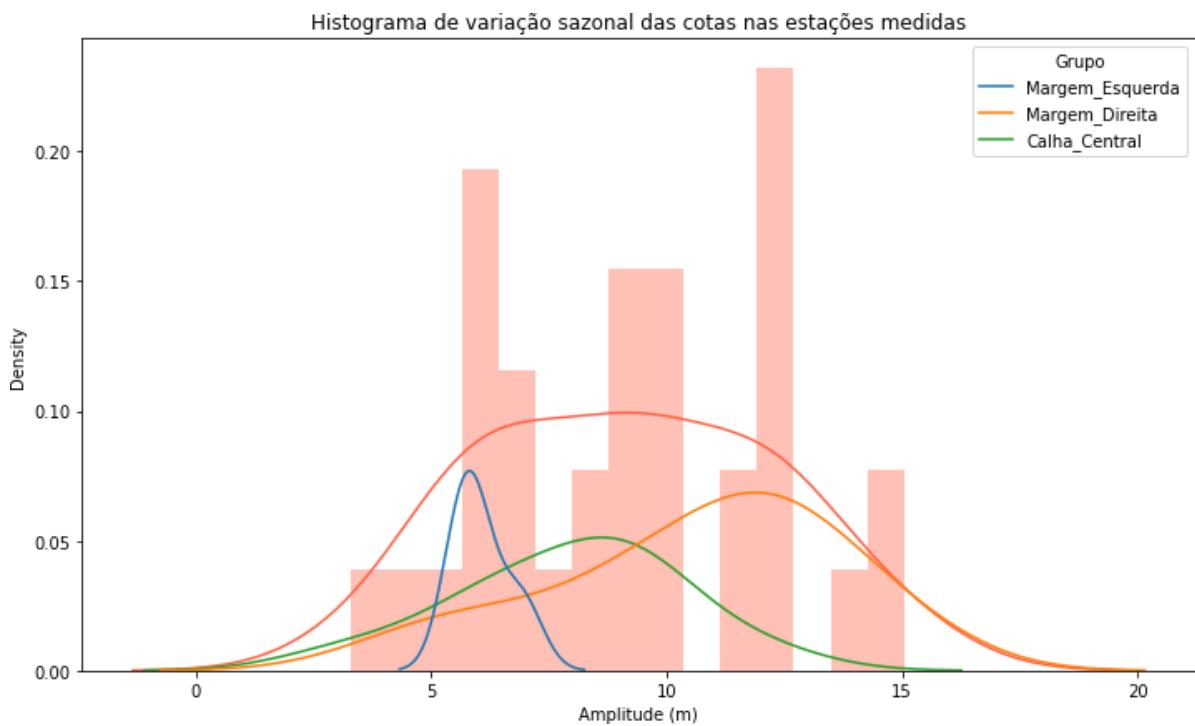


Figura 21: Histograma e curvas de densidade de probabilidade de amplitude sazonal de cotas para o Rio Solimões, Afluentes da Margem Sul e Afluentes da Margem Norte.

Esses dados revelam grandes amplitudes de variação de cotas, maiores nos afluentes da margem sul do Rio Solimões e menores nos afluentes na margem Norte (Figura 21).

6.2 Raios de curvatura de scroll bars

Outro resultado relevante relaciona-se aos objetivos de obter medidas de raio de curvatura das *scroll bars* das planícies ativas dos rios Solimões e Japurá e de estruturas análogas preservadas nos terraços do interflúvio Japurá-Negro na região entre Maraã (AM) e Barcelos (AM) e de realizar análises estatísticas e testes de hipóteses para avaliar se o sistema de terraços da região de Maraã (AM) registra um paleocurso do Rio Solimões ou do Rio Japurá fluindo para o Rio Negro.



Figura 22: Localização das estações de medida dos raios de curvatura dos terraços pleistocênicos do interflúvio Japurá-Negro (1-5 rosa) e das planícies holocênicas dos rios Solimões (6 a 9) e Japurá (10 e 11). Localidades: 1- Alto Aiuna, 2- Alto Cauini, 3- Alto Urubaxi b, 4- Alto Urubaxi a, 5- Baixo Cauini, 6- Solimões Tabatinga, 7- Solimões S.P. Olivença, 8- Solimões Içá, 9- Solimões Tefé, 10- Japurá_Vila Bitencourt, 11- Japurá Pós-Juami.

Raios de curvatura de *scroll bars* foram medidos em quatro estações no Rio Solimões, duas no Rio Japurá e cinco nos terraços pleistocênicos da região de Maraã (Figura 22), permitindo comparações diretas e testes de hipóteses. Esses dados demonstram que de fato os raios de curvatura dos terraços Pleistocênicos desse interflúvio assemelham-se mais aos do Rio Solimões ativo que do Rio Japurá (Figura 23).

Distribuição do raio de curvatura de "scroll bars" em cada estação de medidas

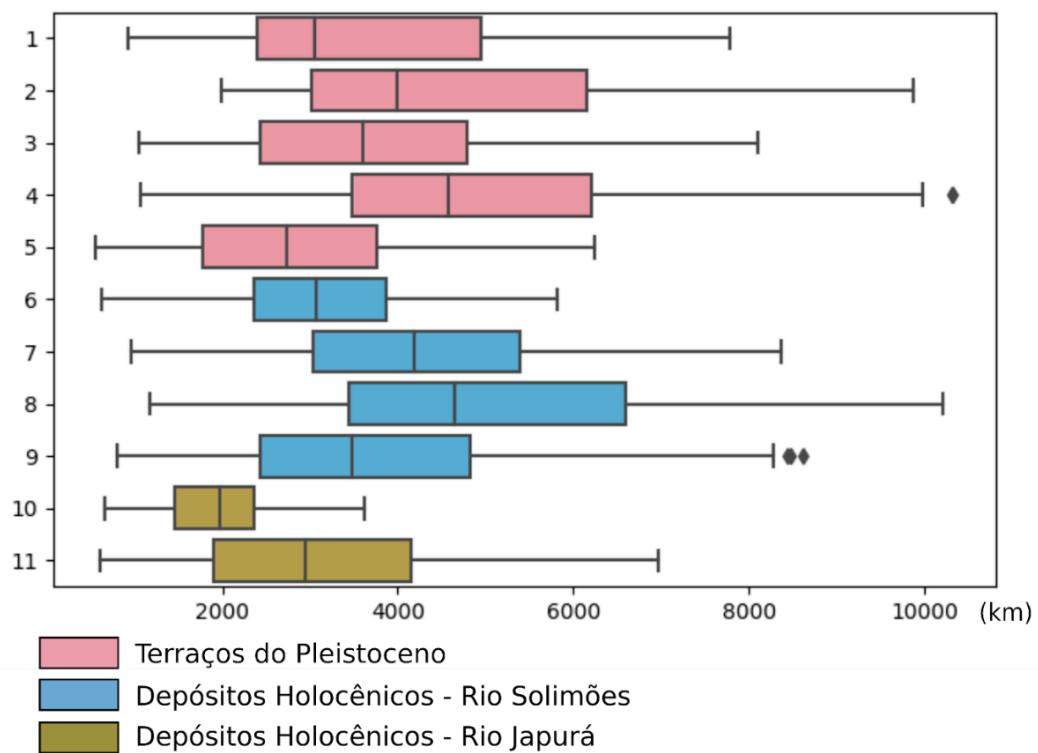


Figura 23: Boxplots mostrando os raios de curvatura dos terraços pleistocênicos do interflúvio Japurá-Negro (1-5 rosa) comparados aos raios de curvatura das planícies holocênicas dos rios Solimões (6 a 9) e Japurá (10 e 11). Localidades: 1- Alto Aiiana, 2- Alto Cauini, 3- Alto Urubaxi b, 4- Alto Urubaxi a, 5- Baixo Cauini, 6- Solimões Tabatinga, 7- Solimões S.P. Olivença, 8- Solimões Içá, 9- Solimões Tefé, 10- Japurá_Vila Bitencourt, 11- Japurá Pos-Juami.

6.3 Correlação com raio de curvatura e descarga

Os resultados da correlação linear de raios de curvatura de *scroll bars* da planície holocênica com dados de descarga média anual de estações próximas revelam excelentes fatores de determinação (Figura 24). Nessas regressões, consideram rios multicanais e de canal único (meandrantes) em separado, dada a partição da descarga formadora das *scroll bars* (Galleazi et al. 2020).

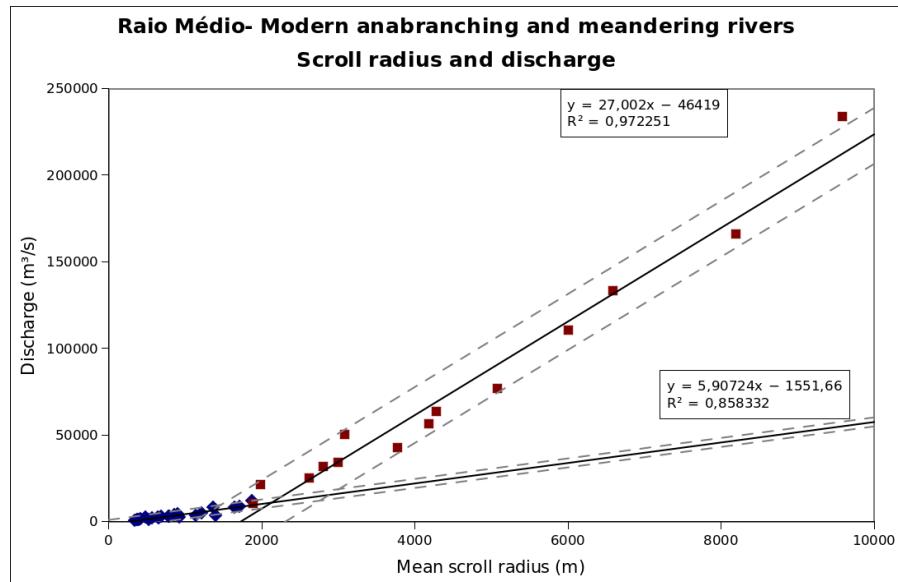


Figura 24: Correlações de dados de raio de curvatura de scroll bars da planície holocênica com dados de descarga média anual de estações próximas. Em vermelho os rios anabranching/wandering e em azul os meandrantes.

7. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A interpretação dos resultados consiste em:

- 1- Teste estatístico de hipóteses sobre a relação dos terraços pleistocênicos com o sistema ativo do Rio Japurá ou do Rio Solimões.
- 2- Estabelecimento da relação entre raio de curvatura e descarga nos sistemas ativos.
- 3- Inferência da paleodescarga dos sistemas dos terraços com base em seus raios de curvatura e no item 2 acima.

7.1 Testes de hipóteses

Utilizando-se o teste ANOVA ‘one-way’ pode-se testar a hipótese nula de o valor médio do raio dos arcos de *scroll bars* dos terraços investigados ser igual ao dos depósitos holocênicos do Rio Solimões e, repetindo-se o teste, ao dos depósitos holocênicos do Rio Japurá. Os resultados são bastante expressivos (Figura 25):

Teste Anova ‘one way’ terraços e Solimões holocênico:

$$s= 0.0103, p= 0.9190$$

Teste Anova ‘one way’ terraços e Japurá holocênico:

$$s=48.8648, p=6.2425e-12$$

Onde s = variabilidade entre amostras / variabilidade dentro de cada amostra (estatística F)

p = probabilidade de igualdade das médias (100% = 1)

Assim, não se pode descartar a hipótese de a população de raios de curvatura dos Terraços Pleistocênicos ser igual à dos depósitos Holocênicos do Rio Solimões ($p>0,05$ no teste F). Por outro lado, pode-se descartar a hipótese de a população de raios de curvatura dos Terraços Pleistocênicos ser igual à dos depósitos Holocênicos do Rio Japurá ($p<0,05$ no teste F).

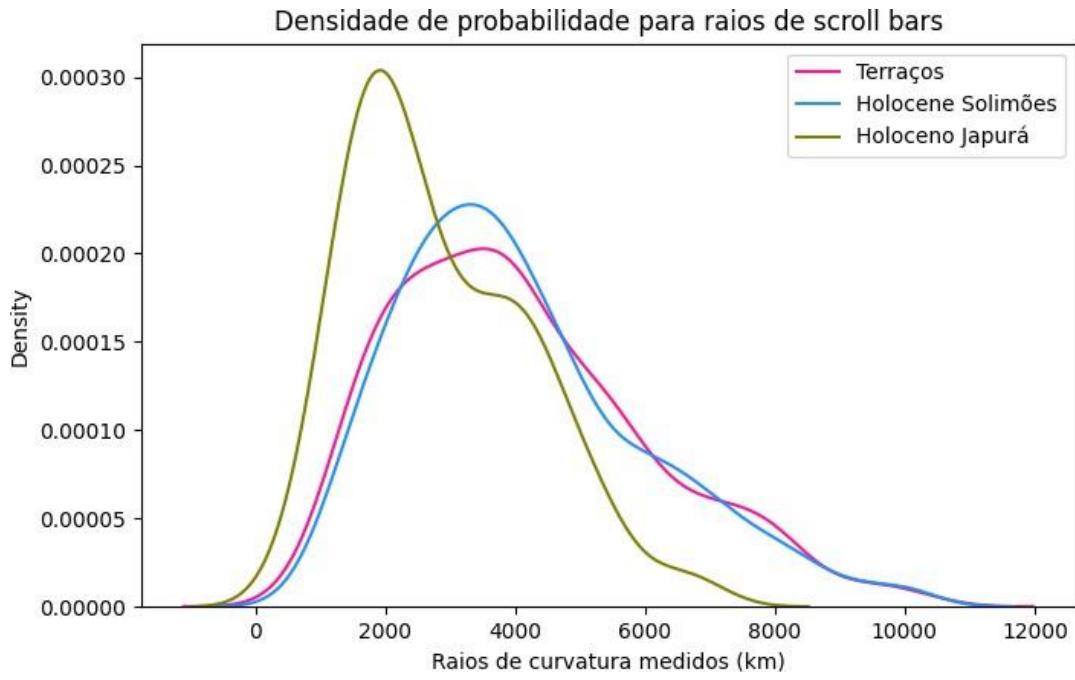


Figura 25: Curvas de distribuição de probabilidade dos raios de curvatura de *scroll bars* para os sistemas estudados, mostrando a semelhança entre o Rio Solimões ativo e os terraços do Pleistoceno.

7.2 Correlação com o raio de curvatura e descarga

Os resultados da correlação linear de raios de curvatura de *scroll bars* da planície holocênica com dados de descarga média anual de estações próximas revelam excelentes fatores de determinação. Nessas regressões, consideram rios multicanais e de canal único (meandrantes) em separado, dada a partição da descarga formadora das *scroll bars* (Galleazi et al. 2020).

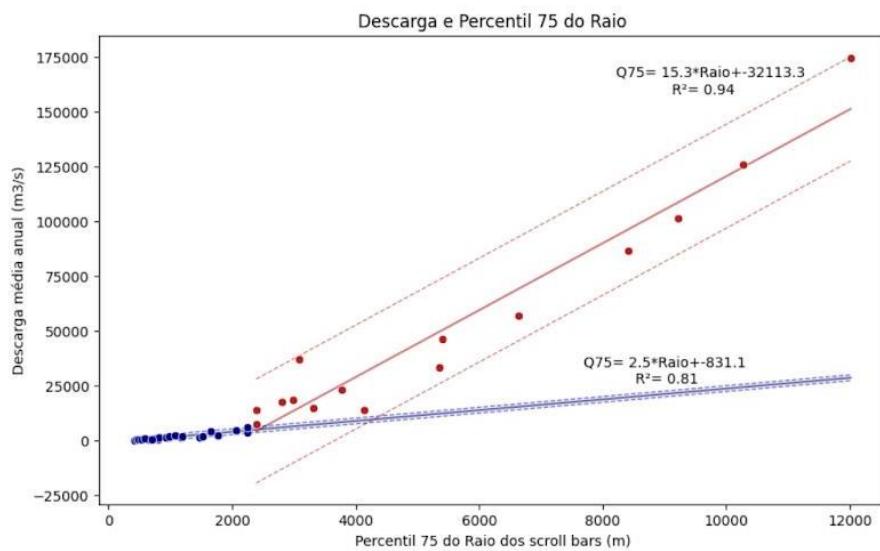
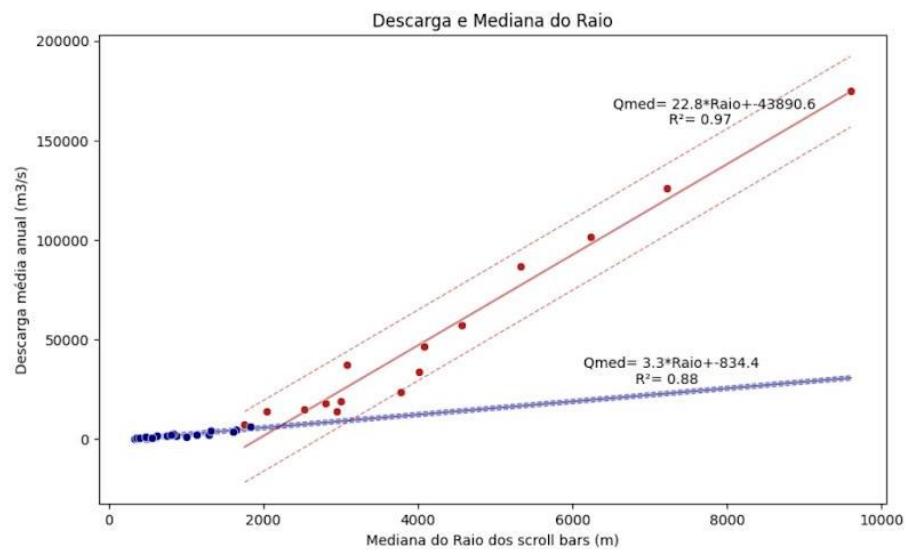
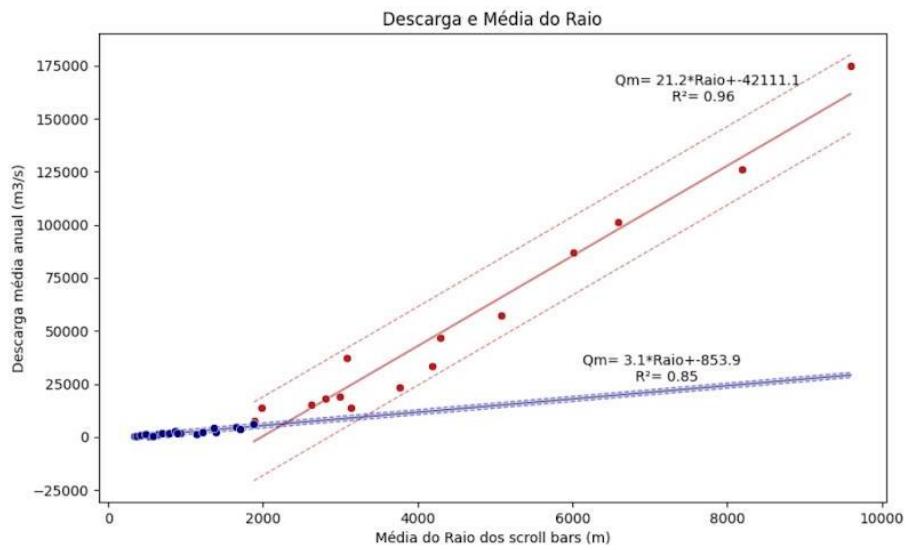


Figura 26: Correlações de dados de raio de curvatura de scroll bars da planície holocênica com dados de descarga média anual de estações próximas. Topo - raio de curvatura médio. Centro- mediana do raio de curvatura, Base- percentil 75 do raio de curvatura. Retas pontilhadas demarcam os campos de mais ou menos 2 sigma de erro padrão dos resíduos da regressão (2 sigma de para rios de canal simples e para rios de canais múltiplos).

A análise dos resultados indica que a mediana do raio de curvatura leva aos melhores fatores de determinação (Figura 26), como era de se esperar considerando a distribuição assimétrica desses dados em histogramas (Figura 27).

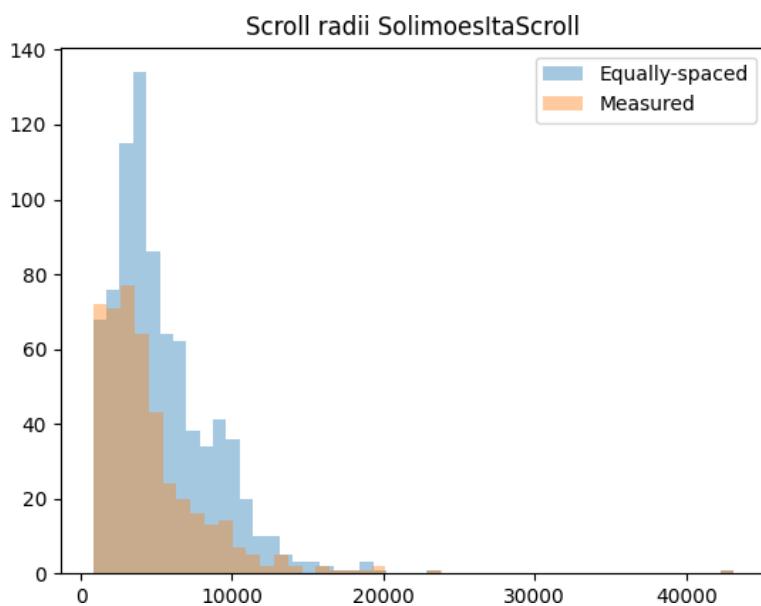


Figura 27: Exemplo de histograma de medidas de scroll bars demonstrando forte assimetria.

7.3 Inferências sobre a paleodescarga

Considerando-se que os dois sistemas investigados são multicanais, podemos utilizar a equação obtida pela regressão linear dos dados de descarga média anual e mediana dos raios de curvatura de scroll bars para rios multicanais ativos (Figura 26, centro, quadrados vermelhos) para reconstituir as paleodescargas:

$$PDm = 29,0845 * RM - 4913,8$$

Onde PDm é a Paleodescarga média anual e RM é a mediana do raio médio de curvatura dos scroll bars dos terraços investigados.

As medianas dos cinco sistemas de paleo scroll bars medidos (Figura 26, rosa) são:

$$T1 = 3266,49$$

$$T2 = 4175,45$$

$$T3 = 3971,29$$

$$T4 = 4935,63$$

$$T5 = 2953,84$$

E portanto, considerando-se a equação (1) e o erro da regressão conforme a (Figura 26) (centro) e o erro calculado de dois sigma de 17792,88 (m^3 / s) temos as seguintes paleodescargas:

$$Q1=47157,09 \pm 17792,88 (m^3 / s)$$

$$Q2= 48066,05 \pm 17792,88 (m^3 / s)$$

$$Q3= 47861,89 \pm 17792,88 (m^3 / s)$$

$$Q4= 48826,23 \pm 17792,88 (m^3 / s)$$

$$Q5= 46844,44 \pm 17792,88 (m^3 / s)$$

Esses valores são de fato próximos aos do Rio Solimões na mesma região, que tem descarga média anual variando entre 40000 e 50000 m^3 / s , enquanto o Rio Japurá tem descarga em torno de 14000 m^3 / s (Anexo 1), estando fora da margem de erro dois sigma da regressão.

8. CONCLUSÕES

Considerando-se os objetivos inicialmente propostos e os resultados obtidos podemos tecer as seguintes conclusões:

1- Medidas de raios de curvatura das *scroll bars* das planícies ativas dos rios Solimões e Japurá e de estruturas análogas preservadas nos terraços pleistocênicos do interflúvio Japurá-Negro na região entre Maraã (AM) e Barcelos (AM) indicam uma grande semelhança na dimensão dos *scroll bars* do Pleistoceno com os do Rio Solimões atual, comprovada por teste de hipótese de comparação de médias (ANOVA one way). A hipótese de semelhança com o Rio Japurá atual é descartada. Desta forma propõe-se que o Rio Solimões foi tributário do Negro no Pleistoceno tardio.

2- Foi organizada uma base de dados com parâmetros estatísticos da hidrologia dos rios Japurá, Içá, Solimões, Juruá e Purus com base nas estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas, disponibilizadas no site Hidroweb. Essa base de dados permitiu considerações sobre as relações entre descarga média anual, descarga mediana e diferentes percentis, concluindo-se que a descarga média anual representa de forma satisfatória a distribuição. Adicionalmente, elaborou-se um mapa de amplitude de cotas para os rios investigados, inédito na literatura investigada, que revela variações sazonais de mais de 12 m (em média) para os tributários de margem sul do Rio Solimões, amplitudes de menos de 8m para os tributários de margem norte, e amplitudes próximas a 10 m para o rio tronco (Solimões-Amazonas). Variações de amplitude no perfil longitudinal de cada rio foram identificadas como relacionadas ao aumento de descarga para jusante, e a efeitos limitadores do nível de base local, seja a variação de amplitude do rio tronco ou a variação de marés no caso do Baixo Amazonas.

3- A descarga média anual de diversos rios da Planície Amazônica foi relacionada à escala das *scroll bars* recentes em planícies adjacentes, permitindo o estabelecimento de regressões lineares para o caso de rios multicanal de canal único. Essa regressão foi utilizada na estimativa das paleodescargas responsáveis pelos *scrolls* preservados nos terraços do Pleistoceno na região investigada. As estimativas resultantes variam de $46844,44 \pm 17792,88$ (m^3 / s) a $48826,23 \pm 17792,88$ (m^3 / s) sendo muito semelhantes às do Rio Solimões atual e fora da margem de erro na comparação com o Rio Japurá (aproximadamente 14000 (m^3 / s)).

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M. De, Brito Neves, B.B. De, and Dal Ré Carneiro, C., 2000, The origin and evolution of the South American platform: *Earth Science Reviews*, v. 50, p. 77–111, doi:10.1016/S0012-8252(99)00072-0.
- Ayres, J.M., 1993, As matas de várzea do Mamirauá: médio Rio Solimões: Estudos do Mamirauá, v.1, p. 124.
- Campbell Jr., K.E., Frailey, C.D., Romero-Pittman, L., 2006. The Pan-Amazonian Ucayali peneplain, late Neogene sedimentation in Amazonia, and the birth of the modern Amazon River system. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 239 (1e2), 166e219.
- Caputo, M.V., 1984. Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography o northern basins of Brazil. University of California Santa Barbara. Tese de Doutorado. 586 p.
- Caputo, M.V., 2014, Bacia Do Solimões: Estratigrafia, Tectônica E Magmatismo: Ana, p. 40.
- Caputo, M.V; Rodrigues, R; Vasconcelos; D.N.H., 1971. Litoestratigrafia da Bacia Amazônica, 1971 – Relatório interno nº 641-A; Belém, PETROBRAS/RENOR. 92 p.
- Caputo, Mário & Silva, Osvaldo. (1991). Sedimentação e tectônica da Bacia do Solimões.
- Church, M., 1983. Patterns of instability in a wandering gravel bed river. In: Collinson, J.D., Lewin, J. (Eds.), *Modern and Ancient Fluvial Systems.*: International Association of Sedimentologists Special Publication, 6. Blackwell, Oxford, pp. 169–181.
- Cordani, U.G. et al. 1984. Estudo preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das bacias sedimentares brasileiras. Rio de Janeiro. PETROBRÁS/CENPES, 70 p. (Série Ciência-Técnica-Petróleo. Seção: Exploração de Petróleo n.º 15.)
- Cunha, P. R. C.; Silva, O. B.; Eiras, J. F. 1988. Interpretação faciológica e ambiental do principal reservatório de hidrocarbonetos da Bacia do Solimões – Área do Rio Urucu. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35., Belém. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1988. v. 6, p.2439-2456.
- Eiras, J. F., Becker, C. R., Souza, E. M., Gonzaga, F. G., Silva, J. G. F., Daniel, L. M. F., Matsuda, N. S., Feijo, F. J., 1994. Bacia do Solimões. Boletim de Geociências da Petrobras 8 (1), 17-45.
- Fernandes, P. E. C. A., Pinheiro, S. d. S., Montalvão, R. M. G., Issler, R. S., Abreu, A. S., Tassinari, C. C. G., 1977. Geologia. In: Folha SA.19 Içá: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Vol. 14. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL, Rio de Janeiro 17-124, pp.

- Fisch, Gilberto, Marengo, José A e Nobre, Carlos A Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazonica* [online]. 1998, v. 28, n. 2 [Acessado 3 janeiro 2022], pp. 101.
- Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>>. ISSN 1809-4392. <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>.
- Galeazzi, C.P., 2020, From large rivers to the rock record: Channel patterns, bedforms and facies model for the Amazon River, Instituto de Geociências, São Paulo.
- Haffer, J., 1969, Speciation in amazonian forest birds: *Science*, v. 165, p. 131–137, doi:10.1126/science.165.3889.131.
- Hickin, E. J., 1974. The development of meanders in natural river-channels. *American Journal of Science* 274 (4), 414–442. URL <http://www.ajsonline.org/content/274/4/414.abstract>
- Hoorn, C. et al., 2010, Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity: *Science*, v. 330, p. 927–931, doi:10.1126/science.1194585.
- Horbe, A.M.C., Motta, M.B., de Almeida, C.M., Dantas, E.L., Vieira, L.C., 2013. Provenance of Pliocene and recent sedimentary deposits in western Amazônia, Brazil: consequences for the paleodrainage of the Solimões-Amazonas River. *Sediment. Geol.* 296, 9e20.
- Horel, J.D.; Hahmann, A.N.; Gcisler, J.E 1989. An investigation of the annual cycle of convective activity over the tropical Americas. *Journal of Climate*, 2(11): 1388-1403.
- Horel, L. D., A. N. Hahmann, and J. E. Geisler (1989), An investigation of convective activity over the Tropical Americas, *J. Clim.*, 2, 1388-1403.
- Junk, W. J., Bayley, P. B., Sparks, R. E., 1989. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: Dodge, D. P. (Ed.), *Proceedings of the International Large River Symposium*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 106 110–127, pp.
- Kingston, D.R., Dishroon, C.P., Williams, P.A. 1983. Global basin classification system. AAPG Bulletin, 67:2175-2193
- Klein, G.V. 1995. Intracratonic Basins. In: Busby, C.J.; Ingersoll, R.V. (eds.). *Tectonics of Sedimentary Basins*. Cambridge: Blackwell Science, p. 459-478
- Kleinhans, M.G., van den Berg, J.H. 2011. River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and physics-based method. *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 721–738.
- Lane, E.W. 1957. A Study of the Shape of Channels Formed by Natural Streams Flowing in Erodible Materials. Missouri Rivers Division Sediment Series No 9. US Army Engineer division, Missouri River, Corps of engineers, Omaha, NE. 106 pp.

- Lanzarini, W. L. 1984. Fácies sedimentares e ambiente deposicional da Formação Monte Alegre na área do Juruá. Bacia do Alto Amazonas. Brasil: diagênese e permoporosidade dos arenitos-reservatório. 1984. 215 p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1984.
- Leopold L, Wolman M. 1957. River channel patterns: braided, meandering and straight. Geological Survey professional paper 282-B. US Government Printing Office, Washington, DC.
- Maia, R.G.N., Godoy, H.K., Yamaguti, H.S., Moura, P.A., Costa, F.S.F.D., Holanda, M.A.D., and Costa, J.A.D., 1977, Projeto Carvão no Alto Solimões: Relatório Final: p. 142.
- Meade, R. H., Rayol, J. M., Da Conceição, S. C., Natividade, J. R. G., 1991. Backwater effects in the Amazon River basin of Brazil. Environmental Geology and Water Sciences 18 (2), 105–114. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF01704664>
- Milani, E.J., Thomaz Filho, A. 2000. Sedimentary Basins of South America. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A. Campos, D.A. (eds.). Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, 31st. IGC, 389-449
- Nanson, G., Knighton, A. D., 1996. Anabranching rivers: their cause, character and classification. Earth Surface Processes and Landforms 21 (3), 217–239. URL [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199603\)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U)
- Nanson, G., Knighton, A. D., 1996. Anabranching rivers: their cause, character and classification. Earth Surface Processes and Landforms 21 (3), 217–239. URL [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199603\)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199603)21:3<217::AID-ESP611>3.0.CO;2-U)
- Nobre, C.A. e Oliveira, A. 1987. Precipitation and circulation anomalies in south america and the 1982-83 El Niño/Southern Oscillation episode. In: Conference of Geophysical Fluid Dynamics with special emphasis on "El Niño.- Ministério da Ciência e Tecnologia e Centro Latinoamericano de Física. São José dos Campos, 13-17 July 1987. p. 325 - 328;
- Nobre, C.A. e Rennó, N.O. Droughts and floods in south America due to the 1982-1983 El Niño/Southern Oscillation episode. Relatório Técnico INPE 3408 - PRE/677, 4p., 1985;
- Nobre, C.A., Obregón, G.O., and Marengo, J., 2009, Características do Clima Amazônico : Aspectos Principais:
- Nogueira, A.C.R., Silveira, R., Guimarães, J.T.F., 2013. Neogene-Quaternary sedimentary and paleovegetation history of the eastern Solimões Basin, central Amazon region. J. SouthAm. Earth Sci. 46, 89e99.

- Parker, G. 1976. On the cause and characteristics scales of meandering and braiding rivers Journal of Fluids Engineering 76, 457–480.
- Porsche, E. 1985. Tectônica da faixa de dobramentos do Juruá. Bacia do Alto Amazonas. Brasil: um modelo estrutural. 1985. 214 p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1985.
- Pupim, F.N. et al., 2019, Chronology of Terra Firme formation in Amazonian lowlands reveals a dynamic Quaternary landscape: Quaternary Science Reviews, v. 210, p. 154–163, doi:10.1016/j.quascirev.2019.03.008.
- Rasanen, M.E., Salo, J.S., Jungnert, H., Pittman, L.R., 1990. Evolution of the western Amazon lowland relief: impact of Andean foreland dynamics. Terra. Nova 2 (4), 320e332.
- Ribas, C.C., Aleixo, A., Nogueira, A.C.R., Miyaki, C.Y., and Cracraft, J., 2012, A palaeobiogeographic model for biotic diversification within Amazonia over the past three million years: Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 279, p. 681–689, doi:10.1098/rspb.2011.1120.
- Rossetti, D.F., Cohen, M.C., Tatumi, S.H., Sawakuchi, A.O., Cremon, E.H., Mittani, J.C., Bertani, T.C., Munita, C.J.A.S., Tudela, D.R.G., Yee, M., Moya, G., 2015. Mid-Late Pleistocene OSL chronology in western Amazonia and implications for the transcontinental Amazon pathway. Sediment. Geol. 330, 1e15.
- Rossetti, D.F., Toledo, P.M., Goes, A.M., 2005. New geological framework for Western Amazonia (Brazil) and implications for biogeography and evolution. Quat. Res. 63, 78e89. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2004.10.001>.
- Ruokolainen, K., Moulatlet, G.M., Zuquim, G., Hoorn, C., and Tuomisto, H., 2019, Geologically recent rearrangements in central amazonian river network and their importance for the riverine barrier hypothesis: Frontiers of Biogeography, v. 11, doi:10.21425/F5FBG45046.
- Schobbenhaus, C. & Bellizzia, A. 2001 (coord.) - Geological Map of South America , 1: 5 000 000, CGMW - CPRM, DNPM, UNESCO, Brasilia.
- Schumm, S. A., 1985. Patterns of Alluvial Rivers. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 13 (1), 5–27. URL <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.ea.13.050185.000253>
- Silva, O. B. Análise da Bacia do Solimões 1987. (Revisão litoestratigráfica magmatismo e geoquímica). 1987. 177 p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 1987a.

- Silva, O. B. 1987. Espongiários do Devoniano da Bacia do Solimões. In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 10., 1987, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Paleontologia, 1987b. v. 2, p. 983-999.
- Silva, O.B., 1988. Revisão estratigráfica da Bacia do Solimões. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35, Belém, An., São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 6., 2428-2438.
- Tamura, Larissa Natsumi (2019) Arquitetura e preservação de barras e depósitos de canais de grandes rios do oeste da Amazônia Brasileira. 2019. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Val, A. L.; Almeida-Val, V. M. F.; Fearnside, P. M.; Santos, G. M.; Piedade, M. T. F.; Junk, W.; Nozawa, S. R.; SILVA, S. T.; Dantas, F. A. C. Amazônia: recursos hídricos e sustentabilidade. In: Bicudo, C. E. M.; Tundisi, J. G.; Scheuenstuhl, M. C. B. (org.) Águas do Brasil: análises estratégicas. São Paulo-SP: Instituto de Botânica, 2010, 224 p.
- Van Soelen, E.E., Kim, J.H., Santos, R.V., Dantas, E.L., de Almeida, F.V., Pires, J.P., Rodaz, M., Sinninghe, J.S., Damste, J.S.S., 2017. A 30 Ma history of the Amazon River inferred from terrigenous sediments and organic matter on the Ceará Rise. Earth Planet. Sci. Lett. 474, 40e48.
- Wanderley Filho, J.R., Eiras, J.F., and Vaz, P.T., 2007, Bacia do Solimões: Boletim de Geociências da Petrobras, v. 15, p. 217–225.

