

**MODELAGEM HIDRÁULICA DE INUNDAÇÕES
FLUVIAIS EM MANAUS COM USO DE DADOS DE
ALTIMETRIA DE SATÉLITE**

GABRIEL ALCÂNTARA PUNTEL FERREIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 - ENGENHARIA CIVIL

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO – 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**MODELAGEM HIDRÁULICA DE INUNDAÇÕES FLUVIAIS
EM MANAUS COM USO DE DADOS DE ALTIMETRIA DE
SATÉLITE**

GABRIEL ALCÂNTARA PUNTEL FERREIRA

ORIENTADOR: LEONARDO ZANDONADI MOURA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
CIVIL**

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO / 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**MODELAGEM HIDRÁULICA DE INUNDAÇÕES FLUVIAIS
EM MANAUS COM USO DE DADOS DE ALTIMETRIA DE
SATÉLITE**

GABRIEL ALCÂNTARA PUNTEL FERREIRA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

**Prof. Leonardo Zandonadi Moura, M.Sc. (ENC/FT/UnB)
(Orientador)**

**Prof. Dirceu Silveira Reis Junior, Ph.D. (ENC/FT/UnB)
(Examinador Interno)**

**Calvin Creech, Ph.D. (USACE)
(Examinador Externo)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 30 de NOVEMBRO de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA, GABRIEL ALCÂNTARA PUNTEL

Modelagem hidráulica de inundações fluviais em Manaus com uso de dados de altimetria de satélite [Distrito Federal] 2018.

xii, 114 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Mancha de Inundação

2. Enchentes

3. Modelos Hidráulicos

4. Modelos Estatísticos

I. ENC/FT/UnB

II. BACHAREL (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, G.A.P. (2018). Modelagem hidráulica de inundações fluviais em Manaus com uso de dados de altimetria de satélite. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-002/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriel Alcântara Puntel Ferreira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Modelagem hidráulica de inundações fluviais em Manaus com uso de dados de altimetria de satélite

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Gabriel Alcântara Puntel Ferreira
gabrielpuntelferreira@gmail.com
SMPW Quadra 12 Conjunto 1 Lote 8 Casa G
71741-201 – Brasília/DF - Brasil

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, por me terem me ensinado durante toda a minha vida os valores que vou carregar para sempre. Espero um dia poder compensar todo o investimento que eles fizeram em mim e passar todo esse carinho e afeto que me foi dado aos meus filhos também. Quero um dia ser o engenheiro experiente e habilidoso que meu pai é e ter a inteligência e vontade de aprender que a minha mãe tem.

À minha família, que é a base que me sustenta nos momentos mais difíceis e me enaltece (talvez até exagerada) nas minhas conquistas. Nos momentos ruins e nos bons, sei que todos estarão lá para me apoiar. Um agradecimento especial ao meu avô, que me incentivou a aprender uma língua (Mandarim) que no futuro com certeza será o diferencial para aqueles que querem se destacar no mercado de trabalho e a minha madrinha, que me ensinou a aproveitar cada momento da vida como se fosse o último.

Aos meus amigos, que durante muito tempo também serviram como meus psicólogos em uma terapia de grupo. Os amigos são a família que nós escolhemos, e eu tenho certeza que fiz a melhor escolha possível. Saibam que a influência de vocês (tanto em me guiar pelo caminho certo quanto ao me aconselhar quanto ao caminho errado) me trouxeram aonde eu estou hoje. Um agradecimento especial ao Sérgio, Victor, Luiz e Jonas que me acompanham desde o Ensino Médio e proporcionam momentos únicos para mim.

À Marina, que ouve minhas reclamações diariamente e ainda assim não se cansa de mim. Seu apoio moral e emocional foi de extrema importância para esse trabalho, principalmente com a paciência e ajuda nas horas de estudo. Espero poder retribuir todo esse sentimento que você me proporciona na mesma intensidade.

Por fim, aos meus professores, que me ensinaram tantas coisas e mostraram o caminho de inúmeras outras. Um bom professor mostra o caminho ao aluno e aprende com ele, seja pelos erros ou pelos acertos. Um agradecimento especial ao meu orientador Leonardo, que me recebeu com paciência e me ajudou a gostar cada vez mais dessa área da engenharia civil que são os recursos hídricos, desde que começamos a trabalhar juntos em 2016.

RESUMO

O presente trabalho analisa eventos extremos de cheia na cidade de Manaus por meio de dados de sensoriamento remoto e aplicação de modelagem computacional. Eventos extremos fluviais explicitados aqui dizem respeito ao aumento de vazões dos rios próximos a cidade de Manaus que causam danos materiais e riscos à vida da população. Essa análise foi feita utilizando dados de vazão e nível a partir de estações fluviométricas e virtuais disponibilizadas pela ANA e pelos serviços de dados THEIA e HYBAM. Os eventos de cheia analisados correspondem a vazões altas em comparação com valores da série histórica durante os anos de 2015 e 2016, que são períodos com uma alta quantidade de dados de vazão e nível na região próxima a Manaus. Dados de batimetria do canal e do terreno ao redor da cidade foram combinados para formação de elementos geométricos e criação de manchas de inundação que permitam a visualização da extensão e profundidade de eventos de cheia. Para calibração do modelo, foi feito um código em linguagem VBA para analisar as diferenças entre os níveis calculados pelo modelo com os níveis observados. Essa análise foi feita com base na métrica RMSE (raiz quadrada do erro médio), para uma faixa de valores de coeficiente de rugosidade para o canal e para a planície de inundação e, posteriormente, para que fosse analisada de forma mais precisa com relação a um valor médio e desvio padrão, foram gerados novos coeficientes a partir de uma distribuição de probabilidade normal (método de Monte Carlo). Essa abordagem foi utilizada para que o código possa obter valores de n de Manning que resultem em uma melhor calibração do modelo, considerando todas as possíveis fontes de erro do processo (desenho de parâmetros geométricos do rio, geração de modelos digitais de terreno, disponibilidade de dados, entre outros). Resultados mostraram valores da métrica RMSE, para eventos de cheia em 2015 e 2016, menores que 0,5 metro. A presença de remansos na região afeta de maneira clara a avaliação da cota e das áreas inundadas em Manaus de forma que, uma faixa grande de valores de vazão do rio Negro apresenta cotas maiores que a cota de alerta da CPRM (29,00 metros) de acordo com a variação da vazão no rio Solimões.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 BASE TEÓRICA DE ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS	5
3.2 MÉTODO DO PASSO PADRÃO	8
3.3 MÉTODO DE HIDROMETRIA <i>STAGE-FALL-DISCHARGE</i> (SFD).....	11
3.4 HISTÓRICO DA HIDRÁULICA DE CONDUTOS A SUPERFÍCIE LIVRE.....	13
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE FENÔMENOS HIDROLÓGICOS.....	16
3.6 GEODESIA.....	19
3.7 SENSORIAMENTO REMOTO NA DETERMINAÇÃO DE SUPERFÍCIES.....	22
3.8 CARACTERIZAÇÃO DA CIDADE DE MANAUS.....	25
4. METODOLOGIA	29
4.1 ANÁLISE DOS DADOS EM AMBIENTE GIS.....	29
4.2 CONDIÇÃO DE CONTORNO MONTANTE: RIO NEGRO	34
4.3 CONDIÇÃO DE CONTORNO MONTANTE: RIO SOLIMÕES.....	36
4.4 CONDIÇÃO DE CONTORNO JUSANTE: RIO AMAZONAS	38
4.5 EXECUÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO NO HEC-RAS.....	39
4.6 PÓS-PROCESSAMENTO NO ARC-GIS	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1 ANÁLISE PRELIMINAR DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E VIRTUAIS 43	
5.2 RESULTADOS RIO NEGRO.....	49
5.3 RESULTADOS METODOLOGIA SFD (<i>STAGE-FALL-DISCHARGE</i>).....	52
5.4 RESULTADOS RIO SOLIMÕES.....	55
5.5 RESULTADOS RIO AMAZONAS.....	58
5.6 CALIBRAÇÃO DO MODELO HEC-RAS	62
5.7 MAPAS DE INUNDAÇÃO E ANÁLISE DA COTA EM MANAUS	66
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
APÊNDICES.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 – Valores de vazão e nível das condições de contorno do modelo	40
Tabela 4-2 – Valores iniciais de n de Manning (canal e planície) para execução automática pelo método de Monte Carlo	41
Tabela 5-1 – Datas com dados disponíveis para as estações fluviométricas da ANA. Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2018)	43
Tabela 5-2 – Datas com os dados de nível disponíveis em estações virtuais. Fonte: (Theia - Land Data Centre, 2018)	44
Tabela 5-3 – Datas com os dados de nível disponíveis em estações virtuais. Fonte: (HYBAM, 2018).....	44
Tabela 5-4 – Diferença de nível entre a estação virtual amz_ngo_s3a_0676_00 e fluviométrica Novo Airão.....	51
Tabela 5-4 (Conclusão) – Diferença de Nível entre a estação virtual amz_ngo_s3a_0676_00 e fluviométrica Novo Airão	52
Tabela 5-5 – Análise de sensibilidade à condição de contorno de nível em Iracema	60
Tabela 5-6 – Valores de n de Manning obtidos minimizando a raiz quadrada do erro médio	63
Tabela 5-7 – Níveis calculados e observados dos perfis modelados no HEC-RAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 3-1 - Representação da equação da energia em um canal aberto. Fonte: (CHAUDHRY, 2008).....	7
Figura 3-2 - Zonas definidas entre a linha de profundidade normal, crítica e fundo do canal. Fonte: (CHAUDHRY, 2008)	8
Figura 3-3 - Representação da variação da energia entre seções consecutivas do canal. Fonte: (CHAUDHRY, 2008).....	9
Figura 3-4 – Ruínas da barragem de Ma’rib. Fonte: (H. Grobe, 1988)	13
Figura 3-5 – Aqueduto da Pont du Gard, sudeste da França. Fonte: (Emanuele - Flickr: Pont du Gard, CC BY-SA 2.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18375492)	14
Figura 3-6 – Representação das altitudes geométrica e ortométrica e da ondulação geoidal. Fonte: (SAATKAMP; MORAES; FARRET, 2009).....	20
Figura 3-7 – Resolução espacial das trajetórias dos satélites Jason-2 (linhas vermelhas) e Envisat (linhas brancas) em imagem Landsat5-TM. Fonte: (MOREIRA, 2016)	21
Figura 3-8 – Representação de um geóide de acordo com a superfície da Terra. Fonte: (Missão GRACE – NASA, 2002)	22
Figura 3-9 – Modelo Digital de Elevação da Bacia Amazônica. Fonte: (BORMA; NOBRE, 2016).....	23
Figura 3-10 – Precipitação média por mês (azul) e N° de dias de chuva (laranja).	25
Figura 3-11 – Precipitação total por ano (azul) e média histórica de longo período (laranja).	26
Figura 3-12 - Cidade de Manaus e encontro dos Rios Negro e Solimões. Fonte: (ESRI ArcMap Templates, 2018).....	27
Figura 4-1 – Carta náutica de Novo Remanso à Ilha das Onças antes e depois da digitalização manual. Fonte: (Diretoria de Hidrografia e Navegação DHN, 2018)	31
Figura 4-2 – Carta Náutica do Porto de Manaus (Plano A) antes e depois da digitalização manual. Fonte: (Diretoria de Hidrografia e Navegação DHN, 2018)	32
Figura 4-3 – Mapa da área de encontro entre os rios com os seus elementos geométricos digitalizados	33
Figura 4-4 – Série histórica de vazões máximas anuais na estação fluviométrica Manacapuru	37
Figura 4-5 – Fórmulas para o cálculo da posição de plotagem q_i (Fonte: adaptada de tabela original de Stedinger et. al (1993)).....	37
Figura 4-6 – Curva de permanência e tempos de retorno para a série de vazões em Manacapuru	38
Figura 5-1 – Localização das estações próximas de Manaus. Fonte: (Google Earth - © 2018 Google).....	45
Figura 5-2 – Diferença entre o nível da estação virtual Jusante Manacapuru e da estação fluviométrica Manacapuru.	46
Figura 5-3 – Diferença entre o nível da estação virtual Paricatuba e da estação fluviométrica Manaus.	46
Figura 5-4 – Diferença entre o nível da estação virtual Jusante Jatuarana e da estação fluviométrica Jatuarana.	47
Figura 5-5 – Cotas e Diferença entre o nível da estação virtual amz_ngo_jas_0063_01 e da estação fluviométrica Manaus.	48
Figura 5-6 – Cotas e diferença entre o nível da estação virtual amz_sol_jas_0063_01 e da estação fluviométrica Comunidade Santa Luzia.	48
Figura 5-7 – Variação da declividade mensal do rio Negro a partir da estação amz_ngo_env_0106_01	49
Figura 5-8 – Variação da declividade mensal do rio Negro a partir da estação amz_ngo_env_0564_01	50

Figura 5-9 – Comparação das cotas entre a estação virtual e a estação fluviométrica	51
Figura 5-10 – Área em função da cota em Manaus.....	53
Figura 5-11 – Raio hidráulico $^{2/3}$ em função da cota em Manaus.....	53
Figura 5-12 – Rugosidade do canal em função da cota em Manaus	54
Figura 5-13 – Hidrograma em Manaus calculado pela metodologia SFD	54
Figura 5-14 – Função densidade de probabilidade com complemento para amostra ajustada à uma distribuição de Gumbel (máximos) pelo método dos momentos (MOM)	55
Figura 5-15 – Função densidade de probabilidade sem complemento para amostra ajustada à uma distribuição de Gumbel (máximos) pelo método dos momentos (MOM)	56
Figura 5-16 – Gráfico de quantis e tempos de retorno com o outlier.....	56
Figura 5-17 – Quantis e tempos de retorno sem o outlier	57
Figura 5-18 – Parâmetros geométricos e físicos de medições de vazões durante cheias extremas	58
Figura 5-19 – Curva-Chave completa para a estação fluviométrica Iracema com cores diferentes para resumos de descarga no Rio Negro diferentes	59
Figura 5-20 – Curva-Chave em regime de vazante para a estação fluviométrica Iracema	59
Figura 5-21 – Curva-chave com linha de tendência em forma de equação de potência	61
Figura 5-22 – Valores de raiz quadrada do erro médio considerando a estação fluviométrica Careiro.....	62
Figura 5-23 – Valores de raiz quadrada do erro médio desconsiderando a estação fluviométrica Careiro.....	63
Figura 5-24 – Perfil longitudinal com as superfícies d'água calculadas e observadas nos rios Amazonas e Negro	64
Figura 5-25 – Perfil longitudinal com as superfícies d'água calculadas e observadas nos rios Amazonas e Solimões	65
Figura 5-26 – Cotas e variações diárias em Manaus durante os anos de 2015 e 2016.....	66
Figura 5-27 – Contorno da mancha de inundação gerada por vazões no Solimões com tempos de retorno diferentes (5, 20 e 50 anos)	68
Figura 5-28 – Contorno das áreas inundadas pelos perfis gerados no HEC-RAS	69
Figura 5-29 – Valores da Cota em Manaus em função da vazão do rio Solimões para um valor fixo de vazão no rio Negro.....	71

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*

ANA – Agência Nacional de Águas

A.C – Antes de Cristo

API – *Application Programming Interface*

BEST – *Bare-Earth SRTM Terrain*

CDL – *Critical Depth Line*

D.C - Depois de Cristo

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

EGM – *Earth Gravitational Model 2008*

FEMA – *Federal Emergency Management Agency*

FORTTRAN – *Formula Translation*

GPS – *Global Positioning System*

HEC – *Hydrologic Engineering Center*

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDT – Modelo Digital de Terreno

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NDL – *Normal Depth Line*

RAS – *River Analysis System*

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

SFD – *Stage-Fall-Discharge*

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SIG – Sistema de Informações Gráficas

TIN – *Triangular Irregular Network*

USACE – *United States Army Corps of Engineers*

VBA – *Visual Basic Application*

WSP – *Water Surface Profile*

WES – *Waterways Experiment Station*

WGS 84 – *World Geodetic System 1984*

1. INTRODUÇÃO

As inundações fluviais na cidade de Manaus serão analisadas no presente trabalho com o intuito de que seja estudada a sua área inundada durante eventos extremos de cheia do Rio Negro, Solimões e Amazonas e como a relação entre esses três rios altera a delimitação dessa área. Os principais aspectos que modificam a mancha de inundação são os fatores hidrológicos e hidráulicos que permeiam a obtenção dessa área.

Eventos críticos de cheia são definidos, de acordo com o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (“BRASIL”, 2013), Relatório dos Recursos Hídricos no Brasil e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) da seguinte forma:

- Inundação: transbordamento de água da calha normal de rios, mares, lagos e açudes, ou acumulação de água por drenagem deficiente, em áreas não habitualmente submersas.
- Enchente: elevação do nível de água de um rio, acima de sua vazão normal, sendo normalmente utilizada como sinônimo de inundação.
- Enxurrada: caracterizada por um volume de água que escoar na superfície do terreno, com grande velocidade, resultante de fortes chuvas.
- Alagamento: resultante do acúmulo de água no leito das ruas e no perímetro urbano, causado por fortes precipitações pluviométricas, em cidades com sistemas de drenagem deficientes.

De acordo com o serviço geológico brasileiro (Portal CPRM, 2013), a cota máxima histórica registrada em Manaus (no sistema Negro/Solimões/Amazonas) foi de 29,97 metros ocorrida no dia 29/05/2012. Mais recentemente, em junho de 2017, a Defesa Civil registrou uma cheia que atingiu 15 bairros de Manaus e deixou 34 municípios em situação de emergência, com mais de 62 mil famílias atingidas (G1 AMAZONAS, 2017).

Ao longo dos mais de 100 anos da série histórica sobre o nível do Rio Negro verifica-se que as cheias anuais oscilam ao redor de um valor médio de 28 m. Aquelas que ultrapassam a cota dos 29 m são consideradas grandes, como a cheia recorde de 2012 que atingiu 29,97 m (Portal CPRM, 2013).

O mapa de inundação de uma localidade representa toda a área inundada à margem de um rio durante o período das cheias. A disponibilidade de dados de topobatimetria, níveis d'água e vazões em estações fluviométricas e virtuais no rio é de extrema importância para a avaliação

e viabilidade de modelos hidráulicos para análise de rios. O principal fator que se busca determinar a partir de um mapa de inundação nas margens de um rio é sua área efetiva e as frequências de não superação de níveis em cada parte do mapa. Porém, dados topobatimétricos precisos de alta resolução para grandes áreas ainda são escassos e não satisfazem a demanda de comunidades que necessitam de seu uso, como hidrólogos, gestores de áreas de recursos hídricos e cientistas que estudam a climatologia do planeta.

Tradicionalmente, análises de frequência de cheias têm sido a principal fonte de informação para o entendimento do risco em planícies de inundação (LOUCKS; STEDINGER; HAITH, 1981). O risco é definido no presente trabalho como sendo o risco hidrológico de um evento de cheia, ou seja, a probabilidade de ocorrência relativa a um determinado valor de vazão e/ou cota do rio. Essa análise de frequência de cheia é feita sob uma perspectiva da bacia hidrográfica local e baseada na suposição de que cheias são resultados de um processo aleatório que é independente e distribuído identicamente (LIMA et al., 2015).

Alguns estudos foram realizados nessa região em cheias históricas registradas nos últimos anos. A cheia de 2009 foi estudada por VALE et al. (2011), que analisaram os aspectos meteorológicos da época com base em uma análise de radiação de onda longa (ROL), bem como por FILIZOLA et al. (2014), que estudam essa mesma cheia sobre aspectos hidrológicos, climáticos e geomorfológicos com foco sobre a série de vazões e cotas da estação de Óbidos, na parte mais a jusante do Rio Amazonas.

Outros estudos (CRUZ; COSTA, 2012; SENA et al., 2012) apresentaram visões mais críticas com relação à ocorrência de enchentes e a atuação do poder público, analisando o problema de acordo com aspectos sociais e econômicos. Recentemente, foi publicado um estudo (BARICHIVICH et al., 2018) que mostra o expressivo aumento da frequência de cheias nos últimos 10 anos nas proximidades da cidade de Manaus, reforçando a importância do presente trabalho.

No âmbito deste trabalho, foram feitas modelagens hidráulicas no HEC-RAS com auxílio de dados de topobatimetria provenientes de cartas náuticas e sensoriamento remoto (SRTM). A obtenção de elementos geométricos do canal foi feita no Arc-GIS com o auxílio da ferramenta HEC-GeoRAS e exportados para o HEC-RAS. Dados de estações virtuais de diversos satélites (ENVSAT, JASON-2 e SENTINEL-3) foram utilizados para obtenção de níveis e comparados com os dados de estações fluviométricas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2014; HYBAM, 2018; Theia - Land Data Centre, 2018). Um estudo estatístico de cheias foi realizado

no rio Solimões a partir de vazões de resumo de descarga de toda a série histórica de dados. Uma análise de metodologia para calibração automática foi feita com base em códigos computacionais utilizando a linguagem VBA por meio da métrica raiz quadrada do erro médio (RMSE) dos níveis observados nas estações e calculados pelo modelo.

A partir disso, buscou-se a compreensão do fenômeno físico que ocorre na interação entre os rios Negro, Solimões e Amazonas na proximidade da cidade de Manaus. Principalmente, foram avaliadas as condições de contorno que são necessárias para a construção de um modelo no que diz respeito à presença de áreas afetadas por um remanso hidráulico variável. O processo de calibração automática também foi um resultado de extrema importância para o trabalho, visto que a calibração manual em locais de difícil determinação de parâmetros de rugosidade do rio é uma tarefa demorada e de alta complexidade.

O trabalho será dividido em cinco partes, começando com a presente seção de introdução. O Capítulo 2 mostra os objetivos gerais e específicos do trabalho. O Capítulo 3 trata da revisão bibliográfica acerca do trabalho, com a introdução de alguns conceitos teóricos fundamentais e tópicos essenciais para análise de planícies de inundação. O Capítulo 4 apresenta a parte de metodologia do trabalho, que mostra como foram feitos e obtidos os principais produtos do trabalho, de maneira clara para que o leitor possa entender cada processo e replica-lo. No Capítulo 5 são mostrados os resultados do trabalho e são feitas as devidas discussões a partir dos processos descritos na metodologia. No Capítulo 6 são feitas as conclusões do trabalho e recomendações para trabalhos futuros que utilizem este como base ou consulta.

2. OBJETIVOS

A partir desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um modelo hidráulico calibrado que permita a análise de inundações fluviais em Manaus, de forma que possa auxiliar os órgãos regionais responsáveis por alertas de cheia em Manaus na tomada de decisões com relação à gestão de recursos e pessoas nas localidades afetadas. A partir desse objetivo geral, foram determinados os seguintes objetivos específicos:

- Modelagem hidráulica e análise estatística dos eventos de cheia para avaliação dos mapas de inundação criados com auxílio de um sistema de informação geográfica;
- Análise de sensibilidade das cotas simuladas em Manaus com relação às condições de contorno do domínio modelado (vazão dos afluentes e nível d'água no Amazonas) de acordo com a variação desses parâmetros dos rios Negro, Solimões e Amazonas;
- Avaliação de informações provenientes de Sensoriamento Remoto na elaboração e calibração de modelos hidráulicos;
- Calibração do n de Manning do modelo com o uso de código computacional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BASE TEÓRICA DE ESCOAMENTO EM CANAIS ABERTOS

Os canais podem ser classificados como naturais, como os rios, córregos, e estuários ou artificiais, de seção aberta ou fechada, como os bueiros, galerias, canais de irrigação e aquedutos. Um canal é dito prismático se sua seção transversal e declividade se mantêm constantes ao longo de seu comprimento e não prismático caso contrário. Para determinação de coeficientes específicos de rugosidade e seção transversal, os canais abertos apresentam dificuldades em comparação com os condutos forçados. Esses canais normalmente apresentam seções transversais que podem variar tanto com relação ao tempo quanto em relação ao espaço e possuem coeficiente de rugosidade diferente em diversos pontos devido à sua extrema heterogeneidade de material no fundo e nas laterais, principalmente nos canais naturais (CHAUDHRY, 2008).

Uma das fórmulas mais comuns no cálculo de escoamento livres é a fórmula de Manning, que relaciona a vazão em canais abertos com a declividade da linha de energia, área molhada, raio hidráulico e rugosidade do canal (coeficiente n de Manning). Deve-se observar que o valor do coeficiente de Manning não são adimensionais, sendo seus valores determinados experimentalmente e compilados em tabelas de referência. Essa fórmula está representada abaixo.

$$Q = \frac{A \times R_h^{2/3} \times S^{1/2}}{n} \quad (3.1)$$

Onde Q é a vazão em m^3/s , A é a área molhada na seção transversal, R_h é o raio hidráulico da seção, S é a declividade da linha de energia e n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

Em exercícios teóricos de escoamento de superfície livre são feitas diversas simplificações e considerações, arbitrando-se alguns parâmetros de forma a simplificar equações e soluções de problemas reais. Com ajuda de softwares de computação é possível utilizar métodos numéricos com sucessivas aproximações a fim de que se possa representar com fidelidade o fenômeno de escoamento dos fluidos na natureza.

Em projetos reais de canais abertos existem diferenças entre as seções transversais e declividade de fundo ao longo do rio. Essas variações na geometria do canal produzem escoamentos não-uniformes enquanto se passa de um escoamento uniforme para o outro. Como as análises de escoamento gradualmente variado são feitos em canais longos, devem ser consideradas as perdas por fricção e resistência de contorno da geometria do rio (CHAUDHRY,

2008). O escoamento permanente variado vem sendo estudado por muitos anos por engenheiros hidráulicos do mundo todo. Sua complexidade está associada ao próprio tratamento matemático das equações que governam esse tipo de escoamento e ao grande número de parâmetros hidráulicos que sofrem sensíveis variações ao longo da corrente.

As equações do escoamento gradualmente variado podem ser definidas partindo das seguintes suposições:

- a) A declividade de fundo do canal é baixa, ou seja, menor do que 5%. Nesse caso, os valores de seno e tangente do ângulo θ do fundo do canal com a horizontal podem ser aproximados pelo próprio valor do ângulo e as profundidades da linha d'água medidas verticalmente ou normal com relação ao fundo do canal são aproximadamente iguais;
- b) O canal é prismático e não possui nenhuma entrada ou derivação lateral. Canais com variações na seção transversal ou declividade de fundo podem ser divididos em partes de canais prismáticos;
- c) A distribuição de pressão é hidrostática em todas as seções transversais. A curvatura das linhas de fluxo em escoamentos gradualmente variados é, normalmente, pequena sendo então válida a suposição da distribuição de pressão hidrostática;
- d) As perdas de carga podem ser determinadas por meio de equações derivadas em escoamentos uniformes. O perfil da linha d'água medido durante o uso de modelos hidráulicos e observações no campo se comparam satisfatoriamente com aqueles calculados usando as equações de perda de carga para escoamentos uniformes.

A altura total em um canal pode ser expressa pela seguinte equação:

$$H = z + y + \frac{\alpha V^2}{2g} \quad (3.2)$$

Onde H é a altura da linha de energia acima do referencial especificado; z é a elevação do fundo do canal com relação a esse referencial; y é a profundidade da linha d'água; V é a velocidade média e α é o coeficiente de Coriolis. O esquema de representação dessas variáveis é mostrado na Figura 3-1 a seguir:

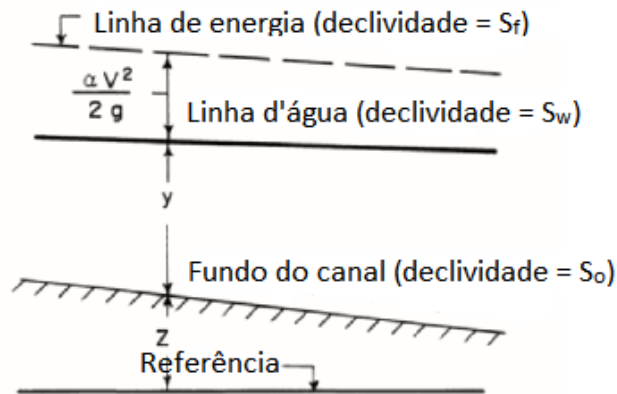


Figura 3-1 - Representação da equação da energia em um canal aberto. Fonte: (CHAUDHRY, 2008)

A determinação do perfil d'água em canais regulares pode ser feita através de métodos de integração gráfica, métodos de integração direta e métodos de soluções numéricas passo a passo, popularmente conhecidas como *step methods*. Com o advento da computação e a sua aplicação cada vez mais presente na engenharia, foi possível a simplificação de cálculos tediosos e dispendiosos por parte das pessoas. Esse fato permitiu uma melhor acurácia dos métodos, melhorando os resultados obtidos, entretanto, levando-se em conta as restrições intrínsecas de modelos que tentam representar fenômenos naturais por meio de equações e simplificações humanas.

A classificação de perfis da superfície da água será feita da seguinte forma, adotada como padrão em livros didáticos dessa área (CHAUDHRY, 2008; PORTO, 1998): uma letra representa o tipo de declividade de fundo do canal e um número indica a posição relativa do perfil com respeito à linha de profundidade crítica (denominada CDL) e à linha de profundidade normal (denominada NDL). As profundidades crítica e normal são representadas por y_c e y_n , respectivamente.

As declividades de fundo são classificadas em cinco categorias: moderada (*mild slope*), severa (*steep slope*), crítica (*critical slope*), horizontal (*horizontal slope*) ou em aclave (*adverse slope*). A primeira letra de cada uma dessas categorias será utilizada para representar a declividade de fundo do canal.

A declividade de fundo é considerada moderada se o escoamento uniforme é subcrítico ($y_n > y_c$), crítica se o escoamento uniforme é crítico ($y_n = y_c$) e severa se o escoamento uniforme é

supercrítico ($y_n < y_c$). Em canais horizontais a profundidade normal é infinita e não está presente se a declividade do canal é negativa.

Para designar a posição relativa da superfície do perfil de escoamento existem diferentes configurações para cada uma das classificações acima. Para as declividades moderada e severa, as linhas de profundidade normal e crítica dividem o espaço acima do canal em três regiões, como mostrado na Figura 3-2 abaixo. Para os casos das declividades crítica, horizontal e em aclave existem apenas duas regiões porque a linha de profundidade normal é sobreposta pela linha da profundidade crítica, é infinita ou não existe, respectivamente para cada uma das declividades.

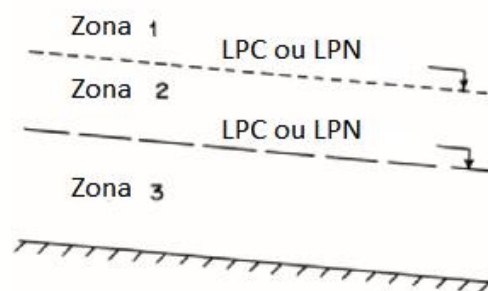


Figura 3-2 - Zonas definidas entre a linha de profundidade normal, crítica e fundo do canal.
Fonte: (CHAUDHRY, 2008)

3.2 MÉTODO DO PASSO PADRÃO

A taxa de variação da profundidade d'água no escoamento gradualmente variado é normalmente pequena. Devido a isso, a suposição de que existe uma distribuição de pressão hidrostática ao longo do fluido é válida. Além disso, pode ser introduzido o coeficiente de Coriolis, α , para considerar o padrão não uniforme da distribuição de velocidade e usar a velocidade média para obter a carga cinética em uma seção do canal. Para o caso de um canal prismático que não possui entradas nem derivações laterais, a equação de continuidade entre seções pode ser aplicada.

O controle do escoamento subcrítico é feito pelas condições de contorno à jusante e o do escoamento supercrítico, pelas condições de contorno à montante. Para calcular o perfil da linha d'água, começa-se o cálculo em um local onde a profundidade do escoamento para determinado valor de vazão é conhecida.

O método do passo padrão (*Standard Step Method*) é utilizado quando se deseja determinar a profundidade da linha d'água em locais específicos do canal, quando a geometria do canal não é prismática e as seções transversais estão presentes em apenas alguns locais específicos.

De acordo com a Figura 3-3 abaixo, a profundidade da linha d'água y_1 , para um valor específico de descarga Q , em um dado canal na seção 1 (localizada na coordenada x_1) é conhecida e deseja-se determinar a profundidade da linha d'água y_2 na seção 2 (localizada na coordenada x_2).

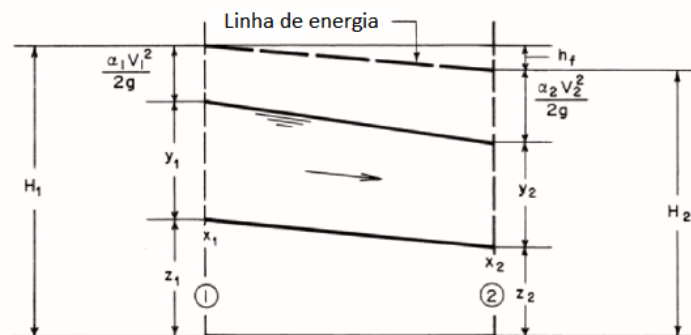


Figura 3-3 - Representação da variação da energia entre seções consecutivas do canal. Fonte: (CHAUDHRY, 2008)

É assumido que os valores do coeficiente de Coriolis, α , em ambas as seções são conhecidos. Dessa forma, como y_1 é conhecido, pode-se determinar a velocidade na seção 1, V_1 , para uma vazão específica a partir da equação da continuidade. A altura total, H , na seção 1 é conhecida e determinada pela Equação 3.3 a seguir:

$$H_1 = z_1 + y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \quad (3.3)$$

A partir da equação de energia, a altura total na seção 2 é:

$$H_2 = H_1 - h_f \quad (3.4)$$

Onde h_f é a perda de carga (soma da perda por fricção e forma) entre as seções 1 e 2. De acordo com trabalhos anteriores (LAURENSEN, 1986), a média aritmética das declividades da superfície d'água entre as duas seções resultam no menor erro máximo, apesar de nem sempre resultar no menor valor de erro possível de ser obtido por meio de outras formulações de média (geométrica ou harmônica). Se a distância entre as duas seções é pequena e as profundidades y_1 e y_2 não são significativamente diferentes, o uso da média aritmética entre as duas declividades da superfície d'água resulta em valores satisfatórios, além de ser a fórmula mais

simples de média existente. Com isso, uma expressão para a perda de topo pode ser determinada:

$$h_f = \frac{1}{2}(S_{f1} + S_{f2})(x_2 - x_1) \quad (3.5)$$

Substituindo a Equação 3.5 acima na Equação 3.4, obtém-se:

$$H_2 = H_1 - \frac{1}{2}(S_{f1} + S_{f2})(x_2 - x_1) \quad (3.6)$$

Substituindo na equação 3.6 uma expressão para H_2 semelhante àquela para H_1 na equação 3.2 e transpondo todos os termos para o lado esquerdo da equação:

$$y_2 + \frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^2} + \frac{1}{2}S_{f2}(x_2 - x_1) + z_2 - H_1 + \frac{1}{2}S_{f1}(x_2 - x_1) = 0 \quad (3.7)$$

Na Equação 3.7, A_2 e S_{f2} são funções de y_2 e outras variáveis já conhecidas ou calculadas na seção 1. Dessa forma, y_2 pode ser determinada por meio da solução da equação algébrica não linear:

$$F(y_2) = y_2 + \frac{\alpha_2 Q^2}{2gA_2^2} + \frac{1}{2}S_{f2}(x_2 - x_1) + z_2 - H_1 + \frac{1}{2}S_{f1}(x_2 - x_1) = 0 \quad (3.8)$$

A Equação 3.8 acima pode ser resolvida com relação à y_2 por um método de tentativa e erro, ou usando o método de Newton-Raphson ou um método de bissecção. Para o método de Newton-Raphson, deriva-se a função $F(y_2)$ com relação a y_2 obtendo-se:

$$\frac{dF}{dy_2} = 1 - \frac{\alpha_2 Q^2}{gA_2^3} \frac{dA_2}{dy_2} + \frac{1}{2}(x_2 - x_1) \frac{d}{dy_2} \left(\frac{Q^2 n^2}{C_o^2 A_2^2 R_2^{\frac{4}{3}}} \right) \quad (3.9)$$

Para o cálculo da altura y_2 , pode ser utilizado o método de Newton-Raphson (RHODES, 1998). A execução desse método pode ser feita por meio dos seguintes passos:

- 1) Calcular a altura da linha de energia (H_1) na seção 1 utilizando a equação 3.3 com os valores já obtidos para y_1 e z_1 ;
- 2) Estimar a profundidade da linha d'água na seção 2. Essa estimativa e outras variáveis relacionadas a ela serão indicadas com o sobrescrito ' '. No começo dos cálculos, a taxa de variação de y em x_1 deve ser determinada pela equação 3.2 substituindo-se y por y_1 . Com isso, a profundidade da linha d'água, y'_2 , pode ser calculada por meio desta equação. Durante os passos subsequentes, y'_2 deve ser determinada pela extrapolação

da mudança na profundidade da linha d'água entre as duas seções anteriores calculadas durante o passo anterior;

- 3) Usando a estimativa da altura d'água anterior, y'_2 , na seção 2, calcula-se B'_2 , A'_2 , R'_2 e S'_{f2} que são a largura de topo, área da seção transversal, raio hidráulico e declividade da linha de energia, respectivamente;
- 4) Calcular o valor da função $F(y'_2)$ da equação 3.8 utilizando as variáveis calculadas no passo anterior;
- 5) Calcular o valor da derivada dessa função com relação a y'_2 a partir da equação 3.6 utilizando as variáveis obtidas no passo 3;
- 6) Com isso, pode-se refinar o valor estimado y'_2 por meio da Equação 3.10 a seguir:

$$y_2 = y'_2 - \frac{F(y'_2)}{[dF/dy_2]'} \quad (3.10)$$

- 7) Se o módulo da diferença entre o valor refinado e o valor estimado for menor do que um valor de tolerância arbitrário para a convergência da solução iterativa, ϵ , então assume-se que o valor estimado é o valor da profundidade da linha d'água na seção 2, y_2 ; se não, assume-se que $y'_2 = y_2$ e repete-se os passos 3 a 7 acima até que uma solução seja obtida.

3.3 MÉTODO DE HIDROMETRIA *STAGE-FALL-DISCHARGE* (SFD)

A utilização do método da curva-chave para obtenção dos valores de vazão em um rio está amparada na premissa que exista uma relação biunívoca entre cota e vazão na seção de medição desse rio. Em locais onde existe um remanso hidráulico variável intermitente ou contínuo, é recomendada a utilização da metodologia SFD descrita pela norma ISO 9123:2017 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2017).

Um remanso hidráulico é definido como a condição onde o escoamento no canal é retardado de forma que seja necessário um nível d'água maior para manter uma determinada vazão caso não houvesse a presença do remanso. Esse fenômeno é causado por constrições no canal, por estruturas a jusante como barragens e pontes, pela entrada de tributários ou movimentos de maré em trechos do rio. Todos esses aspectos podem aumentar ou diminuir o gradiente de energia para uma determinada vazão e causar condições para o desenvolvimento do remanso variável.

Essa norma baseia-se na utilização de duas estações fluviométricas, uma estação de base (ou referência) e uma estação auxiliar, com dados de nível concomitantes. São necessárias

também algumas medições de descarga para que sejam calibrados os dados de vazão de forma precisa para esse método.

A estação auxiliar deve estar localizada, preferencialmente, a jusante da estação de base. Isso é necessário pelo fato de que essa estação deve estar o mais longe possível da possível causa do remanso variável e porque, quando a estação de base estiver livre do remanso, a declividade medida entre elas não é representativa com relação à declividade da linha d'água na estação a montante. Dessa forma, a estação de montante pode ter sua vazão calculada por meio de uma curva SFD, e a estação a jusante não.

Quando as duas estações estão referenciadas com relação ao mesmo datum, a diferença de nível d'água entre as suas séries pode ser comparada (entradas e derivações de vazão devem ser minimizadas para diminuir possíveis erros). Valores de vazão confiáveis são obtidos quando a diferença de nível entre essas estações é maior que, aproximadamente, 15 centímetros. Além disso, uma sincronização temporal entre as duas estações é de suma importância para casos onde o nível d'água varia rapidamente, ou quando a diferença de nível entre elas é pequena. Erros causados pelo não cumprimento dessas recomendações aumentam significativamente para vazões baixas.

Na condição de remanso hidráulico variável, a declividade medida entre as estações de base e auxiliar é usada como um terceiro parâmetro, de forma que a curva se torna uma relação entre cota, declividade e vazão. O método SFD possui duas grandes subcategorias de cálculo:

- a) Método da diferença constante, o qual o método da declividade unitária é um caso especial;
- b) Método da diferença variável.

A aplicabilidade de cada método está amparada na presença de um remanso intermitente ou sempre presente. O método da diferença constante é melhor para quando o remanso está sempre presente, enquanto o método da diferença variável é melhor quando o remanso é intermitente.

O método da diferença unitária é o mais simples entre eles e requer a menor quantidade de dados para calibração, enquanto o método da diferença variável é o mais complexo e requer a maior quantidade de dados para calibração.

A descrição de cada um dos métodos não será realizada no presente trabalho devido à sua extensão, mas pode ser consultada pelo leitor caso julgue necessário.

Esse método foi utilizado anteriormente para o rio Solimões, em uma tese de doutorado da Universidade Federal de Viçosa (ALVES, 2018). Serão feitas comparações dos resultados obtidos por ela para o rio Solimões com os resultados obtidos no presente trabalho.

3.4 HISTÓRICO DA HIDRÁULICA DE CONDUTOS A SUPERFÍCIE LIVRE

Durante anos, as pessoas vêm tentando proteger áreas inabitadas da inundações e fornecer água para áreas que sofrem de sua falta em quantidades suficientes. Existem evidências de que a primeira grande estrutura hidráulica, uma barragem no Rio Nilo, localizada aproximadamente 23 quilômetros ao sul de Cairo, Egito, foi construída no ano 4000 A.C (ROUSE; INCE, 1963). O aumento do nível d'água à montante dessa estrutura resultou na divisão de escoamentos por canais escavados para irrigar as zonas áridas próximas ao Nilo.

Grandes barragens construídas em outros grandes rios no Oriente Médio são datadas de antes de 3000 A.C pelos egípcios e babilônios e barragens e estruturas de irrigação estavam em construção na China pouco antes de 1000 A.C (ROUSE; INCE, 1963). A barragem de Ma'rib, no Iêmen, operou por mais de 1400 anos antes da sua falha em 550 D.C (MORRIS; WIGGERT, 1972), por falta de manutenção. O que é impressionante acerca dessas estruturas era o fato de seu dimensionamento ser feito basicamente por tentativa e erro e pela experiência de seus construtores. Nenhuma análise hidráulica era feita. Essas estruturas provavelmente duraram tanto tempo devido ao superdimensionamento de suas dimensões com relação ao esforço e forças atuantes sobre as mesmas. Hoje em dia esse fato não ocorre com tanta frequência porque engenheiros buscam diminuir seus custos e o uso de terras envolvidas no processo construtivo.



Figura 3-4 – Ruínas da barragem de Ma'rib. Fonte: (H. Grobe, 1988)

Os aquedutos romanos construídos em meados de 100 D.C são normalmente citados como exemplos extraordinários de estruturas hidráulicas, e ainda, os Romanos não possuíam

conhecimentos relativos à declividade, velocidade e vazão (HERSCHEL, 1913). Seus relatos escritos indicam que eles acreditavam que a área da seção transversal era a variável principal que determinaria a vazão de um canal; aumentar ou diminuir a declividade não gerava influências aparentemente à capacidade de escoamento do canal.



Figura 3-5 – Aqueduto da Pont du Gard, sudeste da França. Fonte: (Emanuele - Flickr: Pont du Gard, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18375492>)

A primeira formulação para cálculo de velocidade em canais de escoamento uniforme foi desenvolvida em 1768 pelo engenheiro francês Antoine Chézy e foi utilizada para o dimensionamento de um canal de abastecimento de água de Paris, na França. Mais de 100 anos depois, um Irlandês, Robert Manning, modificou a equação de Chézy, e estabeleceu uma das quatro principais equações que hoje em dia integram a base para a análise hidráulica de canais abertos e de planícies de inundação (continuidade, energia, momento e Manning). Essas equações são utilizadas atualmente, porém, até o início do século XXI, o dimensionamento de estruturas hidráulicas geralmente continuou a refletir a experiência prática do engenheiro em detrimento de processos computacionais usando as quatro equações fundamentais.

Os primeiros 30 anos do século XX apresentaram significante avanços na determinação de planícies de inundação. Além do cálculo do escoamento de canais por meio da equação de Manning, estudos em laboratórios da Europa demonstraram a aplicabilidade de modelos físicos em estudos de rios (DYHOUSE et al., 2007). O estudo de modelos físicos em escala reduzida era geralmente feito para resolução de problemas hidráulicos encontrados no campo e o seu uso foi se tornando cada vez mais comum para responder questões hidráulicas que eram analiticamente indeterminadas.

Como consequência da enchente no Baixo Mississippi em 1927, a USACE fundou a estação experimental de hidrovias em Vicksburg, Mississippi para dar suporte aos estudos hidráulicos da área e, posteriormente, de todo o país. No Estados Unidos, a análise hidráulica de planícies de inundação por modelagem física teve seu início na WES, com um modelo físico da maior parte da Bacia do Rio Mississippi construída em uma área de 81 hectares perto de Clinton, no estado do Mississippi. A maioria dos diques construídos ao longo do rio Mississippi foi baseado em resultados de dimensionamento em simulações de nível d'água nesse modelo físico da bacia do rio durante os anos 1950 e 1960. Nessa época, os cálculos hidráulicos demandavam muito tempo e engenheiros gastavam, frequentemente, dias ou semanas para completar o estudo de apenas um ramo de um rio.

Nos anos 60, o primeiro procedimento simples e automatizado foi desenvolvido para calcular o perfil da superfície d'água e facilitar o trabalho árduo e cansativo realizado pelos engenheiros hidráulicos (DYHOUSE et al., 2007). Esses programas pioneiros utilizavam dados geométricos para determinadas seções transversais do rio e demandavam que cálculos de estruturas como pontes e bueiros e determinações de planícies de inundações fossem feitos à mão fora do programa. Um grande avanço nessa área foi o desenvolvimento de uma rotina computacional na linguagem de programação FORTRAN pelo programa da USACE “*Backwater, Any Cross Section*” em 1966, desenvolvido pelo centro de engenharia hidrológica – HEC. Esse programa foi revisado, expandido e lançado em 1968 como “HEC-2”.

Com o lançamento do HEC-2, perfis de escoamentos subcríticos e supercríticos que incorporam estruturas hidráulicas passaram a ser realizados e analisados de uma maneira simples e intuitiva por meio do programa. Programas similares foram desenvolvidos nos anos 70 e 80 por diferentes órgãos americanos como o WSP2, do serviço de conservação de recursos naturais (*Natural Resources Conservation Service*) e o WSPRO pelo centro de pesquisas geológicas dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*).

De todos os modelos hidráulicos de rios, o HEC-2 foi o mais amplamente utilizado. Ele foi um dos primeiros programas disponíveis para análise hidráulica de canais abertos que incorporaram análises de pontes, bueiros e outras estruturas hidráulicas. Mais importante, esse programa foi bem documentado e guiado pelo centro de engenharia hidrológica da USACE, permitindo o seu uso e ampla divulgação do conhecimento nessa área de estudo (ROUSE; INCE, 1963). O HEC começou o desenvolvimento de um programa de substituição para o HEC-

2 em 1991, culminando no lançamento do HEC-RAS (*River Analysis System*) em sua versão 1.0 em 1995.

Atualizações no HEC-RAS tem sido constantemente lançadas e o seu produto tem sido desenvolvido até hoje. Dentre os principais avanços desde a versão inicial do programa pode-se destacar as análises de mudança do canal, capacidades de cálculo com escoamento misto, análise de bueiros laterais e em linha, simulação hidráulica de estruturas de controle, mudanças do n de Manning na direção vertical e a capacidade de incorporação de dados obtidos a partir de ambientes SIG. Seu uso provavelmente será perpetuado por diversos anos com o aumento das capacidades computacionais e de análise de diferentes fenômenos naturais mais complexos.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE FENÔMENOS HIDROLÓGICOS

Os processos hidrológicos determinísticos são aqueles que resultam da aplicação direta de leis da Física, Química ou Biologia. Quase todos os processos hidrológicos são considerados estocásticos, ou governados por leis de probabilidades, por conterem componentes aleatórias as quais se superpõem a regularidades eventualmente explicitáveis, tais como as estações do ano ou às variações da radiação solar no topo da atmosfera ao longo da órbita da Terra em torno do Sol.

A teoria de probabilidades, que corresponde à área da matemática que investiga os fenômenos aleatórios, é uma importante ferramenta na análise de fenômenos hidrológicos. A teoria de probabilidades apresenta duas ramificações importantes para a hidrologia aplicada: a estatística matemática e o estudo de processos estocásticos. A estatística matemática é o ramo que analisa uma amostra de observações e extrai inferências quanto à ocorrência de todas as prováveis realizações do fenômeno em questão. O estudo de processos estocásticos refere-se à identificação e interpretação da aleatoriedade presente em tais processos (PINTO; NAGHETTINI, 2007).

Muitos problemas em recursos hídricos requerem a comparação e adequação de uma amostra à uma distribuição de frequência. Essas relações são definidas a partir do ajuste de uma série de dados aleatória simples a uma distribuição probabilística, que fornece uma representação suave da distribuição de frequência. A partir dessa distribuição, é possível obter quantis de referência associados a probabilidades de ocorrência que servem para estimar valores que não estão presentes na amostra inicial.

Entretanto, existem fontes de incerteza que restringem a precisão desses quantis. Algumas das fontes mais comuns seriam os erros de medição, a escolha da distribuição de probabilidade

e o ajuste dos parâmetros dessa distribuição. Outro fator que é determinante na precisão desses quantis é o comprimento (quantidade) de elementos da amostra (JIN; STEDINGER, 1989; REIS; STEDINGER, 2005). O ideal, para melhor representação da amostra, seria uma quantidade grande de elementos em um grande intervalo de tempo que permitiria identificar possíveis valores provenientes de erros sistemáticos e verificar a variabilidade ao longo do tempo da variável, de modo que o seu comportamento e faixa de valores possíveis esteja o mais completa possível para que os quantis sejam acurados e precisos.

As séries hidrológicas referentes a eventos máximos, em geral, possuem coeficientes de assimetria positivos. Essa constatação é particularmente verdadeira para as séries de vazões máximas anuais. De fato, para tais séries, há uma grande concentração de valores não muito inferiores, ou não muito superiores, à cheia média anual, que, em geral, correspondem aos níveis d'água contidos pelo leito menor da seção fluvial. Entretanto, a rara combinação de condições hidrometeorológicas excepcionais e de elevado teor de umidade do solo pode determinar a ocorrência de uma grande enchente, com vazão máxima muitas vezes superior ao valor modal (PINTO; NAGHETTINI, 2007).

Para adequar os valores de vazão de cheia a uma função de probabilidade são utilizadas distribuições de valores extremos. Essas podem ser divididas em distribuições exatas e assintóticas, sendo a última mais aplicada às variáveis hidrológicas, embora as premissas que estas se baseiam não se verifiquem totalmente na realidade dos fenômenos físicos da água. A premissa fundamental de que as variáveis originais são independentes e igualmente distribuídas não se aplicam a valores médios mensais ou diários, visto que esses não possuem uma única e idêntica distribuição de probabilidades.

Em particular, a forma assintótica de máximos tipo I, também conhecida como distribuição de Gumbel de máximos, é muito utilizada na análise de frequência de eventos hidrológicos. Ela se refere a um conjunto de N variáveis aleatórias originais $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$, independentes e igualmente distribuídas conforme um modelo $F_X(x)$, de cauda superior exponencial. A função de probabilidades acumuladas da distribuição de Gumbel é dada por

$$F_Y(y) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{y - \beta}{\alpha} \right) \right] \text{ para } -\infty < y < \infty, -\infty < \beta < \infty, \alpha > 0 \quad (3.11)$$

Na qual, α representa o parâmetro de escala e β o parâmetro de posição. A função densidade da distribuição de Gumbel é dada por

$$f_Y(y) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{y - \beta}{\alpha} - \exp \left(-\frac{y - \beta}{\alpha} \right) \right] \quad (3.12)$$

O valor esperado, a variância e o coeficiente de assimetria de Y são, respectivamente,

$$E[Y] = \beta + 0,5772\alpha \quad (3.13)$$

$$Var[Y] = \sigma_Y^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6} \quad (3.14)$$

$$\gamma = 1,1396 \quad (3.15)$$

A função de quantis é definida por

$$y(F) = \beta - \alpha \ln[-\ln(F)] \text{ ou } y(T) = \beta - \alpha \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (3.16)$$

Na qual, T representa o tempo de retorno em anos e F representa a probabilidade anual de não superação. Na Equação 3.16, substituindo-se y pelo valor esperado E[Y], resulta que a média de uma variável de Gumbel corresponde ao tempo de retorno T = 2,33 anos. Em alguns estudos de regionalização de vazões de cheias, esse quantil recebe a denominação de “cheia média anual” (PINTO; NAGHETTINI, 2007).

Para estimação dos parâmetros da distribuição são utilizados métodos que buscam a aproximação das variáveis amostrais aos reais valores populacionais. Devido à impossibilidade de se obter todos os valores da população da variável aleatória, é necessária a estimação de parâmetros populacionais por meio de valores amostrais. Os métodos mais comuns utilizados na estimação de parâmetros são o método da máxima verossimilhança (MVS), o método dos momentos (MOM) e o método dos momentos-L (MML).

Em uma determinada amostra de observações, um ponto amostral é considerado atípico, ou um “*Outlier*”, quando se afasta consideravelmente dos demais valores da amostra, prejudicando o ajuste da mesma a uma distribuição de probabilidade. Esse desvio pode ser causado por erros sistemáticos no processamento dos dados, mas também pode ser resultado de causas naturais indeterminadas (PINTO; NAGHETTINI, 2007).

Um teste de hipótese para detecção e identificação desses pontos atípicos foi proposto por Grubbs e Beck (1972) é um dos mais frequentemente empregados atualmente. De acordo com esse teste, os valores x_S e x_L definem, respectivamente, os limites superior e inferior, acima dos

quais, os pontos atípicos são detectados e identificados. Esses valores são descritos da seguinte forma:

$$x_s = \exp(\bar{x} + k_{N,\alpha} s_X) \quad (3.17)$$

$$x_l = \exp(\bar{x} - k_{N,\alpha} s_X) \quad (3.18)$$

Onde \bar{x} e s_X representam, respectivamente, a média aritmética e o desvio-padrão de uma amostra de tamanho N e $k_{N,\alpha}$ denota o valor crítico da estatística de Grubbs e Beck, para um valor de significância α . Para $\alpha = 10\%$, foi proposta pelos autores acima a seguinte expressão para o valor crítico da estatística:

$$k_{N,\alpha=0,10} = -3,62201 + 6,28446N^{\frac{1}{4}} - 2,49835N^{\frac{1}{2}} + 0,491436N^{\frac{3}{4}} - 0,03791N \quad (3.19)$$

Assim que são obtidos os valores superior e inferior que determinam os limites dos valores considerados atípicos na amostra, deve ser feita uma análise suplementar que justifique a exclusão ou não desses valores críticos.

3.6 GEODESIA

Para análise dos dados de altura referentes à satélites GPS, são de extrema importância para a hidrologia as missões espaciais com foco em obtenção de dados de nível d'água em relação a um datum específico. Segundo (MOREIRA, 2016) a geodesia pode ser compreendida, de forma singela, como a ciência que estuda a forma, dimensões e o movimento de rotação da Terra, com identificação da localização de objetos em sua superfície e do campo gravitacional terrestre, além da variação dessas características no decorrer do tempo e ao longo do espaço.

Na Figura 3-6 a seguir são representados os conceitos de altitude ortométrica, altitude geométrica e ondulação geoidal. A altitude ortométrica H de um ponto é a distância ao longo da linha vertical entre esse ponto e o geoide. A altitude geométrica h de um ponto na Terra corresponde à distância ao longo da normal a partir do elipsoide de referência adotado. A ondulação geoidal ΔN é o segmento normal delimitado pela interseção entre o geoide e o elipsoide. Convencionalmente, quando o geoide está acima do elipsoide, esse valor será positivo e, caso contrário, será negativo.

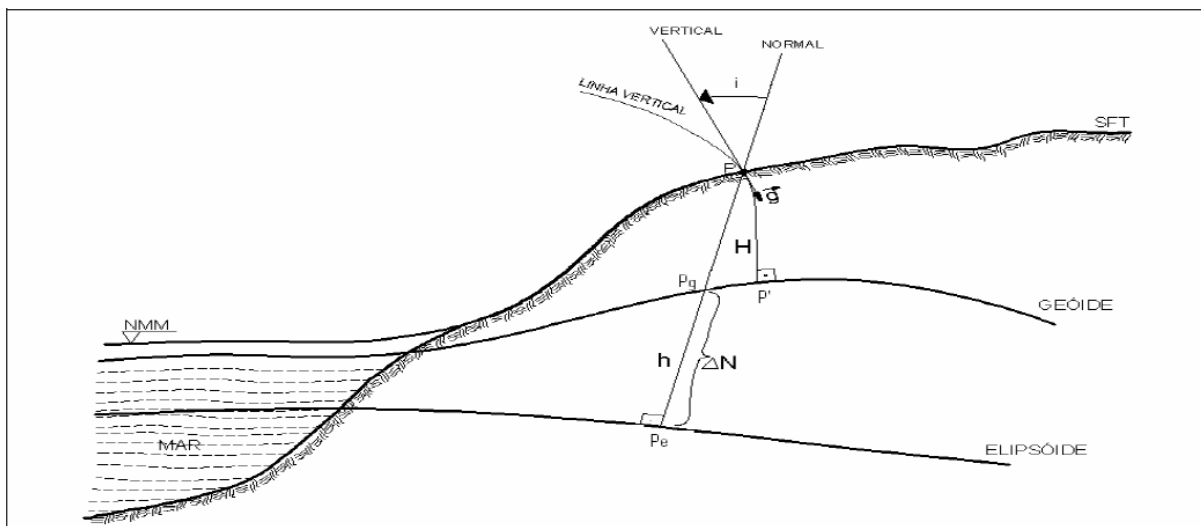


Figura 3-6 – Representação das altitudes geométrica e ortométrica e da ondulação geoidal.
 Fonte: (SAATKAMP; MORAES; FARRET, 2009)

A altimetria por radar é uma técnica geodésica que, por meio do uso de radares altímetros em plataformas orbitais, permitiu nos últimos 30 anos o monitoramento dos oceanos, passando, também, a ser aplicada, nos últimos 20 anos, no estudo de águas continentais (CALMANT; SEYLER, 2006). Dados de sensoriamento remoto na região da Amazônia obtidos por meio de sensores altimétricos podem ser utilizados para obtenção de diversas variáveis hidrológicas, meteorológicas e ambientais (BEVIS et al., 2005; LARSON et al., 2008; MOREIRA, 2016). Com levantamentos feitos em campo, é possível obter informações importantes para a modelagem hidráulica do rio como perfil longitudinal e o posicionamento de estações hidrométricas em relação ao mesmo referencial altimétrico, conforme apresentado no trabalho de Moreira (2010).

Segundo Vauchel (2014), estações virtuais representam a interceptação dos traços dos satélites em órbita com o corpo hídrico. Esses dados podem apresentar algumas falhas causadas por fatores como água não refletida, bancos de areia ou vegetação intrafluvial, podendo alterar a qualidade dos dados de satélite pela variação da energia recebida. Outros trabalhos como o de Sousa *et al.* (2012) foram desenvolvidos com dados de altimetria e sua correção foi feita por meio de estatísticas simples (médias de longo período, medianas) e alguns softwares de desenvolvimento de base de dados como, por exemplo, o VALS (*Virtual Altimetry Station – 2009*) disponibilizado pelo (HYBAM, 2018).

Recentemente, foram publicados artigos que utilizam dados de satélite para verificação da precisão de dados de nível d'água em rios (FRAPPART et al., 2006; MARINHO, SILVA E FILIZOLA, 2017; PASSAIA, 2016). Os artigos e teses utilizam diferentes satélites para

obtenção do nível d'água (ICESAT, ENVISAT e JASON-2), mas possuem diferenças de nível em relação a estações fluviométricas na faixa de 0,3 a 0,5 metros. As trajetórias dos satélites JASON-2 e ENVISAT são mostradas na Figura 3-7 a seguir.

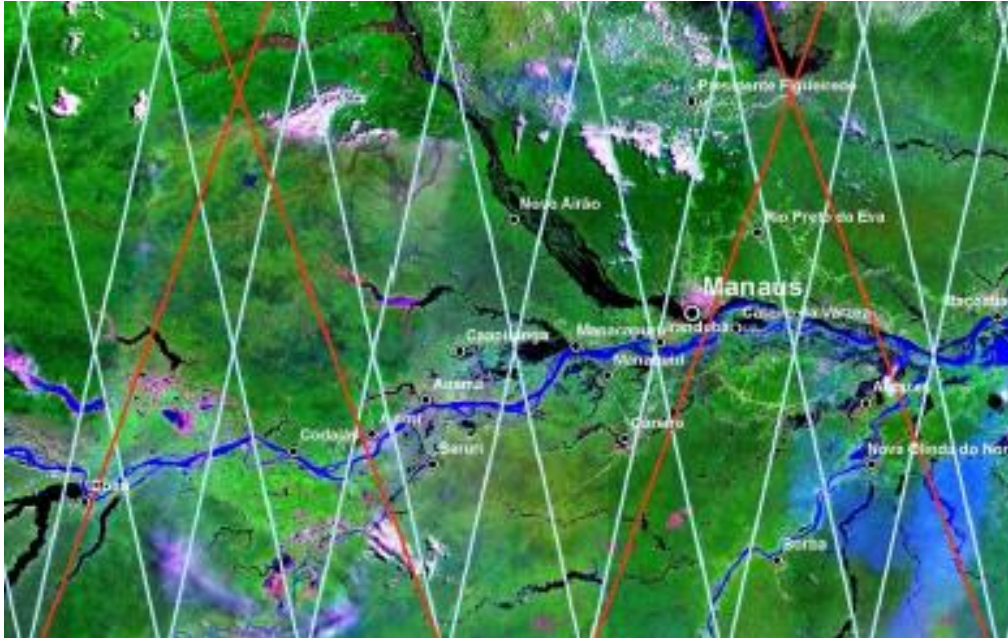


Figura 3-7 – Resolução espacial das trajetórias dos satélites Jason-2 (linhas vermelhas) e Envisat (linhas brancas) em imagem Landsat5-TM. Fonte: (MOREIRA, 2016)

Com o avanço da utilização de dados geodésicos na área da hidrologia, pode-se pensar que o sucesso dessas aplicações permitirá que, no futuro, sejam propostas missões geodésicas dedicadas exclusivamente à hidrologia que permitam o monitoramento de áreas de difícil acesso e que representam um conjunto significativo de regiões não apropriadamente monitoradas (MOREIRA, 2016).

Existem diversas teorias e métodos disponíveis para o cálculo de alturas ortométricas a partir de dados de GPS (HEIN, 1985; LIDDLE, 1989), cada um tendo suas vantagens e desvantagens. Uma das desvantagens mais comuns para esse tipo de análise é a falta de conhecimento acerca do modelo geoidal da Terra que possui a alternativa de substituição pelo elipsoide.

Durante os anos, foram desenvolvidos diversos modelos gravitacionais da Terra. Um dos mais utilizados antigamente era o modelo EGM1996, até a sua substituição pelo modelo mais recente EGM2008.

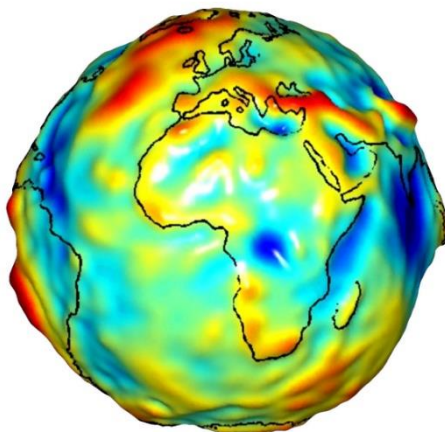


Figura 3-8 – Representação de um geoide de acordo com a superfície da Terra. Fonte: (Missão GRACE – NASA, 2002)

3.7 SENSORIAMENTO REMOTO NA DETERMINAÇÃO DE SUPERFÍCIES

Um modelo digital de terreno (MDT) representa um conjunto de matrizes ordenadas de números que representam a distribuição espacial dos atributos do terreno em determinada região na superfície da Terra (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991). Modelos digitais de terreno são usados em diversas aplicações, com um forte enfoque em trabalhos de hidrologia e recursos hídricos, geologia e geomorfologia, projetos de engenharia civil, estudos de geleiras e de vulcões, bem como modelagens de fenômenos diretamente relacionados com essas áreas de aplicação. Sua aplicação, aliada a sistemas de informações geográficas (SIG), permite a análise de fenômenos naturais.

Um modelo digital de elevação (MDE) é uma representação computacional da topografia de uma determinada região que distribui, em relação à um referencial cartográfico, uma série de pontos com coordenadas cartesianas X, Y e Z. Os valores da coordenada Z representam a altitude relativa ao referencial adotado num modelo tridimensional que se está estabelecido a elevação. A partir desses modelos é possível realizar diversas manipulações gráficas como calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais de um rio, gerar mapas sombreados ou em escala de cinza, entre outros.

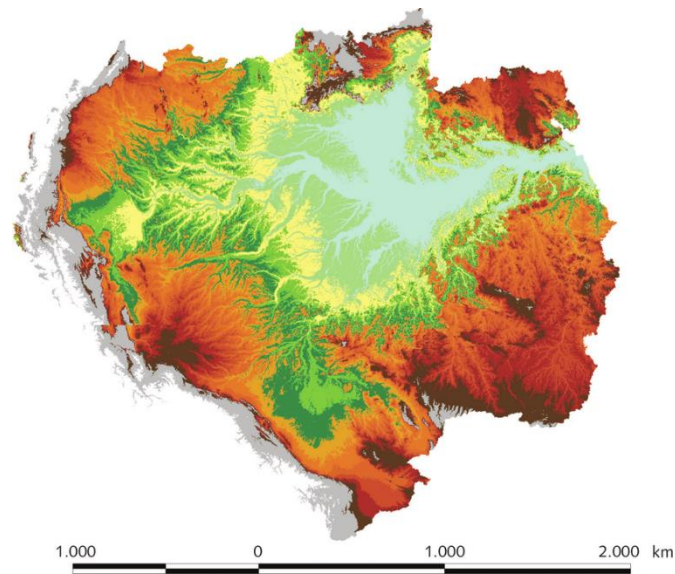


Figura 3-9 – Modelo Digital de Elevação da Bacia Amazônica. Fonte: (BORMA; NOBRE, 2016)

A precisão de modelos digitais de elevação é de extrema importância para uma modelagem hidráulica e para a determinação da planície de inundação de um trecho de rio. Com mudanças climáticas interanuais, períodos de seca e chuva irregulares e variação nos tipos de uso da terra nas proximidades do rio, resultados precisos de delimitação da planície de inundação são cada vez mais necessários e devem ser atualizados com uma periodicidade que permita uma análise sempre atualizada e coerente com as mudanças espaciais e físicas que ocorrem no local.

Os sistemas de informações geográficas são softwares de informação espacial que permitem a manipulação pelo usuário de dados geográficos georreferenciados, para análise e tomada de decisão acerca de determinados fenômenos físicos que ocorrem no espaço em que se estuda. São de extrema ajuda em órgãos gestores e de controle de recursos hídricos pois possibilitam uma melhor visualização, geração e manipulação de dados, para que se tenha melhor conhecimento acerca de determinada localidade e suas características.

O modo mais comum de operação de um SIG é a união de elementos em “camadas” que possibilitam a sua superposição e operação entre elas. Os tipos de camadas mais comuns são o raster ou o vetorial. No primeiro, as informações são armazenadas em células regulares que representam um valor único da variável numa região do espaço. O tamanho da célula determina a precisão na representação de determinado espaço geográfico. No segundo, as informações são centradas na posição da localização dos elementos no espaço. As principais formas de representação de elementos reais no ambiente computacional são o ponto, a linha, o polígono, TIN (*Triangular Irregular Network*) e o raster.

Para o desenvolvimento de um modelo digital de elevação, o referencial mais popular utilizado em artigos e estudos nessa área é o SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* (FARR et al., 2007). Essa missão foi um projeto internacional, patrocinada pela agência nacional de inteligência geospacial (*National Geospatial-Intelligence Agency*) e pela agência espacial americana (NASA) em fevereiro de 2000. Durante os seus 11 dias de missão, foram coletados 12,3 Terabytes de dados cobrindo uma área de terra entre as latitudes 56S e 60N. Dois aparelhos InSAR foram utilizados: um radar de banda C fornecido pelo laboratório de propulsão à jato dos Estados Unidos e um radar de banda X fornecido pelas agências espaciais alemã e italiana.

Entretanto, existe um problema em comum em alguns tipos de satélites que prejudicam a utilização desse modelo digital de terreno do SRTM: como corrigir o erro associado à altura da vegetação. Atualmente existem radares capazes de atravessar a copa de árvores (dependendo do seu comprimento de onda), mas a maioria ainda não consegue analisar áreas de vegetação muito densa corretamente. Alguns exemplos dessa aplicação podem ser obtidos nos trabalhos de (BOURGINE; BAGHDADI, 2005; GALLANT; READ, 2016).

A correção desses erros precisa do conhecimento prévio da área a ser analisada sobre a altura da copa das árvores próximas ao rio e a profundidade de penetração do radar. Um dos primeiros mapas globais de altura de vegetação foi publicado em 2010 (LEFSKY, 2010) e, posteriormente, foi sucedido por um mapa mais preciso no ano seguinte (SIMARD et al., 2011). Anteriormente, em modelos hidráulicos e hidrodinâmicos o erro associado à altura da vegetação próxima ao rio tinha sido ignorado, com raras exceções em locais de vegetação extremamente densa, como é o caso da Amazônia.

Com isso, foi desenvolvido um novo modelo chamado “*Bare-Earth SRTM*” para que fosse possível eliminar esse erro e realizar, de maneira correta, a modelagem de rios em áreas com uma vegetação muito densa. Em algumas pesquisas (BAUGH et al., 2013) concluíram que a correção do SRTM para a região da bacia amazônica apresentou uma melhora na modelagem da extensão da inundação de valores entre 25% a 94%.

A partir desses conceitos, pode ser definido também um TIN, que é a representação de uma superfície baseada em triângulos irregulares gerados a partir de três pontos de dados observados em cada parte do mapa. Com esses dados tridimensionais é possível analisar a distribuição espacial de dados de maneira mais completa e intuitiva. Ele é composto por uma rede de pontos,

chamados de pontos de massa, com coordenadas tridimensionais ligadas por linhas retas que formam uma malha triangular.

Um TIN é baseado no esquema de triangulação “Delaunay”, que maximiza os ângulos dos triângulos forçando com que um conjunto discreto de pontos num plano esteja circunscrito em um triângulo desse esquema de triangulação. Esse esquema de triangulação é ideal para a construção de um TIN porque diminui a ocorrência de triângulos longos e finos, que não são desejados para análise do modelo digital de elevação.

3.8 CARACTERIZAÇÃO DA CIDADE DE MANAUS

A precipitação média anual, ao longo da série histórica, é aproximadamente 2220 mm e a densidade pluviométrica varia com um período de 6 meses. A partir da Figura 3-10 abaixo, observa-se que a estação chuvosa ocorre entre os meses de dezembro a maio e a estação de seca ocorre entre os meses de junho a novembro.

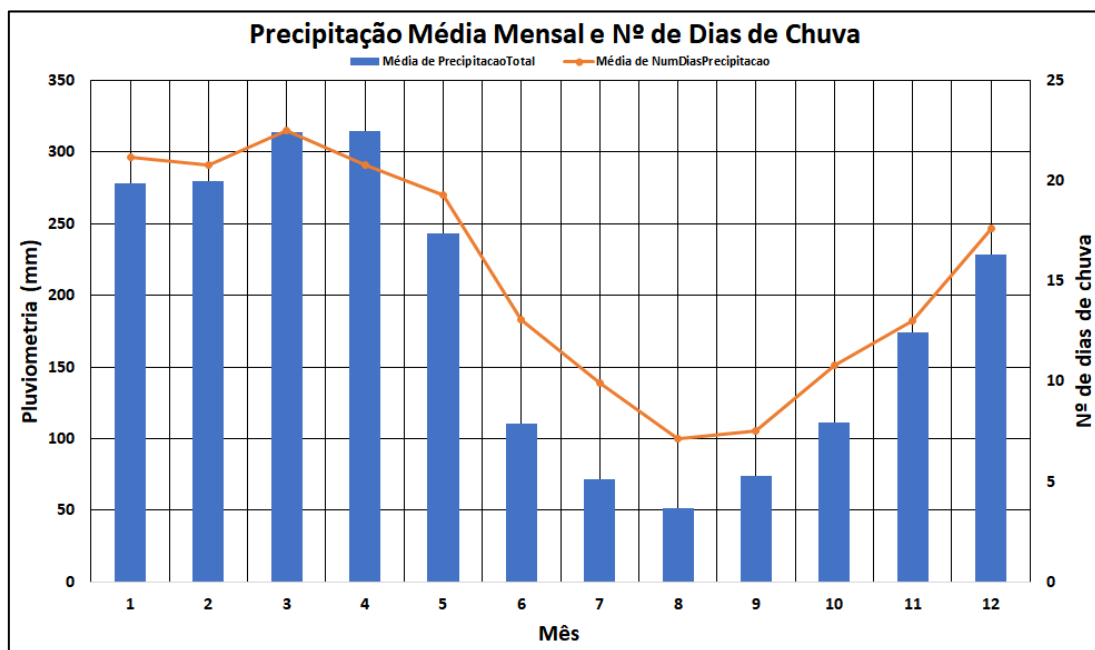


Figura 3-10 – Precipitação média por mês (azul) e Nº de dias de chuva (laranja).

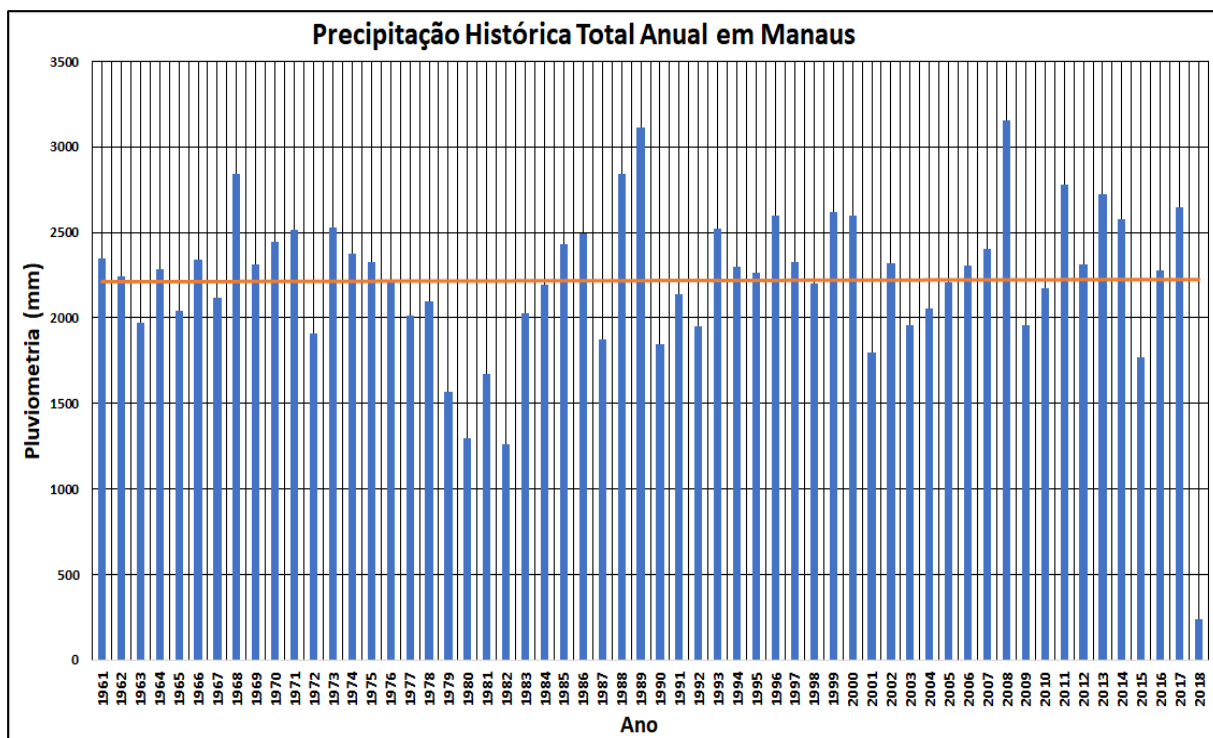


Figura 3-11 – Precipitação total por ano (azul) e média histórica de longo período (laranja).

As cheias do Rio Negro são fenômenos recorrentes durante a série histórica, com grandes variações de profundidade durante o ano. Alguns pontos obtidos a partir das cartas náuticas mostram regiões com profundidades superiores a 80 metros, com o ponto cotado mais profundo sendo igual a 99 metros. As inundações ocorrem principalmente devido às contribuições do Rio Solimões e dos afluentes do Negro em sua margem direita.

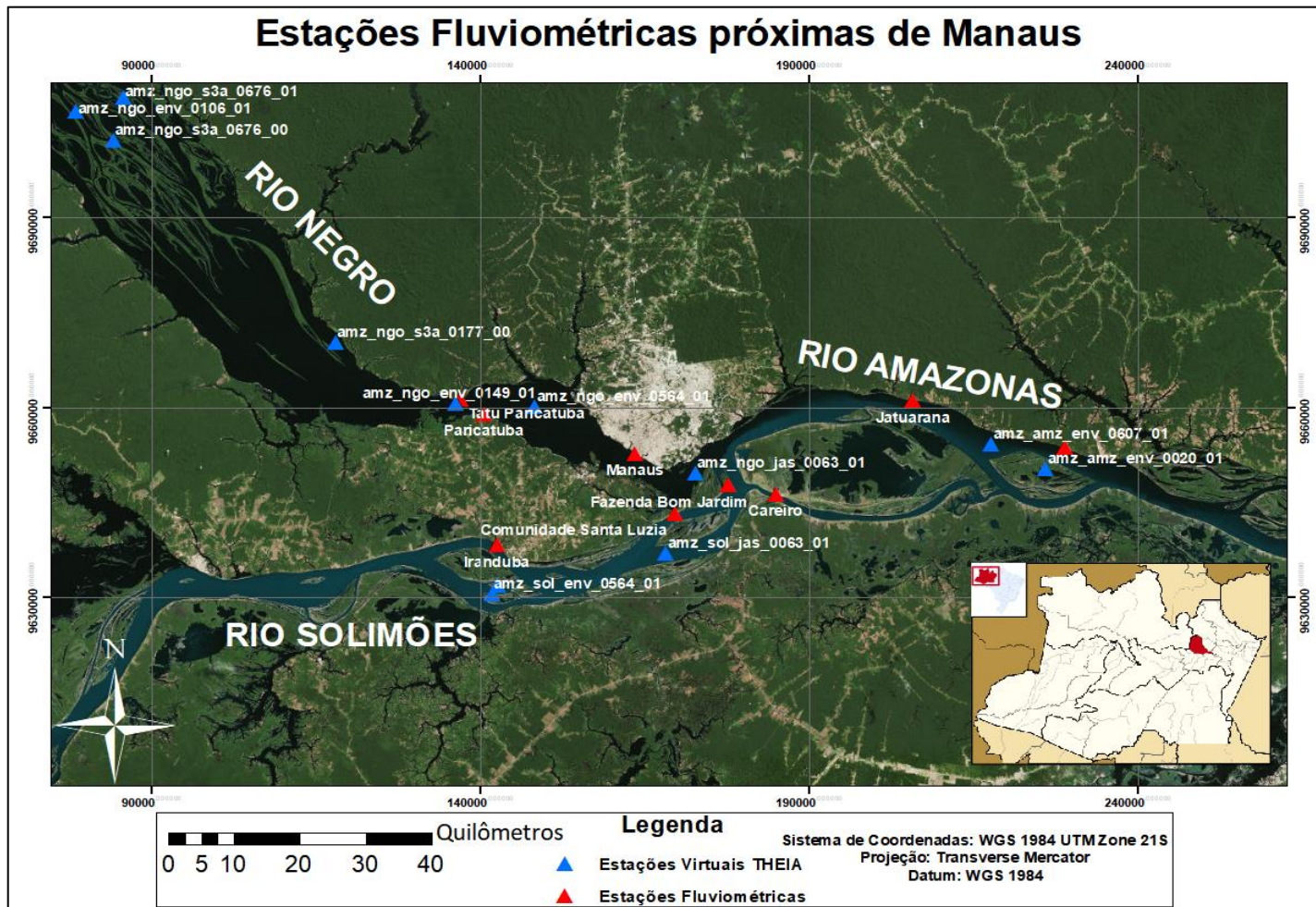


Figura 3-12 - Cidade de Manaus e encontro dos Rios Negro e Solimões. Fonte: (ESRI ArcMap Templates, 2018)

O principal problema decorrente dessas cheias ocorre nas áreas ribeirinhas da cidade, por conta da ocupação das margens dos igarapés e da orla ribeirinha do Rio Negro. Alguns exemplos de análises e dados de cheia podem ser obtidas a partir de (FILIZOLA et al., 2014; G1 AMAZONAS, 2017; SATYAMURTY et al., 2013; S.PAULO, 2013, 2018; VALE et al., 2011). Em 1999, a cheia atingiu a cota de 29,3 metros, atingindo cerca de 42 mil pessoas da orla do Rio Negro e dos igarapés centrais de Manaus. Essa cheia foi considerada a quinta maior da história desde o início da série de cotas da estação de Manaus, em 1903.

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM) realiza trabalhos acerca de eventos críticos através do Programa Recursos Hídricos Superficiais. Suas ações são divididas em três frentes principais: o monitoramento de redes hidrológicas, o sistema de alerta de eventos críticos (SACE) e estudos, levantamentos e cartografia hidrológica. O SACE realiza monitoramento em diversas bacias do país (Rio Amazonas, Rio Paraguai, Rio Doce, Rio Caí, Rio Madeira, entre outros), indicando em tempo real a situação das cotas dos rios próximas às principais cidades de cada bacia (cota normal, cota de atenção, cota de alerta e cota de inundação) (Portal CPRM, 2018).

Com relação à cidade de Manaus, o Serviço Geológico do Brasil realiza o alerta de cheias em Manaus desde 1989, com monitoramento anual dos rios Negro, Solimões e Amazonas. As cheias que ocorrem na região apresentam um longo tempo de percurso, devido ao grande tamanho da bacia hidrográfica e à pequena declividade dos seus principais corpos d'água. Devido à esses fatores de declividade e tamanho da bacia hidrográfica que ocorrem cheias de proporções potencialmente danosas com relativa recorrência na região (aproximadamente onze anos) (Portal CPRM, 2018).

Ainda no tocante dessa instituição, são realizados relatórios anuais das cheias e vazantes que afetam a cidade e emitidos alertas de cheia em conjunto com o corpo de bombeiros e a defesa civil do estado. Realiza-se também a composição e alimentação do Banco de Dados de Cheias, contendo: dados e períodos de ocorrência de eventos críticos, áreas frequentemente afetadas, registros fotográficos e gráficos, informações sobre perdas materiais e correlações sobre os fenômenos meteorológicos associados aos eventos extremos do Sistema do Rio Negro e do Rio Solimões.

4. METODOLOGIA

4.1 ANÁLISE DOS DADOS EM AMBIENTE GIS

O primeiro passo da metodologia do trabalho foi a aquisição de dados hidráulicos para determinação das variáveis de entrada da modelagem hidráulica. Os dados de nível dos rios, vazão, resumo de descarga e perfil transversal foram obtidos no site da ANA (HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas, 2018). Os dados estão disponíveis em diferentes períodos para cada uma das estações na região de estudo (desde Novo Airão – código ANA 14900050 até Itacoatiara – código ANA 16030000), porém foram compilados e comparados para que uma análise possa ser feita em um mesmo intervalo de tempo (no mesmo dia ou com poucos dias de diferença) para as estações utilizadas.

Foram utilizados dados altimétricos de satélite fornecidos pela Universidade de Bristol (PAIVA; O'LOUGHLIN, 2015) e dados batimétricos do rio disponíveis no site da diretoria de hidrografia e navegação (DHN) da marinha do Brasil. A parte de modelagem hidráulica dos dados foi feita com auxílio do software *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System* (HEC-RAS) desenvolvido pela instituição americana *United States Army Corps of Engineers* (USACE). Esse software foi escolhido por ser utilizado e referenciado por empresas reconhecidas internacionalmente e principais órgãos governamentais ligado à gestão de recursos hídricos no país. O software permite ao usuário realizar simulações de escoamentos permanentes unidimensionais, escoamentos transientes uni e bidimensionais, transporte de sedimentos e análise de qualidade/temperatura da água (adaptado de HEC-USACE, 2018).

Os dados do site HIDROWEB foram exportados em formato de texto (os arquivos estão disponíveis no site em formato de planilha Excel, texto ou Access) e, posteriormente, organizados em planilha Excel para comparação.

Os dados obtidos foram compilados e organizados em tabelas e gráficos para avaliação de seus períodos, suas falhas, comparação entre estações e estatísticas relevantes. Foram feitas comparações dos dados de nível das estações disponibilizadas pela ANA com os dados de nível fornecidos pelo serviço de observação dos controles geodinâmico, hidrológico e biogeoquímico da erosão/alteração e dos transportes de materiais nas bacias dos rios Amazonas, Orinoco e Congo (HYBAM, 2018). Esse serviço de observação opera desde 2003, atendendo à uma licitação do Ministério do Ensino Superior e da Pesquisa francês para que fossem criados e

disponibilizados à comunidade científica dados de qualidade para a compreensão e modelagem dos processos hidrológicos e sua dinâmica em longo prazo nas regiões de interesse.

Dados de nível dos rios foram também obtidos através do centro Francês de serviço de dados denominado “THEIA”. Esse serviço está oferecendo às comunidades científicas e agentes de políticas públicas uma ampla gama de imagens em diferentes escalas, métodos e serviços. Uma subdivisão desse serviço, o Centro de Competências Científicas “Níveis de Água de Lagos e Rios”, reúne equipes que desenvolvem o “HYDROWEB”, um centro de dados para séries temporais de longa duração dos níveis dos grandes lagos, reservatórios e os 20 maiores rios do mundo (Theia - Land Data Centre, 2018).

Atualmente, a plataforma “HYDROWEB” fornece apoio ao monitoramento operacional de 64 lagos, dos quais 60 são monitorados por mais de 25 anos, e pesquisas em 91 lagos, com base em dados contínuos ao longo de mais de 15 anos. Os dados provêm de produtos altimétricos das missões Jason 2, Saral/Altika e, posteriormente, para as missões Sentinel 3A/3B, Jason 3, Jason-CS e SWOT.

Para os dados referentes no presente trabalho, foram consideradas as estações da ANA localizadas nos arredores de Manaus (nos rios Negro, Solimões e Amazonas) e suas variações de altitudes ortométricas foram obtidas a partir da tese de Moreira (2016), realizada na COPPE/RJ. Os valores obtidos no trabalho para a altitude ortométrica dos zeros fixos de cada uma das régua de nível de cada estação foram acrescentados (lembrando que os valores dos zeros fixos podem ser negativos) aos valores de nível disponibilizados pela ANA. Os dados da tese de (MOREIRA, 2016) e da ANA estão georreferenciados com relação ao modelo de geoide EGM2008.

Os dados de batimetria do canal foram obtidos a partir de cartas náuticas, retiradas do site da Diretoria de Hidrografia e Navegação (Diretoria de Hidrografia e Navegação | DHN, 2018). Foram utilizadas três cartas náuticas em escala 1:100.000, uma carta em escala 1:30.000 e três outras cartas em escala 1:7.500.

As cartas em escala 1:100.000 estão referenciadas a partir do datum WGS-84 sobre a projeção de Mercator com relação ao seu vértice inferior esquerdo. Suas profundidades estão em metros, reduzidas ao nível acima do qual o Rio Amazonas permanece por, aproximadamente, 90% do tempo. A carta 4032, que vai da Ilha das Onças a Manaus, possui seu vértice inferior esquerdo na coordenada 03° 22' 48" S e 60° 03' 00" W. A carta 4031, que vai de Novo Remanso a Ilha das Onças, possui seu vértice inferior esquerdo na coordenada 03°

22' 48" S e 59° 32' 24" W. A carta 4030, que vai de Itacoatiara a Novo Remanso, possui seu vértice inferior esquerdo na coordenada 03° 27' 00" S e 59° 02' 36" W.

A carta em escala 1:30.000 sobrepõe parcialmente a carta 4032 e, por essa razão, é chamada de 4032A e representa os dados batimétricos do Porto de Manaus. Seu vértice inferior esquerdo está localizado na coordenada 03° 13' 00" S e 60° 07' 30" W. Dentro da carta 4032A, existem as 3 cartas em escala 1:7.500 que são chamadas de “Planos” A, B e C. O plano A representa os dados batimétricos do Porto de Manaus propriamente dito, o plano B, do Porto de Chibatão e o plano C, do Terminal da Reman.

Todas as cartas obtidas acima possuem dados de batimetria em forma de pontos cotados e curvas de nível, sendo os pontos cotados medidos em metros com precisão de uma casa decimal. Vale ressaltar também que a densidade de pontos cotados diminui das cartas menos abrangentes (escala 1:7.500) para as mais abrangentes (escala 1:100.000). A seguir são mostradas imagens das cartas com e sem a digitalização manual.

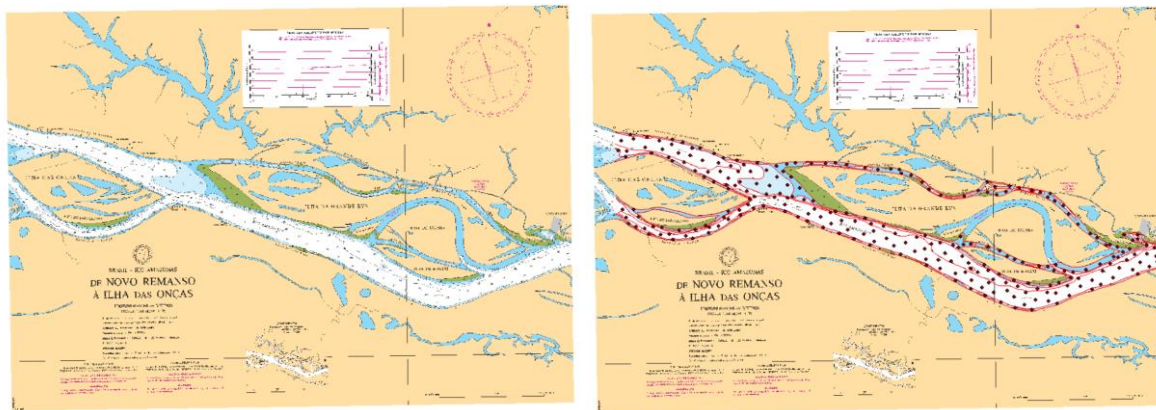


Figura 4-1 – Carta náutica de Novo Remanso à Ilha das Onças antes e depois da digitalização manual. Fonte: (Diretoria de Hidrografia e Navegação | DHN, 2018)

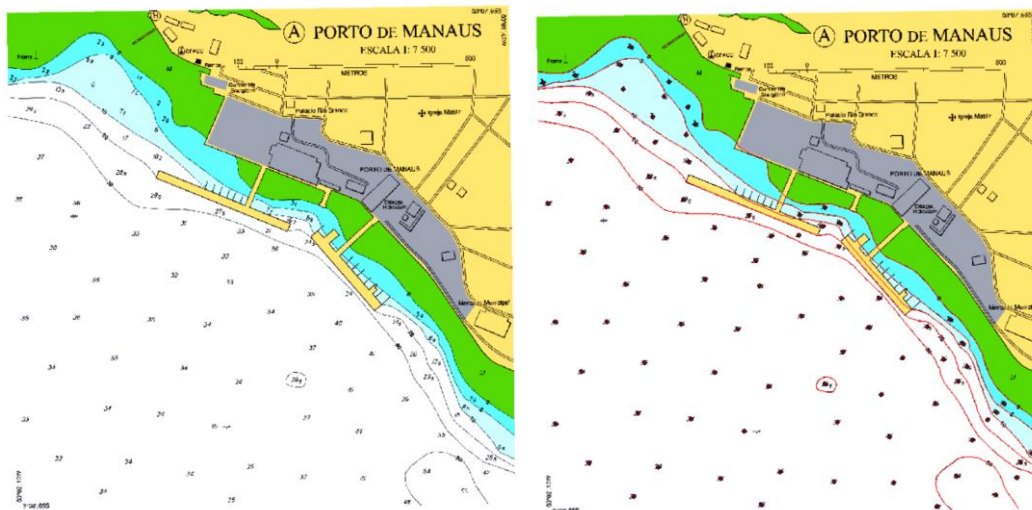


Figura 4-2 – Carta Náutica do Porto de Manaus (Plano A) antes e depois da digitalização manual. Fonte: (Diretoria de Hidrografia e Navegação | DHN, 2018)

Os dados de topografia da área ao redor foram obtidos através do SRTM “BEST” (PAIVA; O’LOUGHLIN, 2015). Esse modelo digital de elevação derivado do SRTM é dividido em uma grade de cinco por cinco graus, com 72 colunas e 24 linhas. A numeração dessas colunas está de acordo com a convenção original do SRTM.

Inicialmente, foram obtidos os níveis de redução (relativos aos zeros da régua) e foram realizadas suas correções por meio de três níveis diferentes de redução: um para a carta da cidade de Manaus com o nível da régua de mesmo nome, um para a carta de Itacoatiara com a estação fluviométrica de Itacoatiara e um intermediária (calculado por meio da média entre os outros dois) para a carta de Novo Remanso. Essa correção é necessária porque os dados não se encontram referenciados de acordo com o geóide, mas a um elipsoide de referência com dimensões específicas. Os dados topográficos da área foram então combinados com os dados de batimetria por meio da criação de um TIN. O TIN criado serviu de base para os cálculos referentes à geometria e propriedades hidráulicas do canal no HEC-RAS.

Com isso, utilizou-se então a ferramenta HEC-GeoRAS para a construção das seções transversais, talvegue do rio, áreas inefetivas e outras possíveis estruturas que poderiam ser representadas no próprio ambiente SIG e são necessárias para realizar modelagens hidráulicas no HEC-RAS. As elevações desses elementos são derivadas a partir de um modelo digital de terreno pré-existente, nesse caso, o TIN criado anteriormente. Os elementos geométricos construídos são mostrados na figura a seguir:

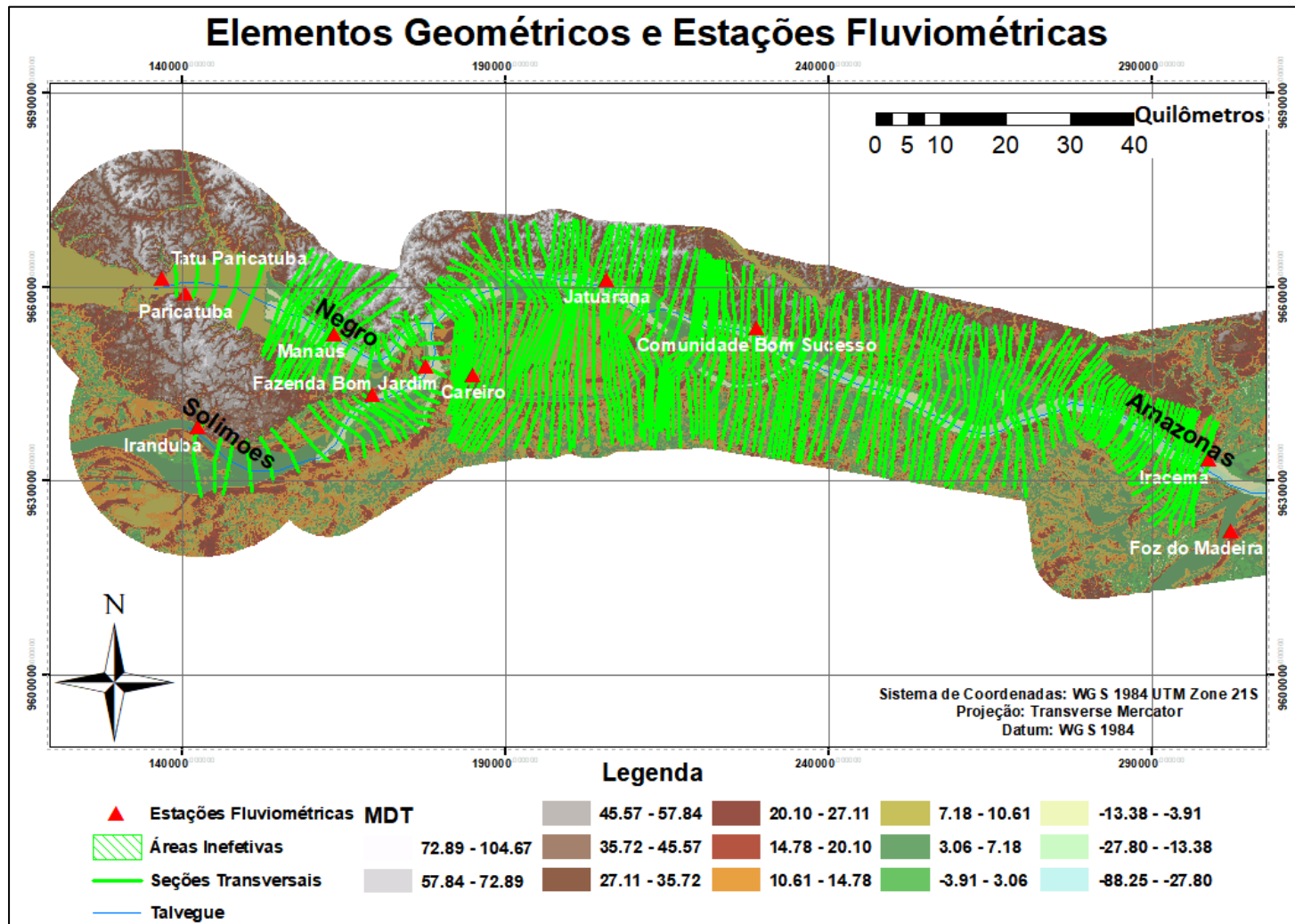


Figura 4-3 – Mapa da área de encontro entre os rios com os seus elementos geométricos digitalizados

As camadas necessárias para o cômputo do escoamento no HEC-RAS são o talvegue do rio e as suas seções transversais. Algumas camadas opcionais podem ser utilizadas como linhas de fluxo, uso do solo, alinhamento de diques, áreas inefetivas, estruturas de bloqueio e áreas de armazenamento. Camadas de estruturas hidráulicas podem também ser criadas como, por exemplo, pontes, bueiros, estruturas em linha e laterais.

O talvegue do rio foi construído por meio da união, na medida do possível, dos pontos mais profundos da superfície TIN, podendo também ser definido pela união dos pontos de centroide imaginário da área molhada das seções de um rio. Seu comprimento foi medido para o posicionamento correto das seções transversais com relação ao canal e cálculo de suas distâncias.

As seções transversais devem abranger toda a área que o rio pode chegar a atingir, sendo recomendado que se estenda por toda a planície de inundação máxima da área. Seu desenho deve ser da margem esquerda para a direita, olhando para jusante. As seções devem ser as mais perpendiculares possível com relação à direção do escoamento, tanto no talvegue quanto na planície de inundação, podendo variar de direção fora da calha do rio para que englobe áreas de interesse.

As áreas inefetivas foram desenhadas para indicar áreas em que não há fluxo corrente de água, considerando inicialmente o escoamento permanente do canal. Sua localização foi determinada também pela superfície TIN e posteriormente foi feita uma melhora dos dados no próprio HEC-RAS.

4.2 CONDIÇÃO DE CONTORNO MONTANTE: RIO NEGRO

No que diz respeito a modelagem nos trechos de rio do estudo, duas frentes podem ser distinguidas: uma que busca melhor representação da propagação da vazão ao longo dos canais e das planícies de inundação e outra que busca a utilização de dados de satélite como forma de preenchimentos das lacunas relacionadas às informações de entrada desses modelos.

A utilização de uma curva-chave numa seção qualquer está amparada nas premissas de que o escoamento seja permanente e uniforme, de forma que seja observada uma relação biunívoca entre cota e vazão. Isso não ocorre em Manaus devido à clara presença de um remanso hidráulico variável causado por alterações das condições a jusante.

Dessa forma, a utilização de medições diretas de vazão se torna necessária para a análise do fenômeno que ocorre nas proximidades de Manaus. As medições de vazão no rio Negro foram realizadas no âmbito de dois projetos institucionais do Serviço Geológico do Brasil (CPRM): o “Sistema de Alerta Hidrológico” e o “Dinâmica Fluvial do Sistema Negro-Solimões-Amazonas” (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2014). Foram utilizados Perfiladores Doppler Acústicos (ADCP) de 300 e 600 kHz, acoplados a embarcações de grande porte e Sistemas de Posicionamento Global (GPS), no período de 2009 a 2018.

Alguns métodos podem ser aplicados nesse caso, sendo o método “SFD” (em inglês *stage-fall-discharge*) o mais comumente utilizado. Esses métodos são inspirados no método de HALL (1916), que a partir da Equação de Manning, propôs que a vazão ‘real’, considerando o efeito do remanso, seja calculada proporcionalmente a uma ‘vazão de referência’ multiplicada pela raiz quadrada da taxa entre a declividade ‘real’ e a declividade ‘normal’ da linha de energia (PETERSEN-ØVERLEIR; REITAN, 2009).

A aplicação do método está amparada na utilização da equação de Manning para o cálculo dos dados de vazão na estação de base. Para que a aplicação dessa equação possa ser utilizada no método SFD, é necessário que cada um dos parâmetros geométricos do canal (área molhada e raio hidráulico) sejam obtidos em função da cota na estação de base (ALVES, 2018; RONCHAIL et al., 2005).

Essa consideração de linearidade entre os parâmetros geométricos do canal é limitada nos casos de canais naturais, devido à sua forma irregular. A variabilidade do coeficiente de Manning também é um fator limitante na aplicação dessa fórmula visto que, contrariando a sua proposição original, ele não é constante ao longo de toda a seção transversal devido a diferentes tipos de materiais (vegetação e solo) que alteram a rugosidade do canal de acordo com o nível d’água no momento (DINGMAN, 2009; LE COZ et al., 2014).

Para o presente trabalho, foi estimada a declividade da linha de energia como a declividade da linha d’água, assumindo que a variação da carga cinética seja desprezível no trecho (MANSANAREZ et al., 2016). Essa declividade foi calculada como sendo a diferença de nível entre a estação de Manaus e as estações virtuais (obtidas pelo site THEIA) amz_ngo_env_0106_01 e amz_ngo_env_0564_01, localizadas a distância de 106,01 km e 17,07 km a montante, respectivamente, dividida pela distância entre as respectivas estações. As cotas linimétricas em Manaus foram corrigidas para o datum dessa estação (MOREIRA, 2016).

As relações entre o Raio hidráulico (elevado à potência $2/3$) e o Nível (m) e entre Área Molhada (m^2) e o Nível (m) podem ser obtidas através do próprio software HEC-RAS após a modelagem e cômputo do projeto.

A partir das relações obtidas para a área, raio hidráulico, declividade e coeficiente de rugosidade, foram gerados dados de vazão aplicando-se a Equação de Manning à série de dados de nível e declividades obtidos.

Com todas as variáveis da equação de Manning conhecidas, obteve-se o coeficiente de rugosidade de Manning (n) para cada uma das vazões medidas em Manaus e foi estabelecida uma relação entre n e o nível d'água nessa seção.

4.3 CONDIÇÃO DE CONTORNO MONTANTE: RIO SOLIMÕES

Para análise estatística dos dados, foram calculados os valores de vazão máximos anuais referentes ao rio Solimões. Esses valores foram obtidos a partir de vazões de descarga mensais medidas pela ANA.

A série do rio Solimões possui dados de vazões de cheia para 43 anos, com apenas duas vazões baixas nos anos de 1990 e 1995, que foram retiradas da análise por não representarem vazões máximas em seus respectivos anos (foram realizadas poucas medições mensais e nenhuma delas ocorreu em períodos de vazões altas).

As vazões máximas anuais medidas nesse rio se encontram na faixa de $115.218 \text{ m}^3/\text{s}$ a $173.382 \text{ m}^3/\text{s}$. Os valores máximos de vazões ocorrem, principalmente, entre os meses de maio a agosto.

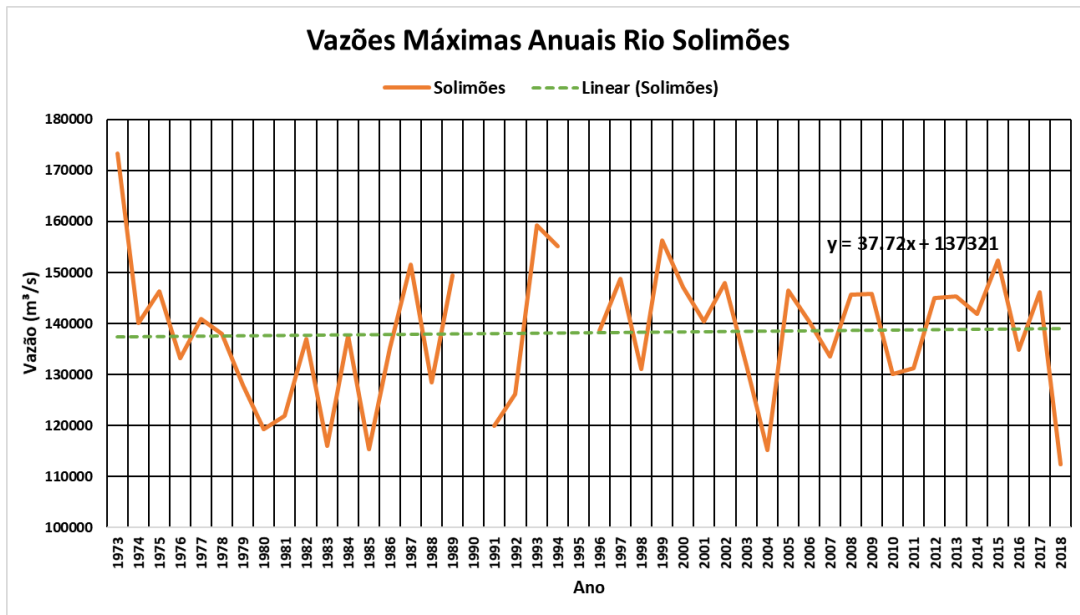


Figura 4-4 – Série histórica de vazões máximas anuais na estação fluviométrica Manacapuru

Na Figura 4-5 a seguir encontra-se um sumário das diferentes fórmulas para a posição de plotagem, indicando também as principais motivações de sua proposição.

Denominação	Fórmula	a	Motivação
Weibull	$q_i = \frac{i}{N+1}$	0	Probabilidades de superação não-enviesadas para todas as distribuições.
Blom	$q_i = \frac{i-3/8}{N+1/4}$	0,375	Quantis não-enviesados para a distribuição Normal.
Cunnane	$q_i = \frac{i-0,40}{N+0,2}$	0,40	Quantis aproximadamente não-enviesados para quase todas as distribuições.
Gringorten	$q_i = \frac{i-0,44}{N+0,12}$	0,44	Otimizada para a distribuição de Gumbel.

Figura 4-5 – Fórmulas para o cálculo da posição de plotagem q_i (Fonte: adaptada de tabela original de Stedinger et. al (1993))

Foi feita uma curva de quantis de excedência e tempo de retorno para as vazões segundo a função de probabilidade acumulada de Gumbel com posição de plotagem determinada a partir da equação de Gringorten. Com o aumento de dados durante os anos, poderá ser feita uma melhor estimativa e análise dos tempos de retorno mais altos. Entretanto, a Equação 4.1 abaixo permite obter o valor do quantil que corresponda a um tempo de retorno específico.

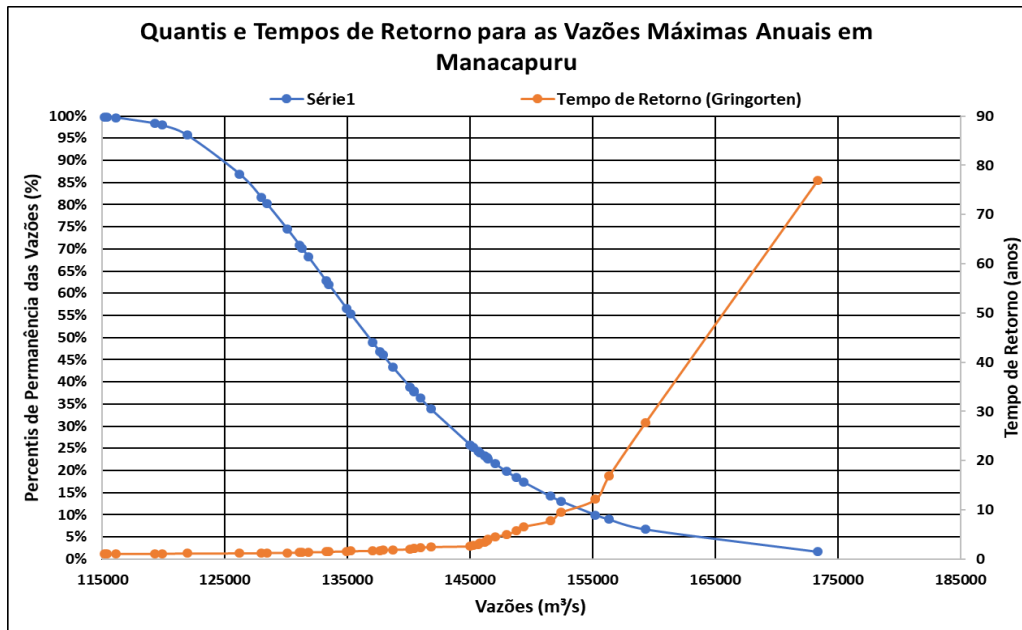


Figura 4-6 – Curva de excedência e tempos de retorno para a série de vazões em Manacapuru

$$Y = \bar{x} - \sigma \times \left(0,45 + 0,7797 \times \left(\ln \left(\ln \frac{T_R}{T_R - 1} \right) \right) \right) \quad (4.1)$$

Sendo: Y o valor do evento, \bar{x} é a média da amostra de valores, σ é o desvio padrão da amostra e T_R é o tempo de retorno do evento em anos.

A análise do ajuste da distribuição de Gumbel aos dados foi feita pelo método dos momentos (MOM). Esse ajuste é feito por meio da estimativa dos parâmetros α e β , que são definidos a partir da média e desvio-padrão amostral segundo as Equações 4.2 e 4.3 a seguir:

$$\hat{\alpha} = 0,7797 \times \sigma \quad (4.2)$$

$$\hat{\beta} = \bar{x} - 0,45 \times \sigma \quad (4.3)$$

4.4 CONDIÇÃO DE CONTORNO JUSANTE: RIO AMAZONAS

Inicialmente, para a condição de contorno de jusante, foi proposta a utilização da estação Jatuarana (código ANA 15030000). Essa estação encontra-se a 110 quilômetros da confluência do rio Madeira com o rio Amazonas. Os resultados preliminares mostraram que a sensibilidade dessa condição nessa posição específica evidenciou a necessidade de que a condição de contorno fosse alterada para uma estação mais a jusante no rio. A estação escolhida foi Iracema (código ANA 15042200), que está a 100 quilômetros de distância da confluência.

Essa estação possui apenas dados de nível desde 2014. Para contornar o problema e permitir uma análise mais acurada do modelo, foram compilados eventos de vazão dos rios

Negro e Solimões em dias próximos que pudessem ser utilizados para construção de uma curva-chave para a estação de Iracema. A vazão do Rio Amazonas na estação foi considerada como a soma das vazões dos rios Solimões e Negro, devido a inexistência de grandes derivações ou entradas de vazões no trecho entre a confluência e a estação.

Foi desenvolvido um código em R para comparação de datas nos rios Negro e Solimões com a data de coletas diárias em Iracema de forma que o intervalo entre as medições fosse menor do que 10 dias. O código compara as datas disponíveis de nível na estação de Iracema com as datas de vazão de resumo de descarga nas estações Manacapuru e Tatu Paricatuba durante o período disponível coincidente entre elas (2014 – 2017).

A utilização de uma curva-chave numa seção qualquer está amparada nas premissas de que o escoamento seja permanente e uniforme, de forma que seja observada uma relação biunívoca entre cota e vazão. A proposta dessa curva-chave para a estação busca a representação desse nível em função da vazão de montante.

Usando um método similar, foi feita uma nova curva-chave utilizando dados de vazão dos rios Negro e Solimões que, somadas, fornecem a vazão do rio Amazonas e os níveis da estação virtual amz_amz_jas_0152_01. Os resultados obtidos são mostrados no item 5.5.

4.5 EXECUÇÃO AUTOMÁTICA DO MODELO NO HEC-RAS

Para a execução automática do modelo, foram compilados eventos que apresentavam datas mais próximas entre as estações de Iracema, Manacapuru e Tatu Paricatuba, durante os anos de dados disponíveis de 2014, 2015 e 2016.

Os dados de nível utilizados (condição de contorno de jusante) correspondem à estação Iracema e os dados de vazão das outras duas estações correspondem aos resumos de descarga obtidos pelo site HIDROWEB da ANA. Cabe ressaltar aqui que a frequência de medições de vazão no rio Solimões e, principalmente, no rio Negro é baixa (menos de uma medição por mês no Negro e em alguns anos com apenas 3 medições), dificultando a ocorrência concomitante de dados de vazão e nível nas estações.

Foram selecionados então eventos com vazões disponíveis em ambos os rios para as estações Manacapuru e Tatu Paricatuba e os dados de níveis para Iracema. A diferença máxima de dias considerada foi de 3 dias para as três estações. No total, foram obtidos 10 eventos entre os anos de 2015 e 2016, em períodos de vazões altas e baixas. Na Tabela 4-1 a seguir estão

representados os eventos de cheia do rio com seus respectivos valores de vazão para cada trecho dos rios Negro, Solimões e Amazonas.

Tabela 4-1 – Valores de vazão e nível das condições de contorno do modelo

Eventos/Perfil	Nível Amazonas (m)	Vazão Solimões (m ³ /s)	Vazão Negro (m ³ /s)
Maio/2015	20,98	150.296,00	37.849,00
Junho/2015	21,28	152.425,00	44.786,37
Julho/2015	20,81	149.551,10	47.201,00
Maio/2016	18,15	134.918,00	33.524,67

A partir dos dados de nível de cinco estações fluviométricas (Jatuarana, Comunidade Bom Sucesso, Careiro, Manaus e Iranduba) e uma estação virtual (JA2152EVA) foi feita a calibração do n de Manning do canal do modelo por meio de um código usando o VBA (*Visual Basic Application*) que preenche planilhas com os dados de saída de cada perfil, rio e trecho no Excel e recalcula o modelo alterando-se o valor de n de Manning do canal e da planície de inundação para que se atinja o melhor valor possível usando-se a métrica estatística RMSE (*Root-Mean-Square Error*).

O desenvolvimento desse código foi feito com base, principalmente, no livro de Christopher Goodell (GOODELL, 2014) que explica como funciona os principais objetos e funções que permitem a exportação e alteração de dados de geometria do HEC-RAS no Excel. O livro conta com algumas planilhas “modelo” que foram adaptadas para o presente trabalho e alguns desenvolvimentos foram feitos por meio de funções do próprio VBA.

Foram feitas simulações no modelo com uma faixa de valores de n de Manning entre 0,02 e 0,04 para o canal e 0,04 e 0,08 para a planície de inundação. Ambos os intervalos foram divididos igualmente em 6 subintervalos (de 0,004 em 0,004 para o canal e 0,008 em 0,008 para a planície) e cada perfil foi recalculado de jusante para montante (Amazonas, Careiro, Negro e Solimões, respectivamente) com as combinações de n de Manning entre o canal e a planície, totalizando 36 simulações por perfil.

A partir dessas combinações predeterminadas, foi possível observar as faixas de valores por meio do cálculo da métrica raiz do erro quadrático médio comparando os níveis d'água calculados e observados em 6 pontos dos 3 rios (3 no Amazonas, 1 no Careiro, 1 no Negro e 1 no Solimões). Os valores de n de Manning do canal para cada trecho foram estimados a partir

das menores raízes do erro quadrático médio e, posteriormente utilizados em uma nova rotina de cálculo que usa um método de Monte Carlo baseado na distribuição normal dos valores de n de Manning a partir de uma média e um desvio padrão. Essa média inicial foi estimada a partir da primeira rotina de cálculo (com combinações predeterminadas do n de Manning) e de trabalhos anteriores (ALVES, 2018). Adotou-se um desvio padrão inicial fixo de 0,005, de forma que, aproximadamente, 95% dos valores de n de Manning são esperados entre um intervalo de +0,01 e -0,01 em relação ao valor médio. Essa abordagem inicial serviu para que novos valores da média e desvio padrão fossem obtidos de forma a minimizar o valor da métrica RMSE. Os valores considerados para o n de Manning de cada canal e planície são mostrados na tabela 4-2 a seguir.

Tabela 4-2 – Valores iniciais de n de Manning (canal e planície) para execução automática pelo método de Monte Carlo

Rio	Canal (média)	Canal (desvio padrão)	Planície
Negro	0,030	0,005	0,06
Solimões	0,045	0,005	0,06
Amazonas	0,035	0,005	0,06

Nessa segunda rotina, foram feitas 100 iterações com valores aleatórios do n de Manning de acordo com uma distribuição normal de média μ e desvio padrão σ . Esse número pode ser alterado, de forma que a média dos valores aleatórios gerados pelo programa resulte em um valor da raiz quadrada do erro médio menor para cada rio. Os valores da raiz quadrada do erro médio foram então recalculados e obteve-se um novo valor calibrado para o n de Manning médio do canal. Esse processo foi repetido até que os valores da métrica raiz do erro quadrático médio ficassem abaixo de 50 cm para todos os perfis calculados.

Esse código pode ser utilizado com qualquer projeto com geometria e dados de entrada do HEC-RAS que se tenha disponível, bastando que o usuário faça algumas alterações quanto à localização das fórmulas e organização dos dados na planilha.

Vale ressaltar também que a calibração manual do n de Manning é um processo extremamente complexo e trabalhoso que pode gerar imprecisões principalmente para rios com seções transversais complexas e de grande extensão como as de Manaus, que apresentam diferentes elementos de diferentes rugosidades de acordo com o nível d'água. Por isso, o desenvolvimento desse código que permite a automatização da execução do modelo no HEC-

RAS foi de extrema importância para a conclusão do trabalho e pode ser explorado futuramente para melhor adaptação a outros problemas e situações. Os códigos encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

4.6 PÓS-PROCESSAMENTO NO ARC-GIS

Assim que o arquivo é aberto no HEC-RAS, sua modificação pode ser feita para aprimorar resultados (como valores do n de Manning, distância à jusante entre seções transversais, coeficiente de contração e expansão, adição de estruturas hidráulicas ao longo do canal e camada de gelo) e edição de elementos importados (seções transversais, pontos e junções, áreas inefetivas e o próprio canal).

Com a automação desse processo do HEC-RAS, foi possível a construção de tabelas e gráficos que permitem uma melhor interpretação dos resultados do HEC-RAS e comparação entre diferentes planos e geometrias de maneira mais simples e rápida.

Obtida uma geometria aprimorada do canal (n de Manning e áreas inefetivas), foi feita sua exportação de volta para o ambiente SIG para que possa ser gerada e analisada a planície de inundação. Ela poderia ser gerada no próprio software do HEC-RAS por meio da ferramenta recentemente implementada denominada *RAS Mapper*, porém devido à facilidade já existente com o HEC-GeoRAS, ele foi utilizado. O HEC-GeoRAS facilita o processo de criação de planícies de inundação (*RAS Mapping*) construindo o mapa da planície de inundação com considerações como o mapeamento da altura d'água em diferentes localizações.

Com todos os elementos criados, pode ser feito o mapa de inundação. Ele é criado utilizando os valores de altura d'água computados entre as seções transversais e é limitado pela camada criada anteriormente chamada polígono limitante (*Bounding Polygon*). As manchas de inundação criadas foram montadas com um zoom na área de interesse (proximidades da cidade de Manaus) de forma que se diferenciasse as áreas inundadas por cada perfil computado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISE PRELIMINAR DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS E VIRTUAIS

Os dados baixados do site da ANA, HYBAM e THEIA foram compilados e verificados com relação aos períodos disponíveis em cada estação para cada variável de interesse no trabalho. As Tabelas 5-1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a 5-3 a seguir mostram o período disponível desses dados para cada estação fluviométrica e virtual, respectivamente. Os dados destacados em vermelho representam períodos de falha (falta de dados consistentes) de acordo com sua natureza (nível, vazão ou resumo de descarga).

Tabela 5-1 – Datas com dados disponíveis para as estações fluviométricas da ANA. Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2018)

Estação-Código	Nível	Vazão	Descarga
Novo Airão-14900050	12/2014-10/2016	-	-
Fazenda Bom Jardim-14200000	01/2008-02/2009	-	-
Comunidade Santa Luzia-14201000	10/2014-02/2015	-	-
Manaus-14990000	09/1902-04/2014	-	04/2008-06/2018 04/2014-01/2018
Jatuarana-15030000	08/1997-12/2017 05/2016-11/2016	08/1977-12/2017	10/1977-10/2016 03/1998-11/2005
Careiro-15040000	08/1977-12/2016	01/2006-12/2016	08/1977-10/2016 02/2002-10/2016
Tatu Paricatuba-14911000	10/2014-05/2018 05/2016-11/2016	-	01/2014-02/2017
Paricatuba-14910000	-	-	03/1995-07/2011 01/1996-09/2007
Irاندuba-14101000	10/2014-05/2018	-	-
Iracema-15042200	11/2014-05/2018	-	-
Foz do Madeira-15901000	-	-	01/2014-05/2018 02/2017-05/2018
Itacoatiara-16030000	11/1927-01/2017	02/2016-02/2018	03/2008-06/2018
Comunidade Bom Sucesso- 15031000	11/2014-05/2018	-	-
Manacapuru-14100000	01/1972-05/2015	01/1972-05/2018	05/1973-10/2017 1998,1990 e 1995

Tabela 5-2 – Datas com os dados de nível disponíveis em estações virtuais. Fonte: (Theia - Land Data Centre, 2018)

Estação	Rio	Satélite	Início da Série	Fim da Série
Amz_ngo_env_0106_01	Negro	EGM08	04/10/2002	17/09/2010
Amz_ngo_env_0149_01	Negro	EGM08	10/11/2002	19/09/2010
Amz_ngo_env_0564_01	Negro	EGM08	20/10/2002	03/10/2010
Amz_ngo_jas_0063_01	Negro	EGM08	14/07/2008	28/09/2018
Amz_ngo_s3a_0177_00	Negro	EGM08	05/07/2016	23/09/2018
Amz_ngo_s3a_0676_00	Negro	EGM08	25/06/2016	23/09/2018
Amz_ngo_s3a_0676_01	Negro	EGM08	25/06/2016	23/09/2018
Amz_sol_env_0149_01	Solimões	EGM08	15/12/2002	19/09/2010
Amz_sol_env_0564_01	Solimões	EGM08	20/10/2002	03/10/2010
Amz_sol_jas_0063_01	Solimões	EGM08	14/07/2008	28/09/2018
Amz_mad_env_0478_01	Madeira	EGM08	17/10/2002	30/09/2010
Amz_amz_env_0020_01	Amazonas	EGM08	10/12/2002	14/09/2010
Amz_amz_env_0063_01	Amazonas	EGM08	03/10/2002	16/09/2010
Amz_amz_env_0478_02	Amazonas	EGM08	17/10/2002	30/09/2010
Amz_amz_env_0521_01	Amazonas	EGM08	19/10/2002	02/10/2010
Amz_amz_env_0607_01	Amazonas	EGM08	22/10/2002	05/10/2010
Amz_amz_jas_0152_01	Amazonas	EGM08	17/07/2008	02/10/2018

Tabela 3-3 – Datas com os dados de nível disponíveis em estações virtuais. Fonte: (HYBAM, 2018)

Estação	Rio	Satélite	Início da Série	Fim da Série
ENV564Parica	Negro	EGM08	23/11/2002	24/07/2010
ENV564JuMana	Solimões	EGM08	23/11/2002	03/08/2010
ENV149StaLuz	Solimões	EGM08	18/01/2003	20/07/2010
JA2063Encont	Solimões	EGM08	14/07/2008	11/04/2017
ENV020JuJatu	Amazonas	EGM08	13/01/2003	15/07/2010
JA2152Eva	Amazonas	EGM08	17/07/2008	28/09/2016

A Figura 5-1 a seguir mostra a localização das estações na região do encontro entre o rio Negro e o Solimões.

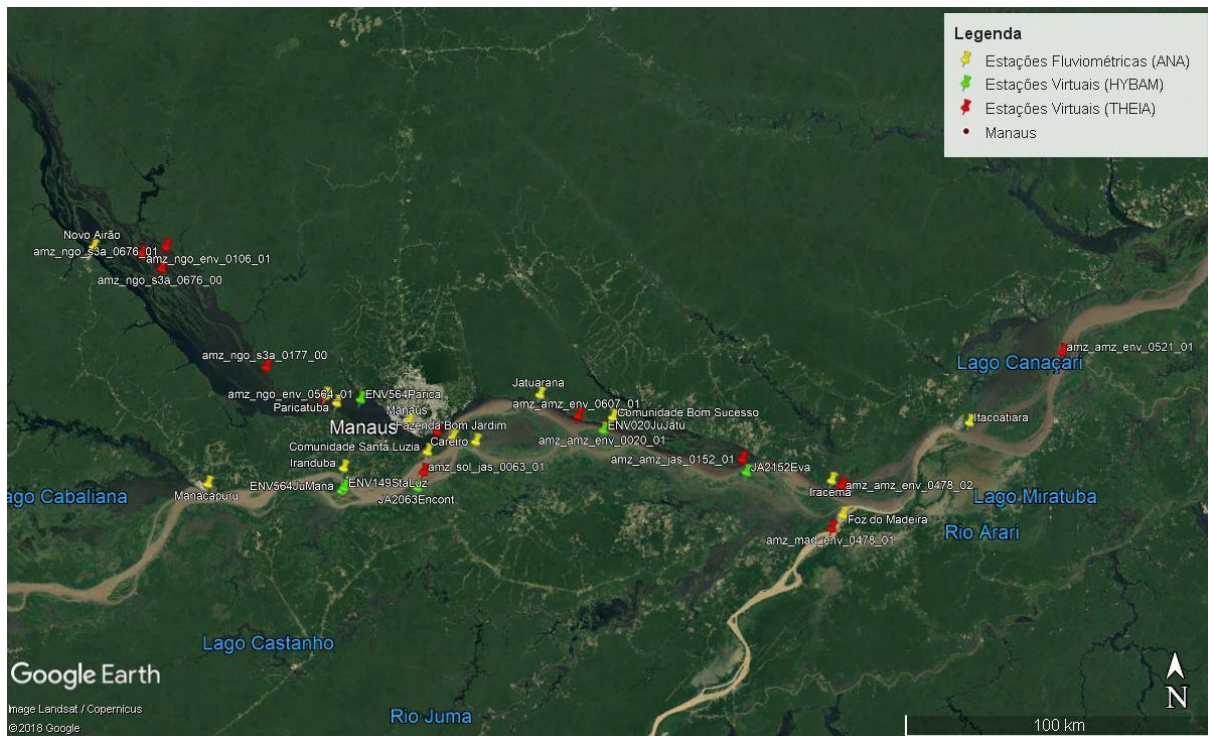


Figura 5-1 – Localização das estações próximas de Manaus. Fonte: (Google Earth - © 2018 Google)

Uma comparação entre os dados das estações virtuais (HYBAM, 2018; Theia - Land Data Centre, 2018) e das estações fluviométricas da ANA mais próximas foi executada, considerando a altura ortométrica dos zeros das réguas destas últimas. Com isso, é possível avaliar a precisão dos dados provenientes da altimetria de satélite, e detectar dados espúrios, que podem decorrer de motivos diversos, como erros de registro na estação fluviométrica ou problemas na medição feita por satélite. Os dados das estações virtuais apresentaram períodos de dados mais curtos do que os das estações fluviométricas, sendo então as suas datas determinantes para a comparação de nível entre elas. Os resultados obtidos estão mostrados nas Figuras 5-2 a 5-6 a seguir.

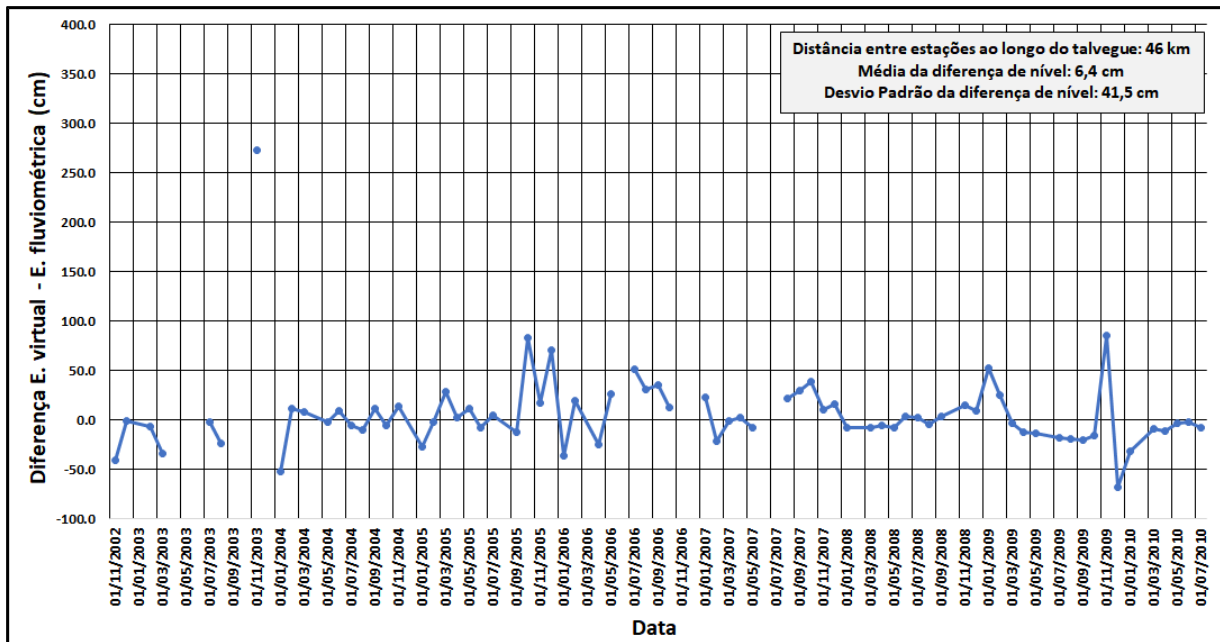


Figura 5-2 – Diferença entre o nível da estação virtual Jusante Manacapuru e da estação fluviométrica Manacapuru.

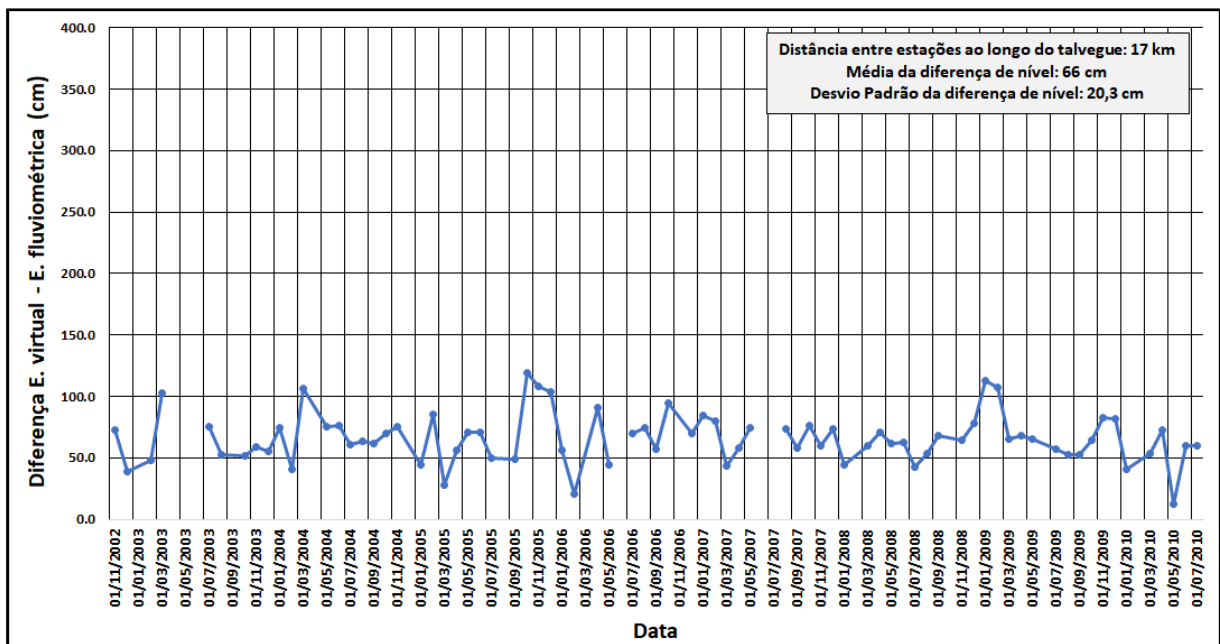


Figura 3-3 – Diferença entre o nível da estação virtual Paricatuba e da estação fluviométrica Manaus.

Vale ressaltar que a estação virtual de Paricatuba está mais próxima das estações fluviométricas convencionais de Paricatuba e Tatu Paricatuba, porém uma comparação não foi realizada com essas estações porque as datas das estações não coincidem. A estação de Tatu Paricatuba possui dados de nível somente a partir de 2014 e Paricatuba sequer possui algum dado de nível.

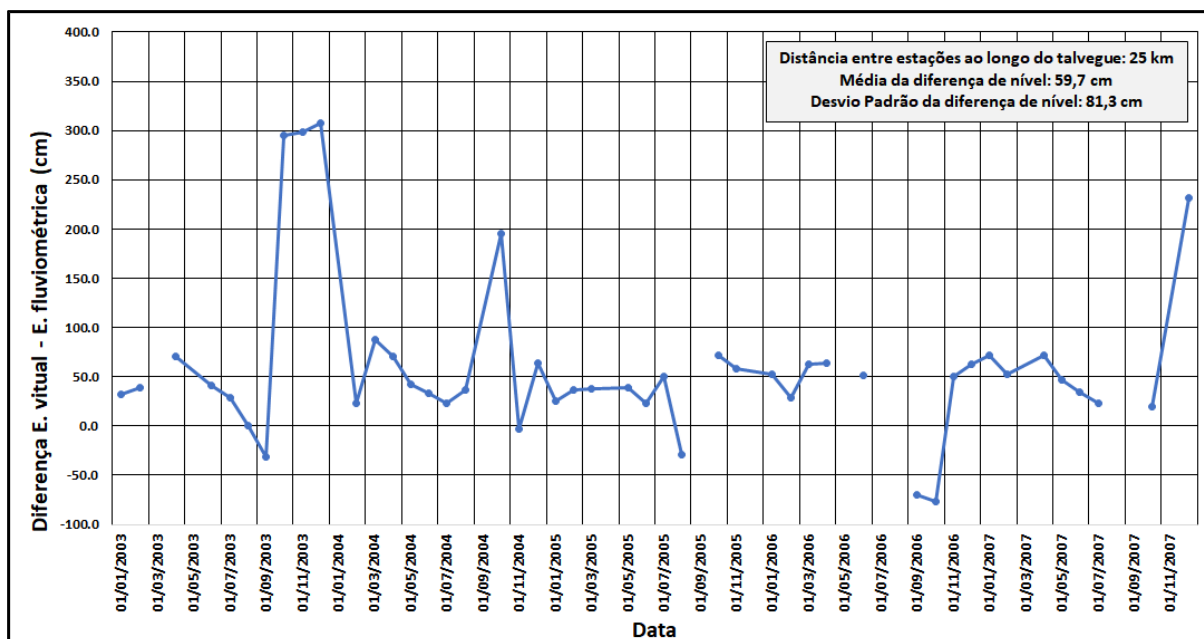


Figura 5-4 – Diferença entre o nível da estação virtual Jusante Jatuarana e da estação fluviométrica Jatuarana.

Como pode ser observado na Figura 5-4 acima, os níveis da estação virtual apresentam um valor consideravelmente maior do que os da estação fluviométrica convencional. Esse fato provavelmente ocorreu porque, como pode ser observado no mapa da Figura 1, a estação virtual está localizada em uma ilha que está entre uma derivação de fluxo no rio Amazonas e a calha principal. Como essa área sofre alagamentos durante as cheias, pode ser que seu nível tenha sido superestimado em comparação com o nível da estação fluviométrica, que se encontra na calha principal do rio.

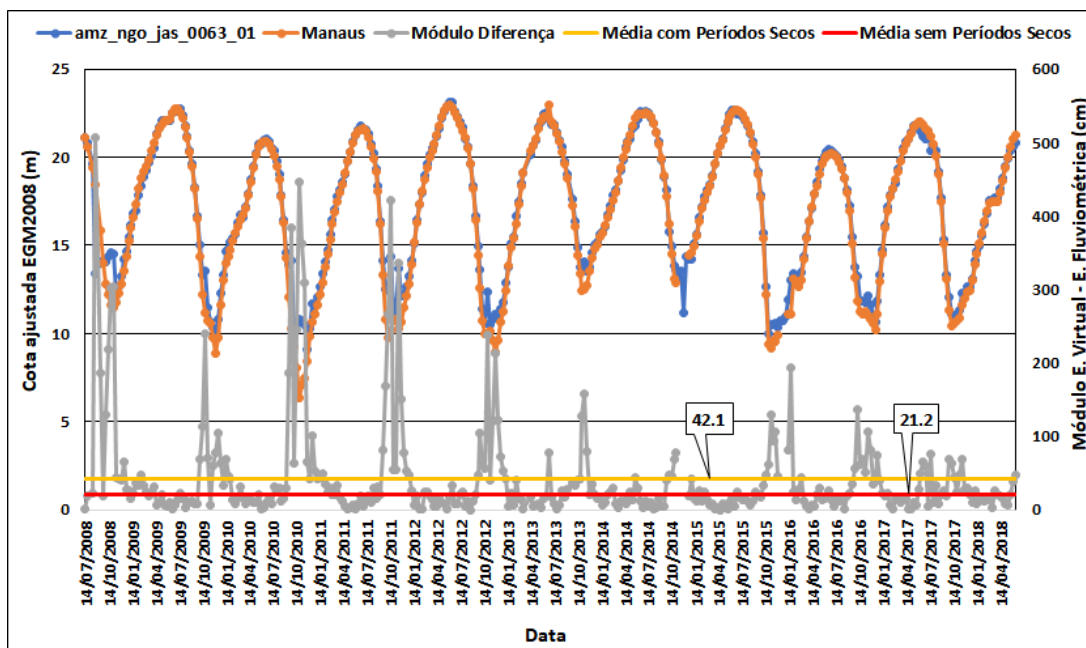


Figura 5-5 – Cotas e Diferença entre o nível da estação virtual amz_ngo_jas_0063_01 e da estação fluviométrica Manaus.

Na figura 5-5, a linha amarela representa a média da diferença em módulo para toda a série de dados das duas estações e a linha vermelha para os níveis mais altos. A média para toda a série resultou num valor de 51 centímetros e para o período de cheias, 21 centímetros. Para a análise de cheias, que é o objetivo do trabalho, a diferença pequena entre os valores de cota das estações permite a utilização da estação virtual para substituição/complementação da série fluviométrica.

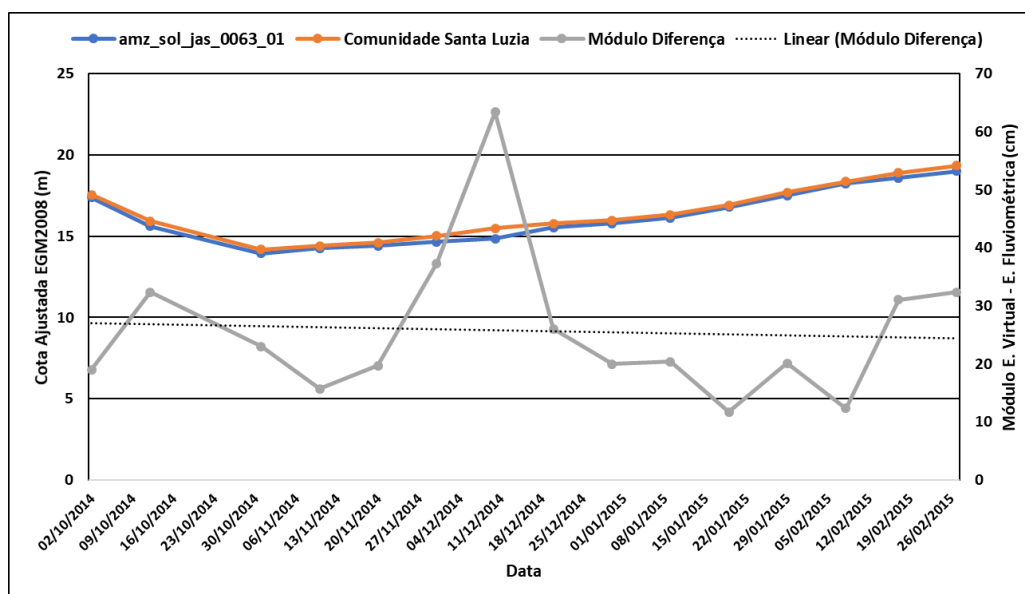


Figura 5-6 – Cotas e diferença entre o nível da estação virtual amz_sol_jas_0063_01 e da estação fluviométrica Comunidade Santa Luzia.

A estação virtual acima possui dados de nível durante aproximadamente 10 anos (2008 – 2018), porém a estação fluviométrica possui dados apenas no final do ano de 2014 e começo de 2015, resultando em poucos pontos de comparação possíveis. Apesar dessa pequena quantidade, é possível ver que os valores de nível das estações estão bem próximos, com uma linha de tendência média (pontilhada) de, aproximadamente, 24 centímetros. Sua utilização também permite a expansão da quantidade de dados no rio Amazonas para a faixa disponível de níveis da estação virtual.

5.2 RESULTADOS RIO NEGRO

Foi analisada a declividade da linha d'água entre 2 estações virtuais da THEIA (ngo_env_0106_01 e ngo_env_0564_01) que ficam na proximidade das estações fluviométricas Novo Airão e Tatu Paricatuba, respectivamente. O cálculo da declividade é feito subtraindo a cota da estação fluviométrica (corrigida para o referencial EGM2008) da cota da estação virtual. O resultado é então dividido pela distância entre as duas estações, tomada a partir do talvegue do rio. A variabilidade da declividade entre as duas estações virtuais e a estação de Manaus está mostrada nas Figuras 5-7 e 5-8 abaixo.

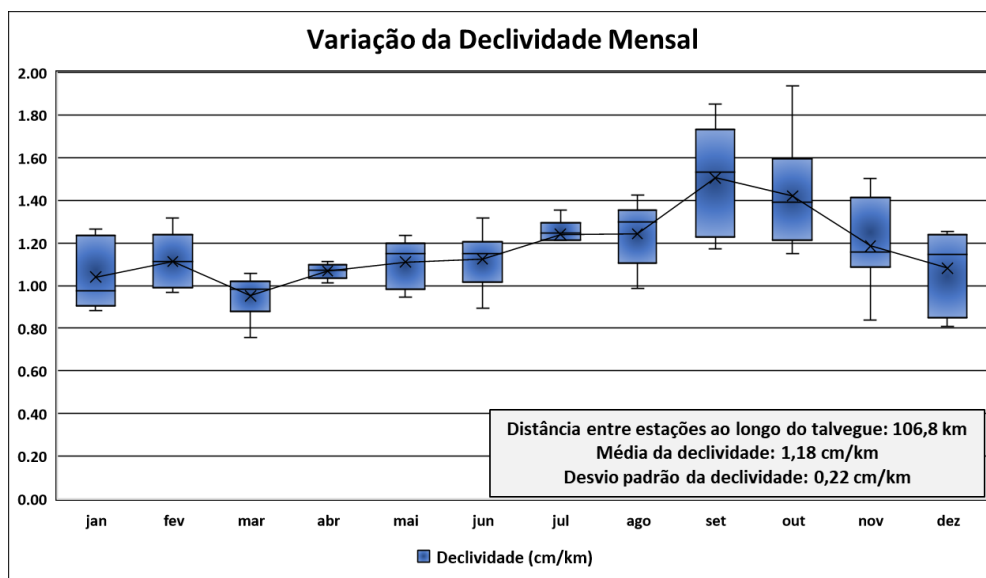


Figura 5-7 – Variação da declividade mensal do rio Negro a partir da estação amz_ngo_env_0106_01

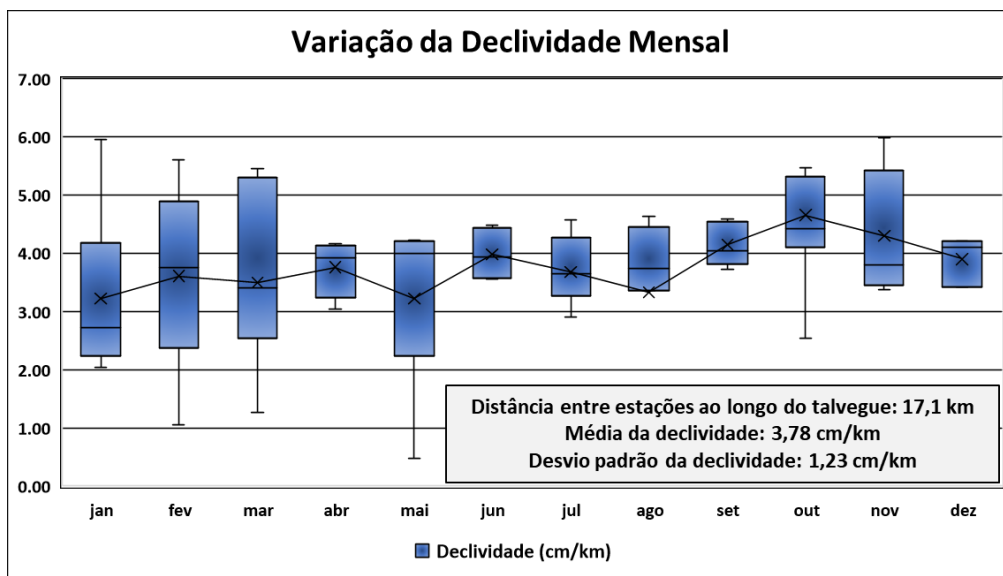


Figura 5-8 – Variação da declividade mensal do rio Negro a partir da estação amz_ngo_env_0564_01

É possível ver uma menor variabilidade dos valores de declividade nos meses de cota máximas (abril até julho) em comparação com os outros meses do ano. A partir de agosto, essa variabilidade de valores de declividade aumenta, assim como a magnitude da declividade, chegando ao seu valor máximo durante os meses de setembro e outubro. A diferença entre essas declividades mostra que a sensibilidade aos valores de vazão no Solimões é percebida em localidades mais próximas de Manaus, diminuindo de acordo com o aumento da distância no talvegue com relação à confluência.

Vale ressaltar também que, provavelmente devido à ocorrência de uma transição hidráulica no rio Negro, as declividades obtidas pelas duas estações virtuais são bem diferentes. A declividade da estação próxima a Tatu Paricatuba é, em média, 3 vezes maior do que a declividade medida a partir da estação próxima de Novo Airão. Essa transição hidráulica pode ocorrer devido à contração do canal presente nas proximidades da estação de Tatu Paricatuba, causando uma elevação do nível d'água nessa estação.

Os dados de nível da estação virtual do centro francês THEIA foram plotados em um gráfico juntamente com os dados de nível da estação fluviométrica em Novo Airão (código ANA 14900050) para verificação da diferença entre os valores encontrados. Essa diferença está representada na Figura 5-9 a seguir.

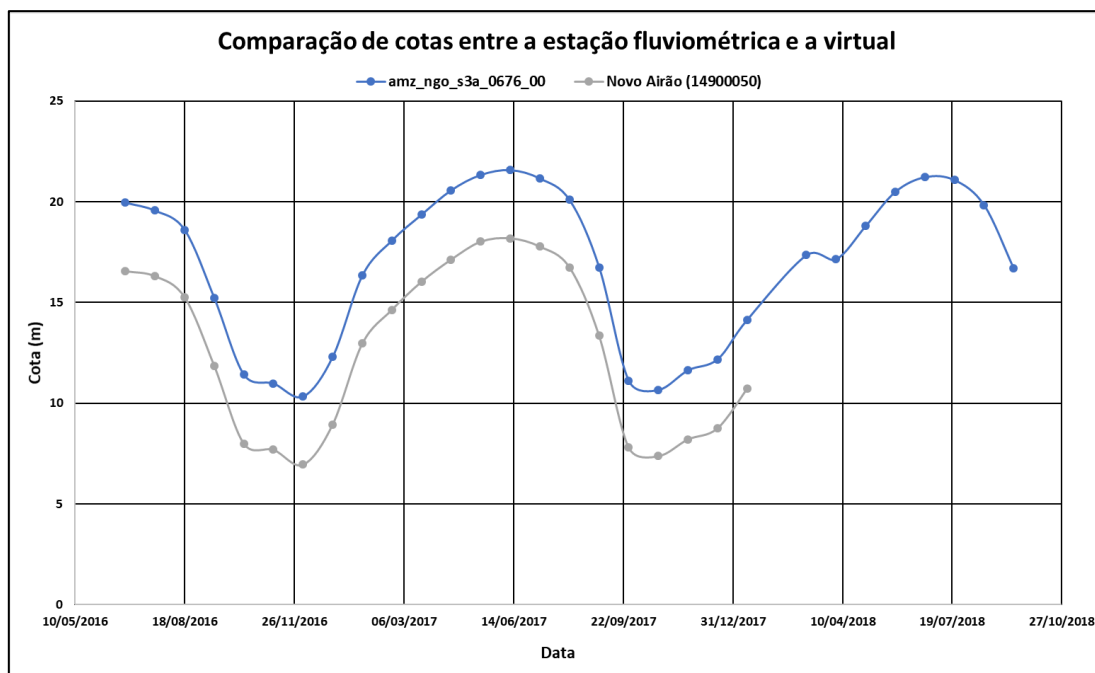


Figura 9-9 – Comparação das cotas entre a estação virtual e a estação fluviométrica

Como é possível observar, existe uma diferença entre as estações relativamente constante de acordo com a sazonalidade dos níveis nos anos observados (2016 a 2018). Essa diferença constante mostra que os valores da estação virtual podem ser usados no lugar de pontos de falha da estação fluviométrica aplicando-se uma “correção” numérica do nível. Essa correção, obtida a partir da média das diferenças entre as duas estações (Tabela 5-4), foi definida como sendo 3,37 metros, com um desvio-padrão de 0,06 metros. Como os níveis da estação virtual estão referenciados segundo o datum EGM2008, esse valor corresponde ao zero fixo da estação fluviométrica que, para eventuais trabalhos futuros, pode ser utilizada para sua correção segundo esse mesmo datum.

Tabela 5-4 – Diferença de nível entre a estação virtual amz_ngo_s3a_0676_00 e fluviométrica Novo Airão

Nível amz_ngo_s3a_0676_00 (m)	Nível Novo Airão (m)	Diferença (m)
19,97	16,56	3,41
19,57	16,31	3,26
18,61	15,26	3,35
15,23	11,86	3,37
11,41	8,00	3,41
10,97	7,70	3,27
10,32	6,96	3,36

Tabela 5-6 (Conclusão) – Diferença de Nível entre a estação virtual amz_ngo_s3a_0676_00 e fluviométrica Novo Airão

Nível amz_ngo_s3a_0676_00 (m)	Nível Novo Airão (m)	Diferença (m)
12,30	8,95	3,35
16,35	12,96	3,39
18,09	14,64	3,45
19,37	16,03	3,34
20,58	17,13	3,45
21,35	18,02	3,33
21,59	18,19	3,40
21,17	17,78	3,39
20,10	16,75	3,35
16,74	13,37	3,37
11,10	7,82	3,28
10,65	7,38	3,27
11,63	8,21	3,42
12,19	8,76	3,42
14,15	10,72	3,43
Média (m)		3,37
Desvio Padrão (m)		0,06

5.3 RESULTADOS METODOLOGIA SFD (*STAGE-FALL-DISCHARGE*)

Para utilização da metodologia SFD, são necessárias relações das variáveis geométricas da seção transversal (área e raio hidráulico) da equação de Manning para calibração dos valores de n de Manning. Essa calibração é feita a partir dos valores de vazão provenientes de resumos de descarga na seção, que são usados na equação para obtenção dos valores de rugosidade do canal em função da cota. Foram utilizados aqui resumos de descarga provenientes de 3 estações fluviométricas (Paricatuba, Tatu Paricatuba e Manaus).

Os gráficos de raio hidráulico $^2/3$ em função da cota e área molhada em função da cota, obtidos a partir dos resultados dos perfis calculados no HEC-RAS estão representados nas Figuras 5-10 e 5-11 abaixo.

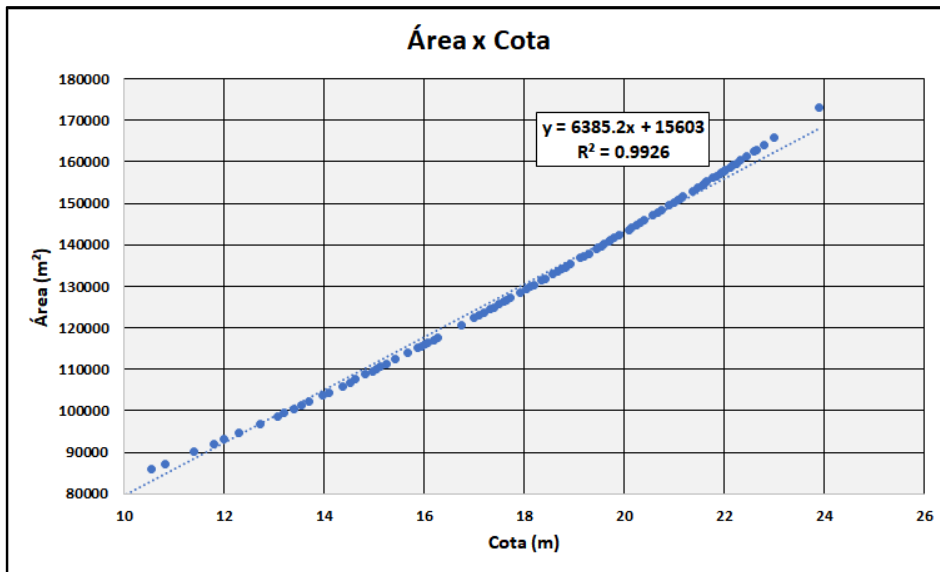


Figura 5-10 – Área em função da cota em Manaus

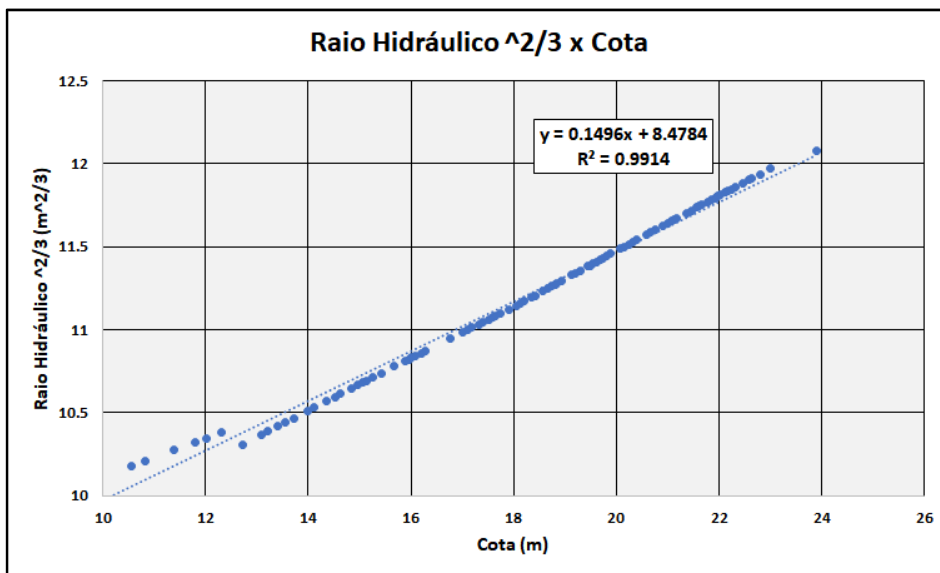


Figura 5-11 – Raio hidráulico ²/3 em função da cota em Manaus

Os valores de n de Manning estimados a partir das medições de descarga no rio Negro estão representados em função da cota na Figura 5-12 a seguir. A partir dessas relações, foi calculado o hidrograma para a estação fluviométrica de Manaus com os dados de declividade da estação amzngoenv_0106_01, mostrados na Figura 5-7.

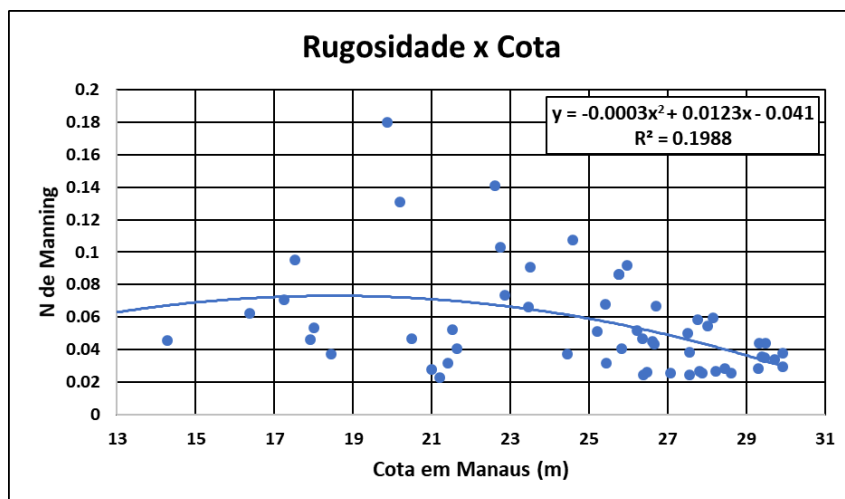


Figura 12-12 – Rugosidade do canal em função da cota em Manaus

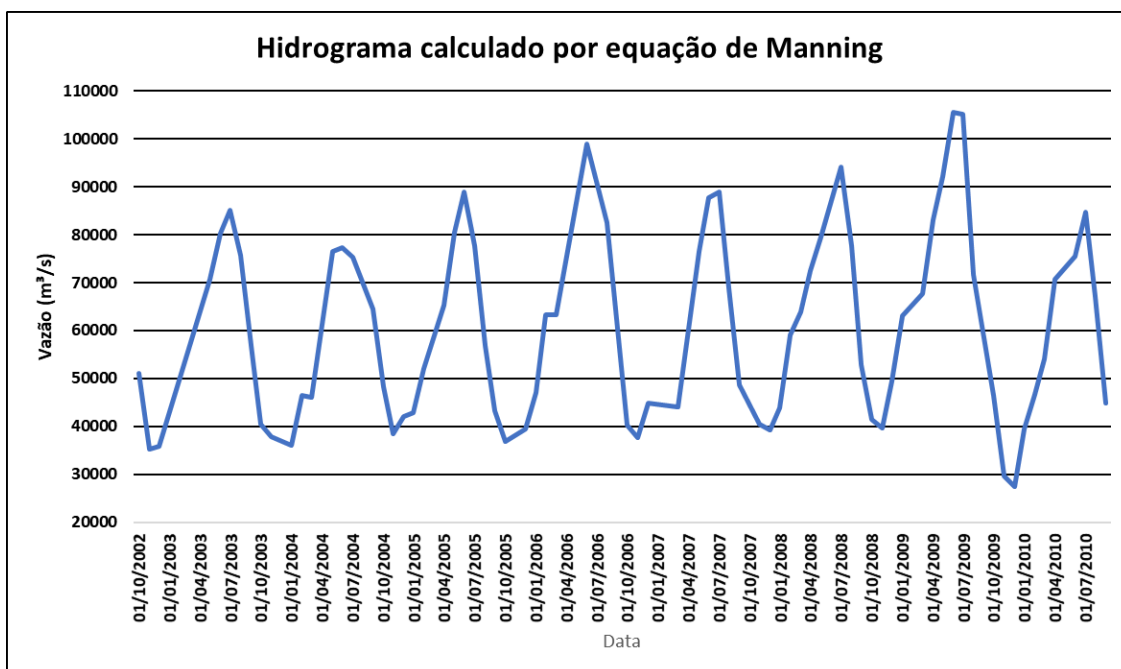


Figura 5-13 – Hidrograma em Manaus calculado pela metodologia SFD

A quantidade de valores de n de Manning obtida é muito pequena e dispersa. O ajuste pela curva de regressão mostrado na Figura 5-12, apesar de não possuir uma boa correlação com os dados de uma maneira geral, apresenta resultados melhores com relação a valores de cota mais altos. Com isso, foi calculado o hidrograma por meio da regressão polinomial mostrada na Figura 5-12.

Esse valor ainda assim é alto em comparação com resultados de calibração anteriores, de forma que alguma das variáveis geométricas do canal pode estar apresentando um erro com relação à cota em Manaus. O parâmetro de declividade, por apresentar valores diferentes para as estações virtuais empregadas nas Figuras 5-7 e 5-8, também mostra que a contração do rio

Negro nas proximidades das estações de Paricatuba e Tatu Paricatuba dificulta a aplicação dessa metodologia.

5.4 RESULTADOS RIO SOLIMÕES

Os dados de vazão no rio Solimões apresentaram uma tendência de altos valores nos últimos anos. Foram construídas então curvas de posição de plotagem e tempos de retorno para a série de dados segundo as fórmulas de Weibull e Gringorten.

O dado de vazão máxima referente ao ano de 1973 (primeiro ano da série considerada) na estação Manacapuru possivelmente representa um outlier pelo critério de estar fora do intervalo delimitado pelo terceiro quartil mais 1,5 vezes o intervalo inter-quartis. Dessa forma, foram realizadas duas análises da aderência da amostra à distribuição de Gumbel: uma com esse valor e outra sem. Os resultados são mostrados nas Figuras 5-14 a 5-17 abaixo:

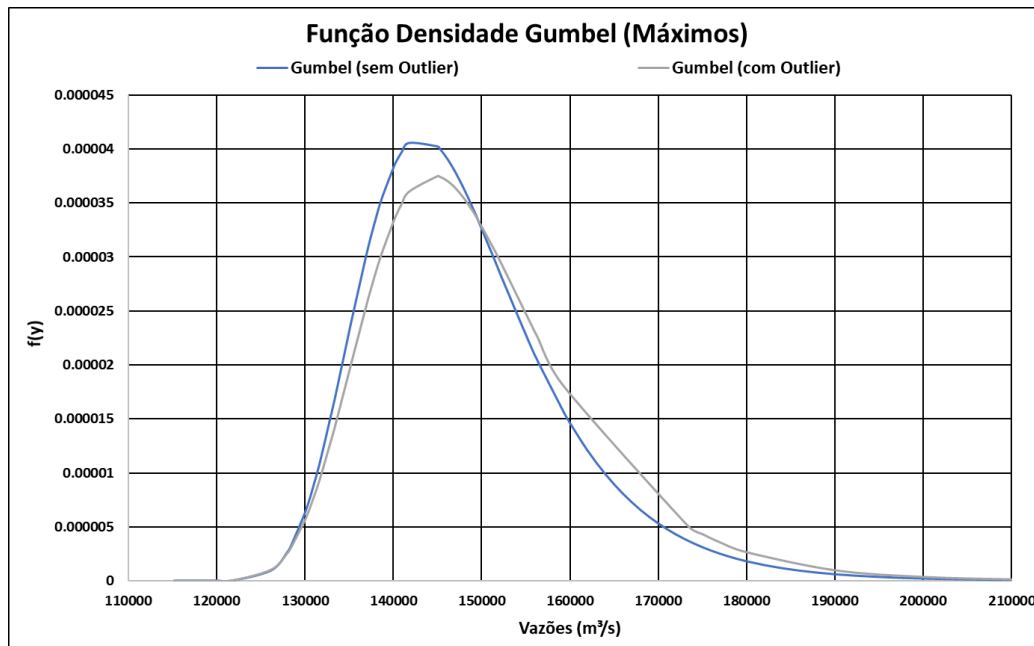


Figura 5-14 – Função densidade de probabilidade com complemento para amostra ajustada à uma distribuição de Gumbel (máximos) pelo método dos momentos (MOM)

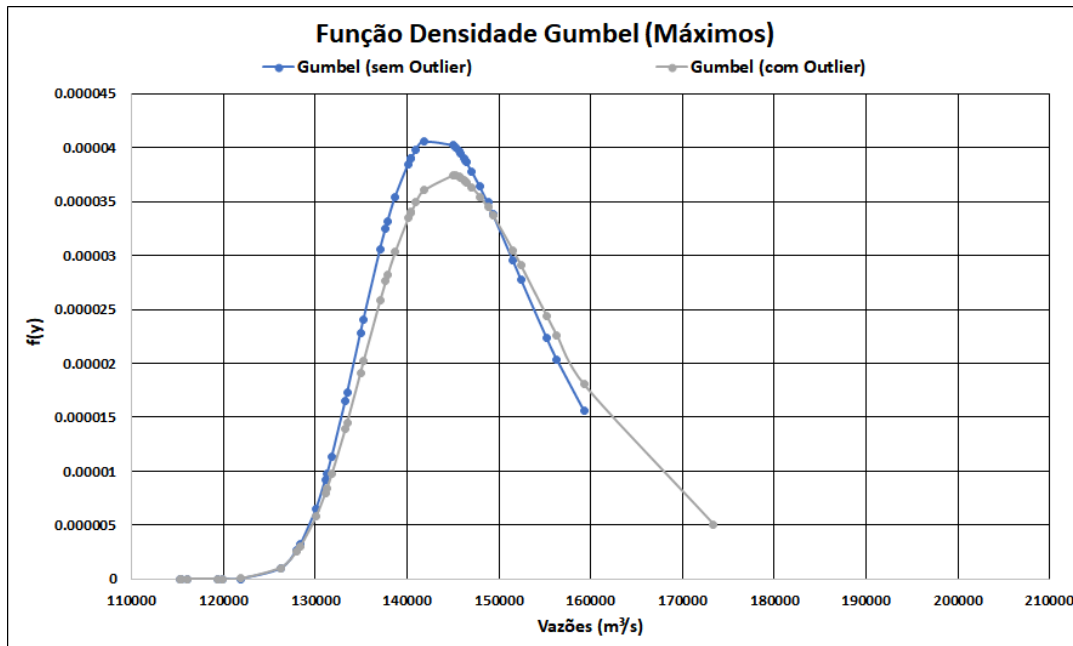


Figura 5-15 – Função densidade de probabilidade sem complemento para amostra ajustada à uma distribuição de Gumbel (máximos) pelo método dos momentos (MOM)

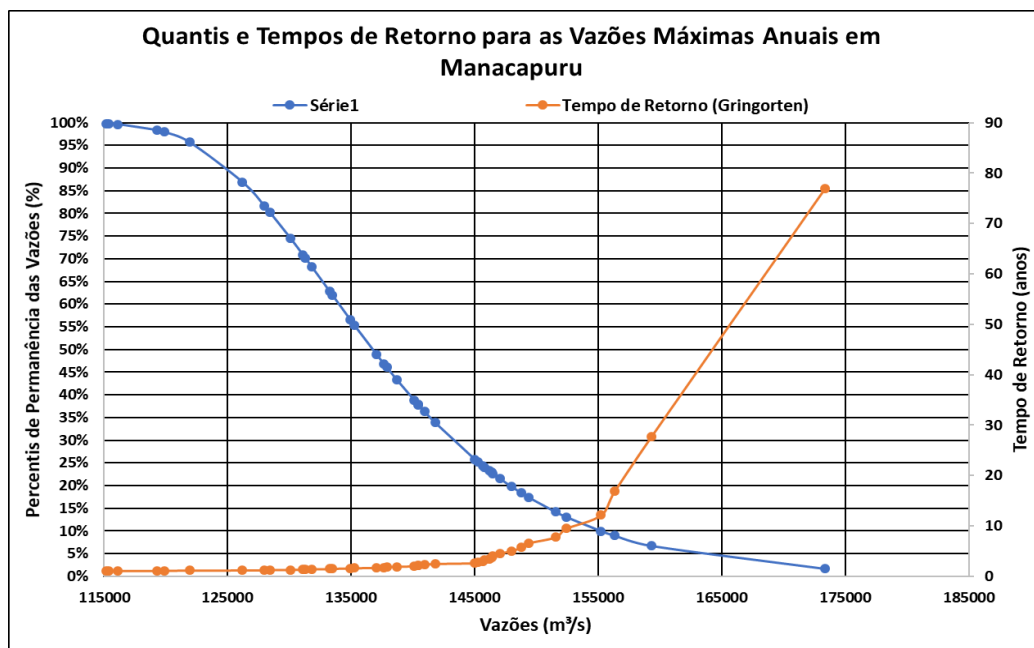


Figura 5-16 – Gráfico de quantis e tempos de retorno com o outlier

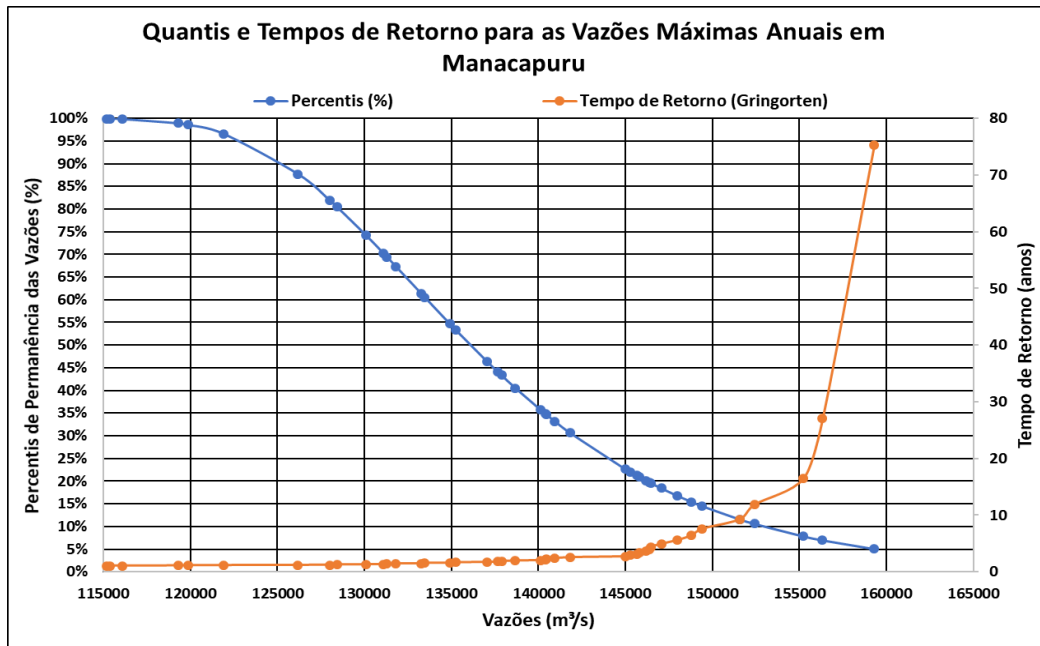


Figura 5-17 – Quantis e tempos de retorno sem o outlier

A partir dos gráficos acima é possível perceber que a ausência do outlier demonstra uma distribuição mais simétrica negativamente. O valor do Outlier altera parâmetros da função como a média, desvio padrão, assimetria e curtose, fazendo com que a função se desloque levemente para a direita em vazões mais altas e diminuindo a frequência de seus valores medianos.

Considerando o ponto em questão, foram analisados os valores obtidos para área molhada, largura, velocidade média e profundidade para que fosse avaliada a sua magnitude e comparada com outros valores de cheia existentes. É possível notar, a partir da Figura 5-18 abaixo, que os valores de largura e área molhada estão coerentes com outros eventos de cheia históricos. Porém, os valores de velocidade e profundidade apresentam diferenças com relação aos outros eventos. A velocidade está com um valor maior do que o seu valor normal para altas vazões (aproximadamente 1,6 m/s) e a profundidade de um evento dessas proporções também não parece estar correta, porque uma vazão alta não apresentaria uma profundidade tão baixa relativo aos outros eventos (maior valor de vazão representado pela segunda menor profundidade observada).

EstacaoCodigo	Consistencia	Data	Vazao (m ³ /s)	AreaMolhada (m ²)	Largura (m)	Velocidade Média (m/s)	Profundidade (m)
14100000	2	08/08/1973	173382	90713	3331,00	1,911	27,23
14100000	2	08/06/1974	140113	87798	3331,00	1,596	26,36
14100000	2	24/06/1975	146365	90790	3335,00	1,612	27,22
14100000	2	28/06/1977	140950	92721	3335,00	1,520	27,80
14100000	2	07/06/1987	151564	94076	3206,00	1,611	29,34
14100000	2	03/06/1989	145948	95660	3228,00	1,525	29,63
14100000	2	19/05/1993	149664	95317	3228,00	1,570	29,53
14100000	2	16/05/1994	155236	92759	3228,00	1,674	28,74

Figura 5-18 – Parâmetros geométricos e físicos de medições de vazões durante cheias extremas

Esse valor de velocidade mais alto pode ter sido causado por uma aferição errada de um equipamento no momento da medição de vazão, fazendo com que sua velocidade fosse superestimada. Na época em que a medição foi feita (1973) ainda não existiam medidores de vazão precisos como os ADCP's (*Acoustic Doppler Current Profiler*) que são utilizados atualmente. As medições de grandes rios eram feitas por meio do método do barco não ancorado ou método de Smoot descrito pela ANA em seu Manual Técnico (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2014).

A precisão do método está diretamente ligada ao rigor de sua execução, de forma que qualquer deslocamento do barco (longitudinal ou transversal) pode causar erros na aferição da profundidade da vertical e, conseqüentemente, de sua velocidade média. Como os rios Negro e Solimões apresentam magnitudes de variáveis geométricas altas, as possibilidades de erros são grandes.

5.5 RESULTADOS RIO AMAZONAS

Os resultados obtidos para a análise de utilização de uma curva-chave em Iracema estão mostrados nas Figuras 5-19 e 5-20 seguir. Cada conjunto de cores representada na Figura 5-19 representa dados de vazão de uma data específica de resumo de descarga no rio Negro. Essa vazão é somada com a vazão do rio Solimões para formar a vazão no rio Solimões. Essa diferenciação é feita para que seja possível observar a ocorrência de vazões para uma mesma cota.

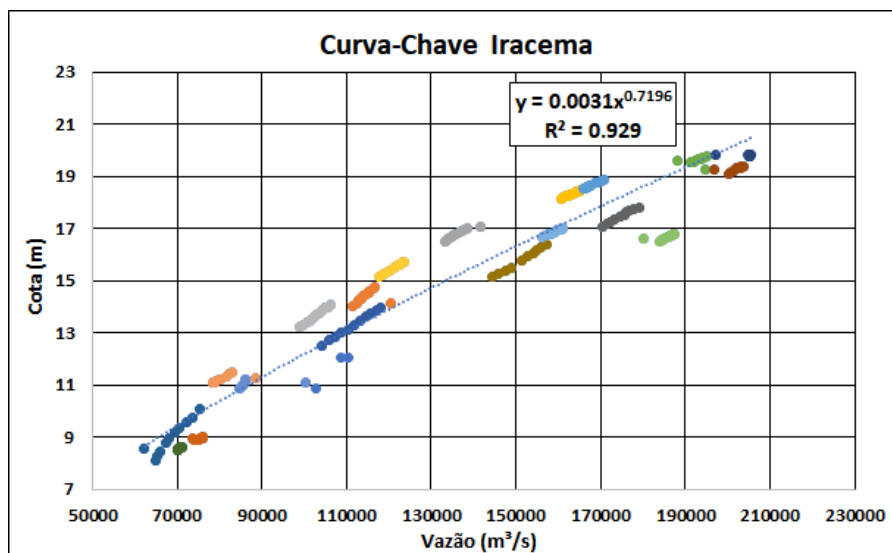


Figura 5-19 – Curva-Chave completa para a estação fluviométrica Iracema com cores diferentes para resumos de descarga no Rio Negro diferentes

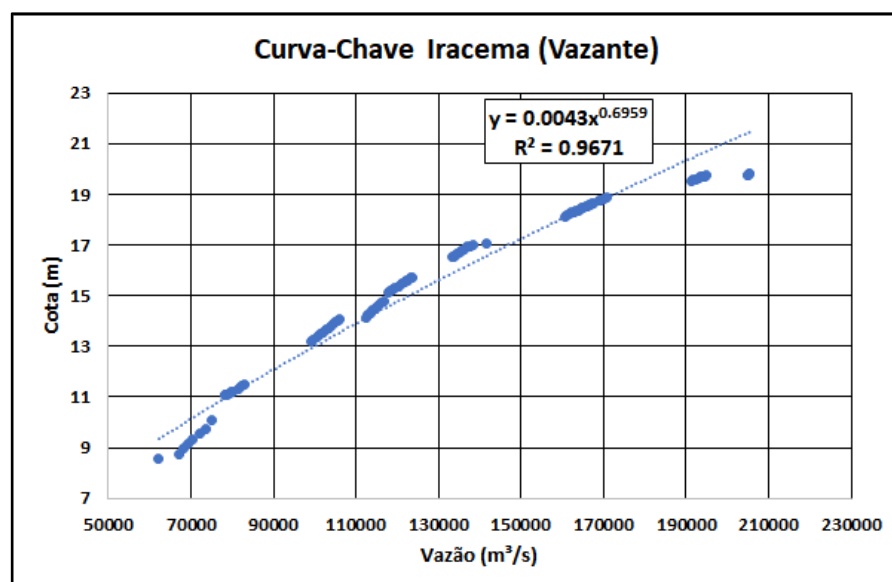


Figura 5-20 – Curva-Chave em regime de vazante para a estação fluviométrica Iracema

É possível notar um comportamento diferente da vazão quando o rio está em regime de enchente com relação à quando ele está em regime de vazante. Durante diferentes dias do ano, vazões próximas podem indicar níveis consideravelmente diferentes, e vice-versa. Isso ocorre principalmente devido aos processos de dinâmica fluvial da região. Na época de cheia, a planície de inundação recebe uma parcela da vazão do rio e acumula um volume de água.

Por meio das linhas de tendências mostradas nas figuras acima, é possível perceber uma melhora da equação da curva-chave quando são divididos os eventos de acordo com o período do rio (vazante ou enchente). Esse comportamento mostra o caráter não-permanente do regime de vazões nesse rio.

Para uma melhor análise dessa condição de contorno, foram calculados dados de nível d'água nos rios Negro e Solimões (localizados em seções transversais próximas às estações fluviométricas de Manaus e Iracema, respectivamente) de acordo com um aumento fixo do nível de jusante (na estação fluviométrica Iracema). Variou-se o nível de jusante de 50 em 50 centímetros (com valores de vazão do rio Negro e Solimões referentes ao evento de cheia de junho/2015) entre o intervalo de 14,38 até 20,38 metros. Os dados são mostrados na Tabela 5-5 a seguir.

Tabela 5-5 – Análise de sensibilidade à condição de contorno de nível em Iracema

Rio Amazonas (Iracema)	Rio Negro (Manaus)	Rio Solimões (Iracema)
14,38	19,17	20,79
14,88	19,37	20,95
15,38	19,59	21,12
15,88	19,84	21,31
16,38	20,10	21,52
16,88	20,36	21,73
17,38	20,64	21,95
17,88	20,93	22,19
18,38	21,23	22,44
18,88	21,55	22,71
19,38	21,88	23,15
19,88	22,23	23,28
20,38	22,59	23,59

Percebe-se que a variação na parte montante dos outros rios ficou entre 3,4 e 2,8 metros, com relação à essa variação de 6 metros a jusante. Isso indica que, mesmo essa estação fluviométrica (Iracema) sendo a mais a jusante do rio Amazonas antes da entrada do Rio Madeira, ainda é perceptível a sua influência sobre os níveis a montante.

De acordo com as observações de histerese na condição de contorno obtidas pela curva-chave da Figura 5-19 acima, prosseguiu-se com uma nova avaliação de curva-chave a partir de níveis de estações virtuais no Amazonas, principalmente aquelas do centro de dados THEIA, que possui 5 possíveis estações para análise de nível. Essa nova avaliação da curva foi feita

com o objetivo de tentar reduzir os erros derivados da modelagem em regime permanente de um fenômeno transiente.

Para a criação dessa curva, foram compilados todos os resumos de descarga no rio Negro, a partir de 3 estações fluviométricas diferentes: Paricatuba, Tatu Paricatuba e Manaus. As datas desses dados foram então comparadas com as datas de resumos de descarga na estação Manacapuru no Solimões. Considerando que não existem derivações de vazão entre essas estações e a confluência dos rios, somou-se a vazão do Negro e do Solimões, resultando na vazão do Rio Amazonas. A tolerância entre essas datas foi considerada como 10 dias, no máximo.

Para os dados de nível, optou-se por utilizar a estação virtual amz_amz_jas_0152_01 porque ela possui a maior quantidade de dados em datas comuns às dos resumos de descarga mencionados anteriormente. Foram obtidos 28 pontos de cota e vazão, que permitiram a construção da curva-chave da Figura 5-19 a seguir.

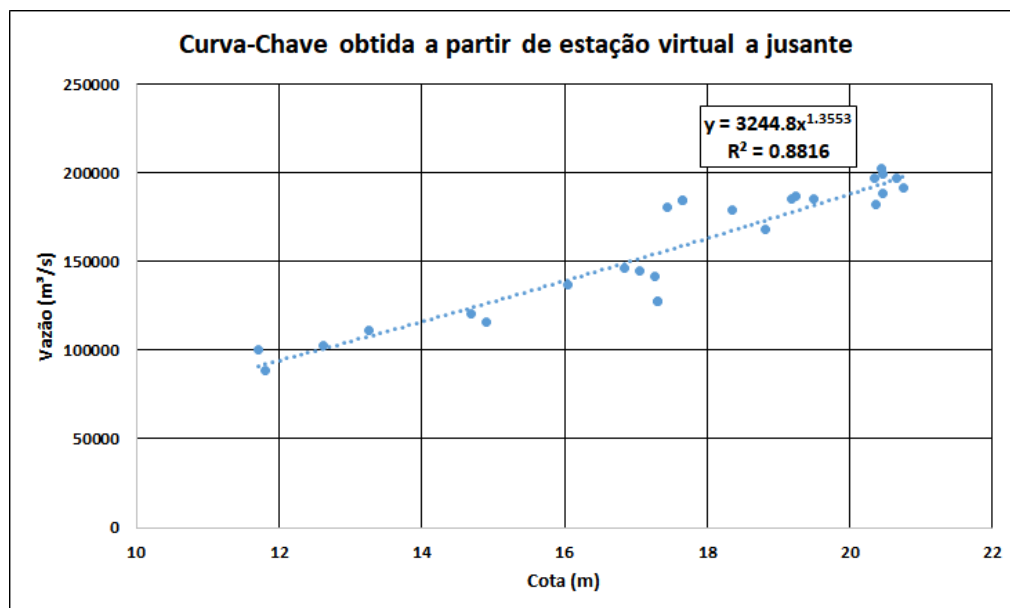


Figura 21-21 – Curva-chave com linha de tendência em forma de equação de potência

Essa curva, devido a quantidade menor de pontos obtidos, aparenta resultados coerentes com relação ao estabelecimento de uma relação unívoca entre a cota e a vazão. Apenas alguns valores de cota próximos de 17 metros apresentam vazões discrepantes. Vale ressaltar que essa curva foi feita com base apenas em dados de resumo de descarga, considerados estes mais precisos em comparação a dados de vazão obtidos por curva-chave em estações fluviométricas. Para que uma análise mais completa da avaliação dessa curva pudesse ser feita seriam

necessários mais dados de nível e vazão nos rios de forma a se observar o fenômeno da histerese.

5.6 CALIBRAÇÃO DO MODELO HEC-RAS

Após o cálculo dos valores RMSE para cada perfil e cada faixa de valores de n de Manning, os dados foram organizados e formatados por cor para melhor identificação e classificação. Os valores foram separados por perfis e aplicados uma escala de cor do verde para o vermelho, onde o verde indica valores menores da raiz quadrada do erro médio.

Foram realizadas duas análises dos valores para essa métrica, uma considerando a estação fluviométrica Careiro e outra não; representadas nas Figuras 5-22 e 5-23 a seguir. Essa estação, por estar numa derivação lateral do Solimões que se encontra com o rio Amazonas posteriormente ao encontro das águas, possui uma dinâmica fluvial completamente diferente daquela do rio Negro. A vazão que passa por essa derivação representa entre 15% e 20% da vazão do Solimões.

mai/15		N de Manning do Canal						jul/15		N de Manning do Canal					
		0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040			0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040
N de Manning da Planície	0.040	1.09	0.81	0.57	0.49	0.63	0.74	N de Manning da Planície	0.040	0.72	0.48	0.45	0.64	0.80	1.04
	0.048	1.02	0.72	0.51	0.53	0.71	0.90		0.048	0.66	0.46	0.52	0.75	0.99	1.20
	0.056	0.96	0.66	0.49	0.61	0.79	1.05		0.056	0.61	0.47	0.61	0.85	1.14	1.38
	0.064	0.91	0.61	0.50	0.68	0.90	1.16		0.064	0.58	0.49	0.70	0.97	1.26	1.56
	0.072	0.87	0.58	0.53	0.74	1.02	1.30		0.072	0.56	0.52	0.76	1.08	1.38	1.69
	0.080	0.84	0.55	0.56	0.80	1.12	1.42		0.080	0.54	0.55	0.84	1.17	1.50	1.82
jun/15		N de Manning do Canal						mai/16		N de Manning do Canal					
		0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040			0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040
N de Manning da Planície	0.040	1.11	0.81	0.56	0.50	0.54	0.72	N de Manning da Planície	0.040	1.85	2.13	2.45	2.77	3.07	3.25
	0.048	1.03	0.72	0.51	0.52	0.66	0.86		0.048	1.94	2.25	2.59	2.94	3.23	3.47
	0.056	0.96	0.65	0.49	0.56	0.79	0.99		0.056	2.01	2.35	2.72	3.09	3.35	3.65
	0.064	0.91	0.60	0.50	0.65	0.88	1.17		0.064	2.07	2.44	2.82	3.20	3.48	3.78
	0.072	0.86	0.57	0.53	0.73	0.99	1.28		0.072	2.13	2.51	2.91	3.28	3.62	3.93
	0.080	0.83	0.55	0.57	0.81	1.11	1.41		0.080	2.17	2.57	2.99	3.36	3.73	4.06

Figura 5-22 – Valores de raiz quadrada do erro médio considerando a estação fluviométrica Careiro

mai/15		N de Manning do Canal						jul/15		N de Manning do Canal					
		0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040			0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040
N de Manning da Planície	0.040	1.19	0.89	0.60	0.41	0.43	0.50	N de Manning da Planície	0.040	0.79	0.49	0.28	0.40	0.55	0.77
	0.048	1.11	0.79	0.50	0.38	0.49	0.65		0.048	0.72	0.42	0.33	0.50	0.73	0.95
	0.056	1.05	0.71	0.44	0.42	0.56	0.80		0.056	0.66	0.39	0.41	0.61	0.89	1.14
	0.064	0.99	0.65	0.41	0.48	0.66	0.92		0.064	0.62	0.38	0.49	0.73	1.02	1.32
	0.072	0.95	0.60	0.41	0.53	0.78	1.07		0.072	0.59	0.39	0.55	0.84	1.16	1.46
	0.080	0.92	0.57	0.42	0.59	0.88	1.19		0.080	0.56	0.41	0.62	0.94	1.28	1.60
jun/15		N de Manning do Canal						mai/16		N de Manning do Canal					
		0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040			0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.040
N de Manning da Planície	0.040	1.21	0.88	0.58	0.38	0.32	0.43	N de Manning da Planície	0.040	1.74	2.00	2.29	2.59	2.87	3.05
	0.048	1.12	0.78	0.48	0.34	0.39	0.53		0.048	1.82	2.11	2.43	2.76	3.03	3.26
	0.056	1.05	0.70	0.41	0.35	0.52	0.73		0.056	1.89	2.21	2.55	2.91	3.15	3.44
	0.064	0.99	0.63	0.38	0.41	0.63	0.91		0.064	1.95	2.29	2.66	3.01	3.28	3.58
	0.072	0.95	0.58	0.38	0.48	0.74	1.04		0.072	2.00	2.36	2.75	3.09	3.42	3.73
	0.080	0.91	0.55	0.40	0.56	0.86	1.17		0.080	2.05	2.43	2.82	3.18	3.53	3.86

Figura 5-23 – Valores de raiz quadrada do erro médio desconsiderando a estação fluviométrica Careiro

Os valores da raiz quadrada do erro médio variam diferentemente entre a faixa de n de Manning do canal e a faixa de n de Manning da planície. Por conter a maior parcela de vazão do rio durante todo o ano, variações no n de Manning do canal representam variações maiores do nível do rio, aumentando a diferença entre os níveis modelado e observado e, conseqüentemente, aumentando os valores da métrica.

Os valores de menor raiz quadrada do erro médio foram utilizados então na segunda parte da calibração do n de Manning que gera valores aleatórios a partir de uma média e desvio padrão definidos, de acordo com uma distribuição de probabilidade normal. Esse processo foi repetido várias vezes de forma que se minimizasse ao máximo as diferenças entre os níveis d'água calculados e observados. Os valores de n de Manning para os 3 rios (Negro, Solimões e Amazonas) que obtiveram os menores resultados de raiz quadrada do erro médio estão representados na Tabela 5-6 abaixo.

Tabela 5-6 – Valores de n de Manning obtidos minimizando a raiz quadrada do erro médio

Rio	Média n de Manning	Desvio Padrão n de Manning	RMSE (m)			
			Mai/2015	Jun/2015	Jul/2015	Mai/2016
Amazonas	0,023	0,001	0,4486	0,2110	0,2947	0,4513
Negro	0,033	0,003				
Solimões	0,039	0,003				

Os valores de RMSE para os perfis de junho e julho de 2015 foram significativamente melhores do que os de maio de 2015 e 2016, apesar de todos os valores da métrica serem baixos

considerando-se os possíveis fatores de erros já inerentes ao modelo (sensibilidade à condições de contorno, delimitação de áreas inefetivas e diferenças de data entre dados de entrada). Vale ressaltar que esses valores mostram apenas uma média do erro de todas as estações que possuem um dado de nível d'água observado em cada evento de cheia. Uma avaliação mais específica para cada estação é feita a seguir com os perfis longitudinais obtidos a partir do HEC-RAS.

É possível perceber, a partir dos perfis longitudinais nas seções que possuem níveis d'água calculados mostrados nas Tabela 5-7, que os valores de nível d'água obtidos para os eventos de 2016 são bem maiores do que os obtidos para o ano de 2015. Na Figura 5-26 a seguir encontra-se um gráfico mostrando a variação de cotas dos dois anos, bem como a sua variação diária em centímetros.

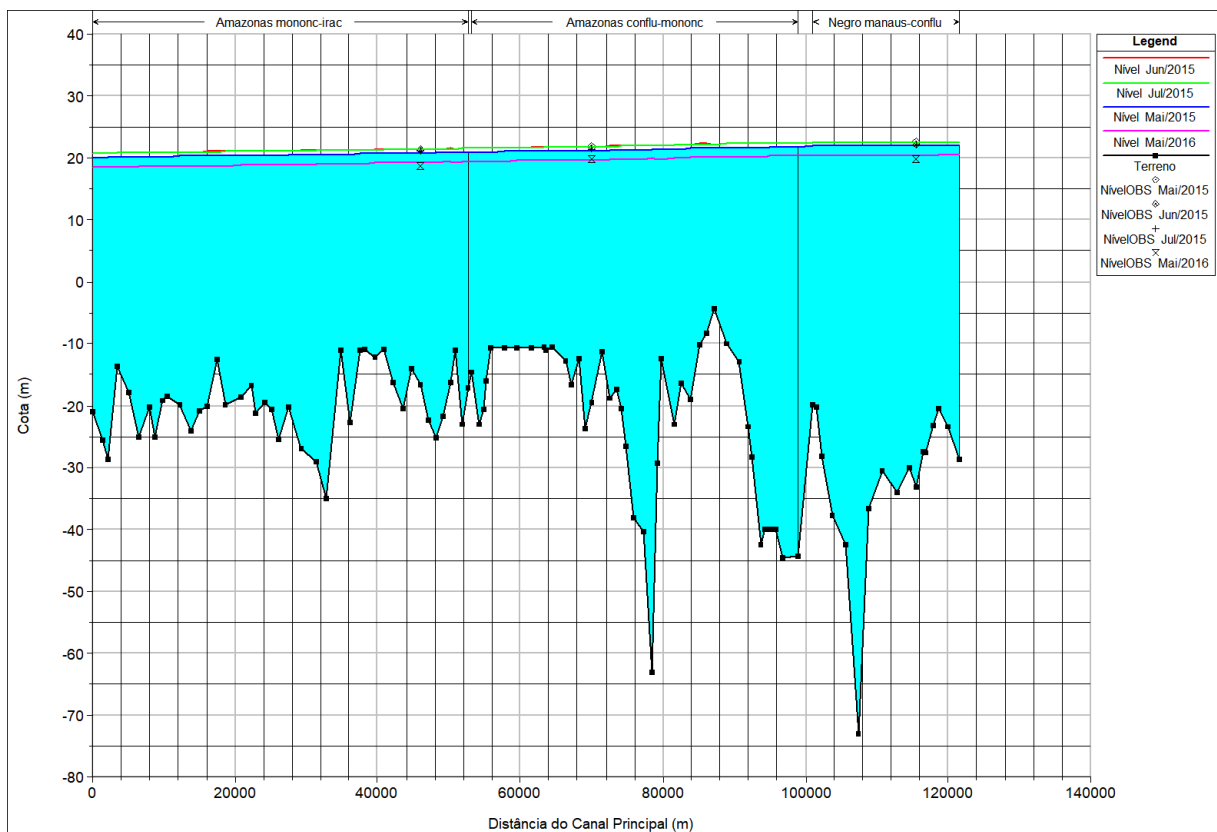


Figura 24-24 – Perfil longitudinal com as superfícies d'água calculadas e observadas nos rios Amazonas e Negro

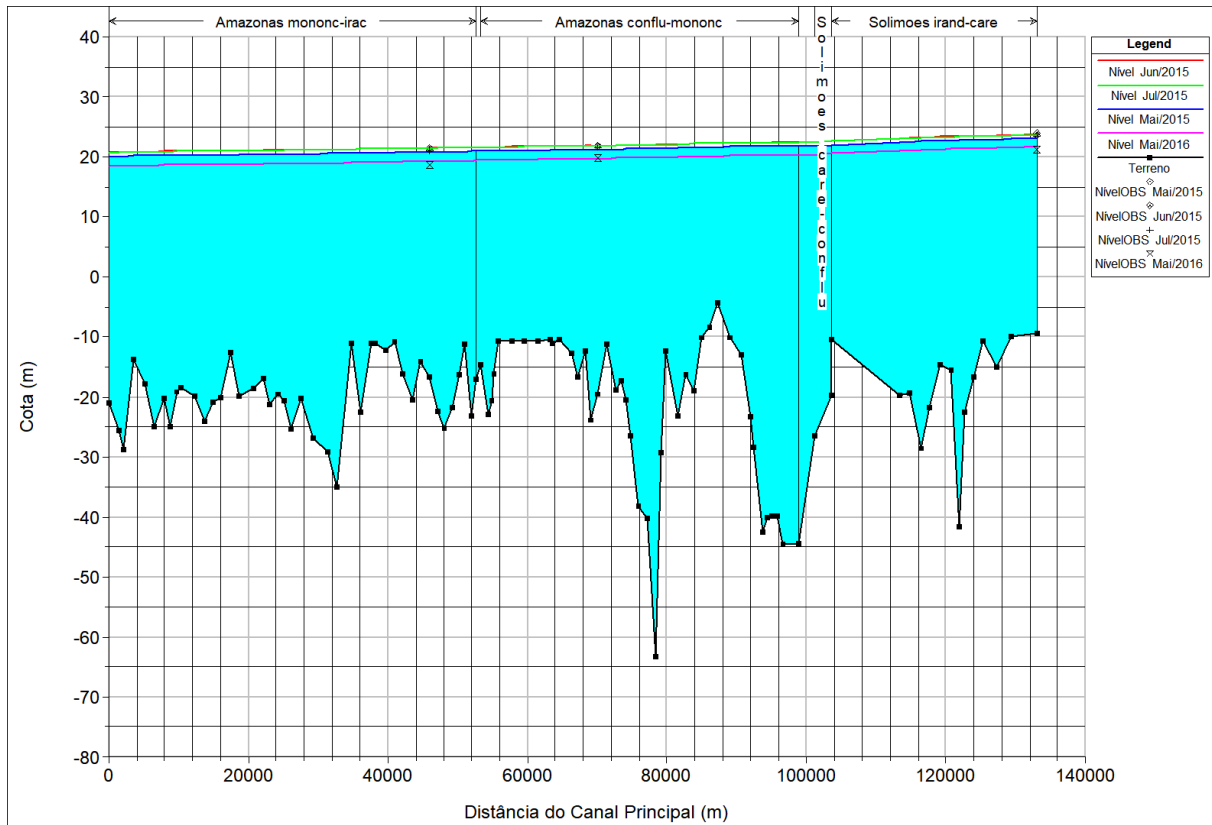


Figura 5-25 – Perfil longitudinal com as superfícies d’água calculadas e observadas nos rios Amazonas e Solimões

Tabela 5-7 – Níveis calculados e observados dos perfis modelados no HEC-RAS

Rio	Estação	Mai/2015		Jun/2015		Jul/2015		Mai/2016	
		Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.	Calc.	Obs.
Amazonas	Jatuarana	21,14	21,64	21,81	21,99	21,78	21,49	19,66	19,81
Amazonas	Comunidade Bom Sucesso	20,78	21,19	21,47	21,51	21,43	21,00	19,26	18,73
Careiro	Careiro	21,97	21,71	22,63	22,04	22,60	21,61	20,51	19,43
Negro	Manaus	21,92	22,21	22,61	22,73	22,58	22,26	20,43	19,82
Solimões	Irاندuba	23,24	23,53	23,71	23,94	23,67	23,48	21,77	21,19

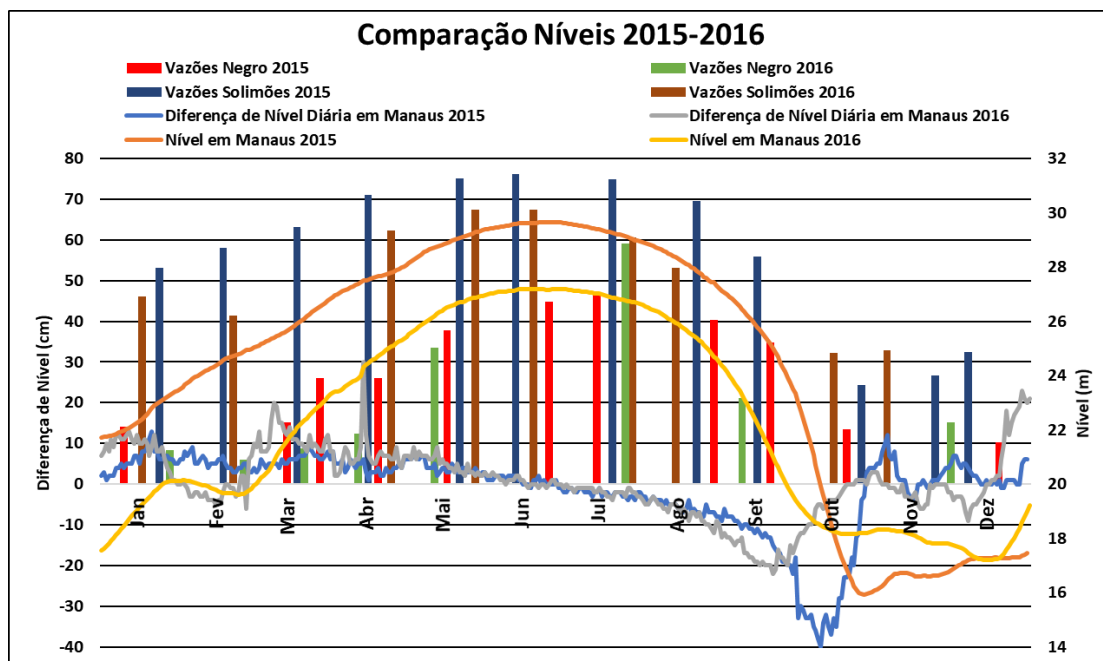


Figura 5-26 – Cotas e variações diárias em Manaus durante os anos de 2015 e 2016

O ano de 2015 apresentou uma queda de nível forte a partir do mês de setembro, e uma recuperação lenta no fim do ano. Como pode ser observado pelas vazões do Solimões (barras azul e marrom), os efeitos da diminuição de vazão nesse rio entre os meses de setembro e outubro podem ter causado um processo de remanso e diminuído o nível no rio Negro. Isso ocasionou uma diferença de aproximadamente 4 metros entre o começo desse ano com relação a 2016. Essa variação fez com que, apesar dos eventos da época de cheia dos dois anos apresentarem vazões similares no rio Amazonas (soma das vazões do Negro e do Solimões), tivessem cotas extremamente diferentes. Dessa forma, os valores da raiz quadrada do erro médio foram muito maiores do que o ano anterior.

Isso mostra que o processo físico que ocorre nessa região apresenta uma complexidade muito maior do que apenas o modelo computacional unidimensional em regime permanente consegue representar. A variação do fenômeno no tempo representa uma importante consideração para a calibração de diferentes eventos de cheia. Porém, a quantidade de dados necessária e a sua ocorrência em datas próximas é um fator limitante para que essa análise seja feita.

5.7 MAPAS DE INUNDAÇÃO E ANÁLISE DA COTA EM MANAUS

Para a obtenção dos mapas de inundação, foram utilizados os valores de n de Manning médio mostrados na Tabela 5-6. Os contornos das áreas de inundação para cada perfil foram obtidos no Arc-GIS por meio da ferramenta HEC-GeoRAS.

Os dados de vazão do rio Negro e Solimões foram combinados por vazões de tempos de retorno correspondentes, gerando-se um perfil para cada percentil de excedência (totalizando 100 perfis). Os perfis correspondentes às vazões de tempo de retorno de 50, 20, 5 anos para o rio Solimões e um valor fixo no rio Negro de 40.000 m³/s foram exportados para o Arc-GIS onde também foram desenhados os seus respectivos contornos de área de inundação. Os mapas gerados são representados pelas figuras 5-27 e 5-28 a seguir.

Contornos de Áreas Inundadas para diferentes Tempos de Retorno

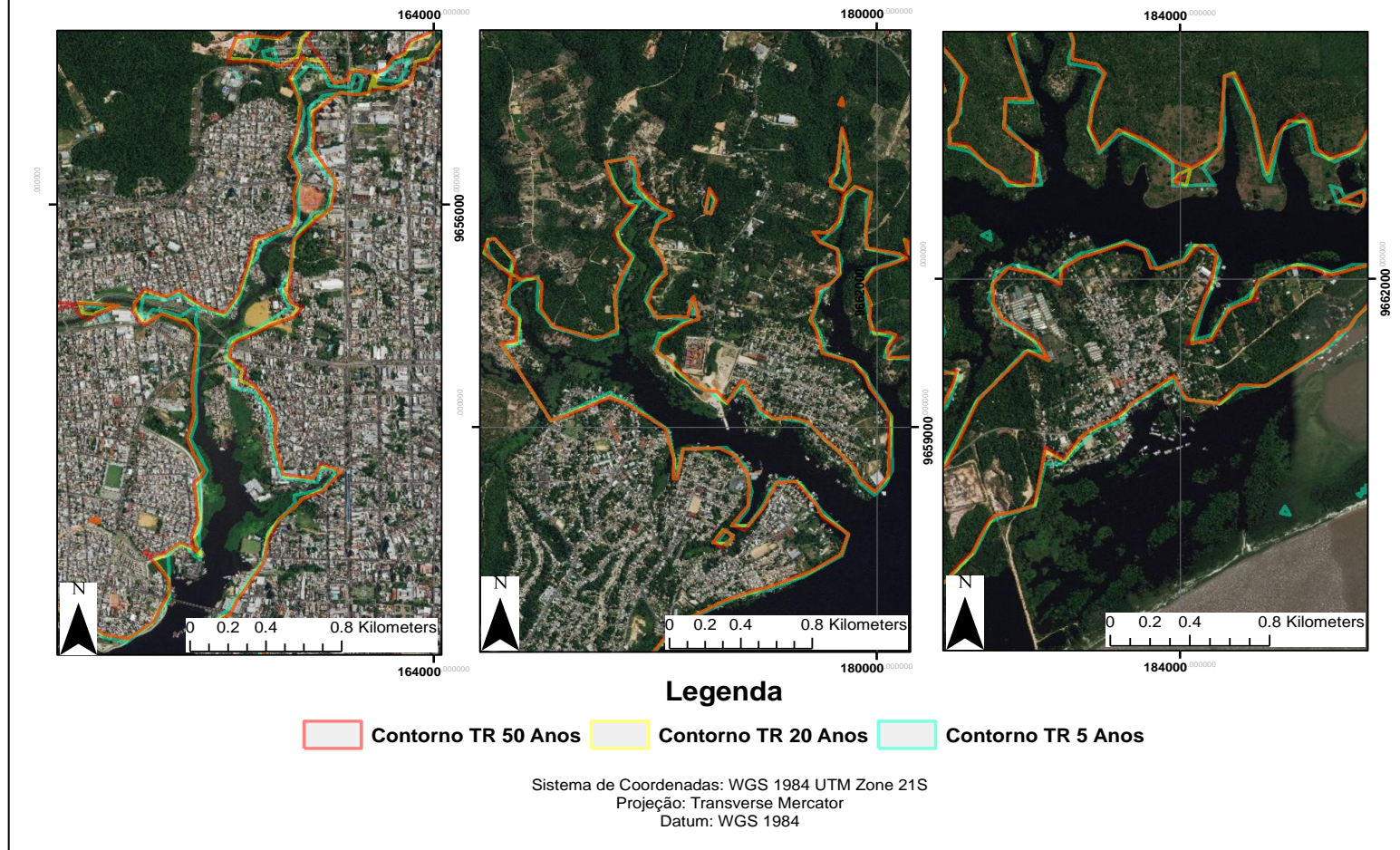


Figura 5-27 – Contorno da mancha de inundação gerada por vazões no Solimões com tempos de retorno diferentes (5, 20 e 50 anos)

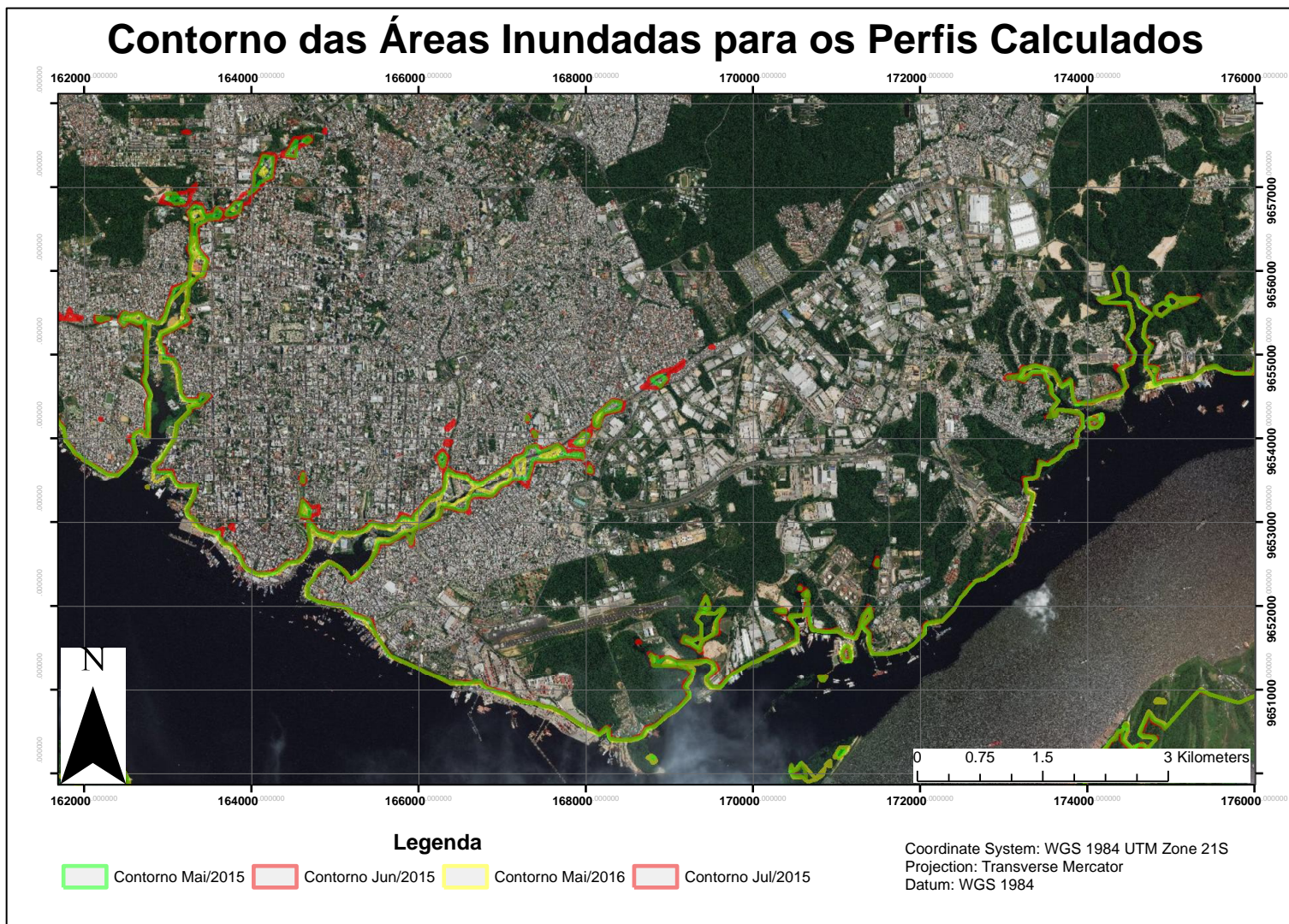


Figura 5-28 – Contorno das áreas inundadas pelos perfis gerados no HEC-RAS

As figuras acima mostram uma variação significativa dos valores de profundidade máxima no canal. Os contornos com tempos de retorno menores e perfis de menor vazão apresentam área significativamente menores do que os demais, principalmente nas regiões dos Igarapés que adentram a área metropolitana de Manaus e a orla fluvial do porto de Manaus. É possível perceber áreas residenciais que são severamente afetadas por cheias extremas principalmente no primeiro quadro da Figura 5-27. Nesses casos, é possível perceber que a profundidade na entrada dos igarapés representa um risco grande à população que habita a margem esquerda do rio Negro.

Enquanto em vazões baixas a água ocupa as áreas mais baixas, em vazões altas quase toda a margem do rio é ocupada pela água. A ocorrência desse fato faz com que a área próxima ao encontro dos rios Negro e Solimões seja alagada por ambos os lados, gerando dificuldades quanto à prevenção de danos à essas áreas por causa da diferença de vazão entre os rios e sua frequência e ocorrência variáveis.

Foram feitos eventos “fictícios” de vazões fixas para cada rio. A faixa de valores de vazão determinada para o rio Negro vai de 10.000 a 66.000 m³/s e a do Solimões vai de 50.000 a 180.000 m³/s, com base no intervalo de vazão das medições de descarga desses rios. A faixa de vazões do Negro foi dividida em intervalos iguais de 2.000 m³/s e do Solimões de 5.000 m³/s.

Dessa forma, foram combinadas 28 vazões na faixa de valores do rio Negro e 26 na faixa de valores do rio Solimões, totalizando 728 combinações de vazões. Para cada combinação, obteve-se um valor de cota em Manaus. Foram criadas séries de vazão fixa no rio Negro (de 10.000 em 10.000 m³/s) e comparados os valores de cota resultantes da combinação de vazão entre os dois rios. Essas séries são mostradas na Figura 5-29 abaixo.

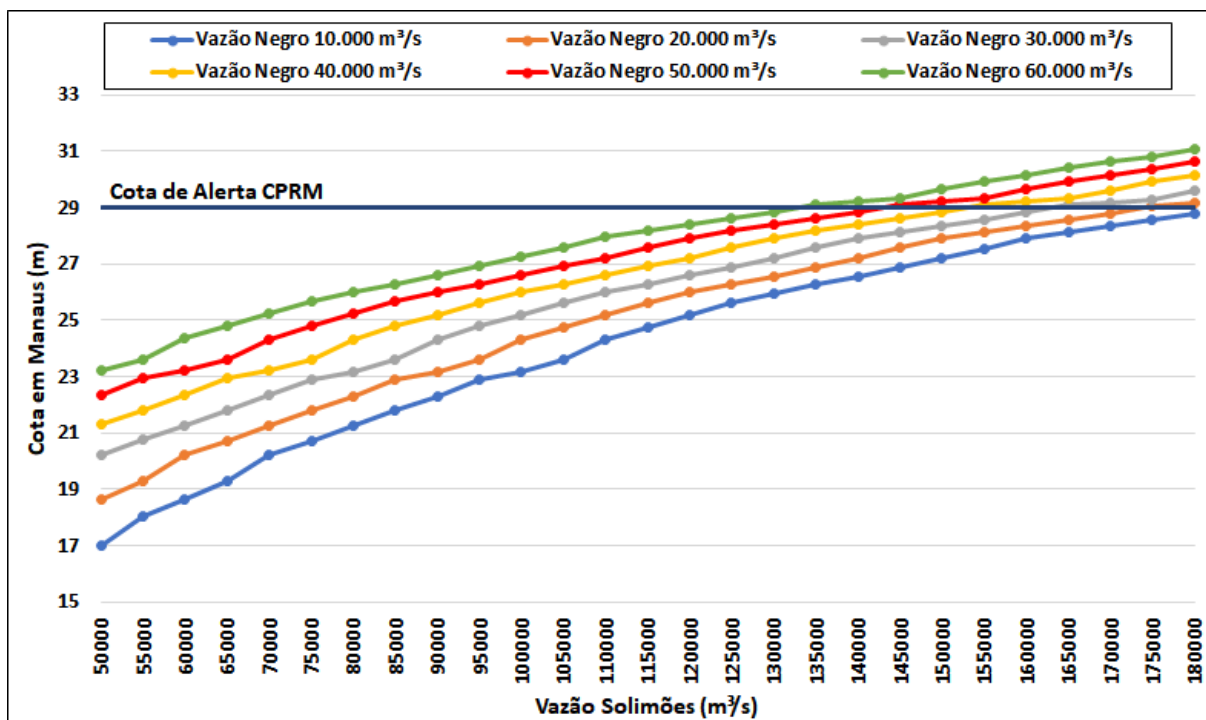


Figura 5-29 – Valores da Cota em Manaus em função da vazão do rio Solimões para um valor fixo de vazão no rio Negro

A partir da Figura 5-29, é possível perceber que a ocorrência de cotas acima do valor de alerta da CPRM em Manaus está diretamente relacionada com a vazão no rio Solimões porque, mesmo em valores de vazão baixa no Negro (20.000 ou 30.000 m³/s) existe a possibilidade dessa cota de alerta ser superada. Isso mostra que o efeito de remanso na confluência entre os dois rios ainda é percebido na cidade de Manaus.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A modelagem hidráulica de fenômenos dessa magnitude apresenta dificuldades que necessitam ser revisadas com cautela e rigor. As condições de contorno do modelo (nível a jusante e vazões a montante) apresentam deficiências claras com relação à disponibilidade dos dados em datas próximas umas das outras. Como foi mostrado em figuras acima, a variação das características do escoamento ocorre de maneira significativa no intervalo de tempo diário. Dessa forma, a aproximação de valores para dias próximos não deve ser extrapolada para um intervalo de tempo relativamente grande (maior do que 5 dias, por exemplo).

A sensibilidade da cota em Manaus é uma variável que depende de diversos fatores externos à cota do próprio rio Negro. Como pode ser observado a partir da Figura 5-31, para uma grande faixa de valores de vazão no rio Negro ocorrem valores de cota acima da cota de alerta da CPRM (29,00 metros) causadas principalmente por ocorrências de vazões altas no rio Solimões. Esse fenômeno é consequência direta da ocorrência de um remanso na região, justificando a dificuldade de aplicação de um modelo unidimensional permanente.

A análise do contorno de áreas inundadas permitiu concluir que as regiões dos igarapés nas proximidades da cidade de Manaus possuem riscos altos de inundação, até mesmo com vazões no rio Solimões com baixo tempo de recorrência (5 anos). Para vazões mais altas, essas inundações chegam a atingir áreas centrais residenciais da cidade e deixam áreas mais baixas extremamente alagadas, desabrigando pessoas e causando perdas materiais e humanas. Esse fenômeno não é restrito apenas à zona metropolitana de Manaus, se estendendo até regiões periféricas e agravando-se em locais onde a topografia do terreno é menos acentuada.

Muitos dos problemas encontrados no trabalho ocorreram devido à falta de dados disponíveis para parâmetros físicos dos rios durante períodos concomitantes em estações fluviométricas nos três rios. Essa disponibilidade deve ser aumentada (por meio de modelagens hidrológicas e ampliação da rede de estações fluviométricas, por exemplo) para que trabalhos futuros possam melhorar os resultados obtidos por modelagem nessa região.

A utilização de estações virtuais se apresenta como uma alternativa viável para a complementar os dados de estações fluviométricas *in situ*. Esse caso pode ser percebido claramente na figura 5-10, que mostra uma diferença quase constante entre a estação virtual amzngo_s3a_0676_00 e a estação fluviométrica Novo Airão. Sua aplicação é limitada, devido ao intervalo de passagem do satélite sobre o local (normalmente entre 10 e 20 dias) e também à proximidade dessas estações virtuais em relação às fluviométricas. Sua aplicação também

pode ser percebida na elaboração da curva-chave no rio Amazonas para utilização como condição de contorno de jusante no HEC-RAS com o uso da estação amz_amz_jas_0152_01.

A análise de frequência de vazões máximas anuais não foi realizada no rio Negro porque as estações fluviométricas presentes nele não possuem dados de vazão durante muitos anos (mais do que 30 anos) e, em alguns anos, possuem vazões provenientes de medições com ADCP apenas em alguns meses do ano, comprometendo a análise de cheia máxima anual se essas falhas ocorrem durante o período de vazões altas.

A execução automática do modelo por meio da linguagem VBA é um produto de extrema importância para este trabalho. Calibrar uma confluência de rios dessa dimensão manualmente é um trabalho árduo e longo, fazendo com que o código desenvolvido aqui possa ser uma alternativa viável para aplicação em outros modelos. A aplicação da rotina de cálculo dos valores de n de Manning a partir de uma distribuição de probabilidade normal (com uma média e desvio padrão recalculados diversas vezes) obteve valores de raiz quadrada do erro médio menores do que 0,5 metros para todos os perfis e chegando a 0,22 em sua melhor análise (jun/2015). Para trabalhos futuros, talvez seja possível elaborar uma rotina completamente automática que ajuste os valores de n de Manning para minimizar os valores de RMSE a cada iteração.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, uma possível análise de chuva-vazão com a separação da área em várias sub-bacias a partir das estações fluviométricas nos rios. A aplicação da metodologia SFD para o rio Negro também pode ser uma alternativa a ser explorada de forma que se consiga valores precisos de declividade no rio, principalmente analisando-se a contração existente antes das estações Paricatuba e Tatu Paricatuba. Para uma melhor análise dos fenômenos fluviais na região, é recomendável a execução do modelo em regime transiente no HEC-RAS de forma a obter manchas de inundação com maior precisão em relação aos eventos de cheia em Manaus.

Outra análise que pode ser feita seria a verificação da frequência coincidente dos eventos de nível e/ou vazão entre os rios Negro, Solimões e Amazonas. Essa análise está sendo feita em caráter inicial por meio das estações Parintins (Amazonas), Manaus (Negro) e Manacapuru (Solimões) e novas discussões poderão ser obtidas e elaboradas em trabalhos posteriores.

O aprimoramento do código em VBA também é um campo de aplicação para os vários casos invocados por outros usuários e também, no caso particular desse trabalho, uma nova análise da faixa de valores de n de Manning, melhorando os parâmetros de geometria do canal

(desenho de áreas inefetivas, talvegue dos rios e extensão das seções transversais) seria uma boa contribuição para a construção de um modelo computacional que represente bem os fenômenos hídricos na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Medição de descarga líquida em grandes rios: manual técnico**. Segunda edição ed. Brasília, DF: Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, 2014.
- ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de Série de Dados de Vazão em Regimes sob Efeito de Remanso Hidráulico Variável: Impactos na Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica da Bacia Amazônica**. [s.l.] Universidade Federal de Viçosa, fev. 2018.
- BARICHIVICH, J. et al. Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. **SCIENCE ADVANCES**, p. 8, 2018.
- BAUGH, C. A. et al. SRTM vegetation removal and hydrodynamic modeling accuracy. **Water Resources Research**, v. 49, n. 9, p. 5276–5289, 2013.
- BEVIS, M. et al. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 16, 2005.
- BORMA, L. D. S.; NOBRE, C. A. **Secas na Amazônia: causas e consequências**. [s.l.] Oficina de Textos, 2016.
- BOURGINE, B.; BAGHDADI, N. Assessment of C-band SRTM DEM in a dense equatorial forest zone. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 337, n. 14, p. 1225–1234, out. 2005.
- BRASIL**. , 2013.
- CALMANT, S.; SEYLER, F. Continental surface waters from satellite altimetry. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 338, n. 14–15, p. 1113–1122, nov. 2006.
- CHAUDHRY, M. H. **Open-channel flow**. 2. ed ed. New York, NY: Springer, 2008.
- CRUZ, D. R.; COSTA, R. C. INUNDAÇÕES EM BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS DE MANAUS – COMUNIDADES BAIRRO UNIÃO E N. S. de FÁTIMA. **REVISTA GEONORTE**, p. 13, 2012.
- DINGMAN, S. L. **Fluvial Hydraulics**. [s.l.] Oxford University Press, 2009.
- Diretoria de Hidrografia e Navegação | DHN**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/>>. Acesso em: 1 jun. 2018.
- DYHOUSE, G. et al. (EDS.). **Floodplain modeling using HEC-RAS**. 1. ed ed. Waterbury, CT: Haestad Press, 2007.
- FARR, T. G. et al. The shuttle radar topography mission. **Reviews of geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.
- FILIZOLA, N. et al. Was the 2009 flood the most hazardous or the largest ever recorded in the Amazon? **Geomorphology**, v. 215, p. 99–105, jun. 2014.
- FRAPPART, F. et al. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, n. 2, p. 252–264, 30 jan. 2006.

G1 AMAZONAS. G1 Amazonas. Disponível em: <<https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/nivel-do-rio-negro-em-manaus-atinge-conta-de-emergencia-para-inundacoes.ghtml>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

GALLANT, J. C.; READ, A. M. A NEAR-GLOBAL BARE-EARTH DEM FROM SRTM. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B4, p. 137–141, 13 jun. 2016.

GOODELL, C. **Breaking the HEC-RAS Code: A User's Guide to Automating HEC-RAS**. [s.l.] H21s, 2014.

HEIN, G. W. **Orthometric height determination using GPS observations and the integrated geodesy adjustment model**. [s.l.] US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Ocean Service, Office of Charting and Geodetic Services, 1985.

HERSCHEL, C. **The two books on the water supply of the city of Rome of Sextus Julius Frontinus**. [s.l.] Longmans, Green, and Company, 1913.

HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

HYBAM, S. **SO HYBAM - The Environmental Research Observatory on the Rivers of the Amazon, Orinoco and Congo Basins**. Disponível em: <<http://www.sohybam.org/index.php/por>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9123/2017 Hydrometry - Stage-fall-discharge relationships**, 2017.

JIN, M.; STEDINGER, J. R. Flood frequency analysis with regional and historical information. **Water Resources Research**, v. 25, n. 5, p. 925–936, maio 1989.

LARSON, K. M. et al. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 24, 2008.

LAURENSEN, E. M. Friction slope averaging in backwater calculations. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 112, n. 12, p. 1151–1163, 1986.

LE COZ, J. et al. Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. **Journal of Hydrology**, v. 509, p. 573–587, fev. 2014.

LEFSKY, M. A. A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System. **Geophysical Research Letters**, v. 37, n. 15, 2010.

LIDDLE, L. A. Orthometric height determination by GPS. **Surveying and mapping**, v. 49, n. 1, p. 5–16, 1989.

LIMA, C. H. R. et al. A climate informed model for nonstationary flood risk prediction: Application to Negro River at Manaus, Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 594–602, mar. 2015.

LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. **Water resource systems planning and analysis**. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1981.

MANSANAREZ, V. et al. Bayesian analysis of stage-fall-discharge rating curves and their uncertainties: STAGE-FALL-DISCHARGE RATING CURVES. **Water Resources Research**, v. 52, n. 9, p. 7424–7443, set. 2016.

MARINHO, R. R.; SILVA, V. C.; FILIZOLA, N. Detecção da Variabilidade do Nível do Rio Branco (RR) e do Rio Jamari (RO) por Satélites Altimétricos. ago. 2017.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 3–30, jan. 1991.

MOREIRA, D. M. Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos hidrológicos na região amazônica. 2010.

MOREIRA, D. M. **Godésia Aplicada ao Monitoramento Hidrológico da Bacia Amazônica**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, set. 2016.

MORRIS, H. M.; WIGGERT, J. M. Applied hydraulics in engineering. In: **Applied hydraulics in engineering**. [s.l.] Ronald Press, 1972.

PAIVA, R.; O'LOUGHLIN, F. **Bare-Earth SRTM**. Disponível em: <<https://data.bris.ac.uk/data/dataset/10tv0p32gizt01nh9edcjd6wa>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

PASSAIA, O. A. **Observação da Altimetria do Satélite ICESAT em Cursos D'água para Aplicações Hidrológicas**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dez. 2016.

PETERSEN-ØVERLEIR, A.; REITAN, T. Bayesian analysis of stage-fall-discharge models for gauging stations affected by variable backwater. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 21, p. 3057–3074, 15 out. 2009.

PINTO, E. J. DE A.; NAGHETTINI, M. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.

Portal CPRM. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Noticias/Superintendencia-de-Manaus-divulga-dados-sobre-cheia-no-rio-Negro-3755.html>>. Acesso em: 25 jun. 2018.

Portal CPRM. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Eventos-Criticos-35>>. Acesso em: 25 out. 2018.

PORTO, R. DE M. Hidráulica básica. **São Carlos: EESC/USP**, v. 4, 1998.

REIS, D. S.; STEDINGER, J. R. Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information. **Journal of Hydrology**, v. 313, n. 1–2, p. 97–116, nov. 2005.

RHODES, D. G. Gradually varied flow solutions in Newton-Raphson form. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 124, n. 4, p. 233–235, 1998.

RONCHAIL, J. et al. Inundations in the Mamoré basin (south-western Amazon—Bolivia) and sea-surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. **Journal of Hydrology**, v. 302, n. 1, p. 223–238, 1 fev. 2005.

ROUSE, H.; INCE, S. **History of Hydraulics, by Hunter Rouse and Simon Ince.** [s.l.] Dover Publications, 1963.

SATYAMURTY, P. et al. A quick look at the 2012 record flood in the Amazon Basin: AMAZON FLOOD IN 2012. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 7, p. 1396–1401, 16 abr. 2013.

SENA, J. A. et al. Extreme Events of Droughts and Floods in Amazonia: 2005 and 2009. **Water Resources Management**, v. 26, n. 6, p. 1665–1676, abr. 2012.

SIMARD, M. et al. Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 116, n. G4, 2011.

SOUSA, A. C. DE et al. Interpolação diária de séries temporais altimétricas ao longo do rio Amazonas. nov. 2012.

S.PAULO, F. DE. **Amazonas tem 35 cidades em emergência devido a cheias de rios - 03/06/2013** - **Cotidiano.** Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2013/06/1289079-amazonas-tem-35-cidades-em-emergencia-devido-a-cheias-de-rios.shtml>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

S.PAULO, F. DE. **Em Manaus, famílias vivem dois meses por ano em casas inundadas de água suja - Amazonas - Natureza do Desastre - Folha de S.Paulo.** Disponível em: <<http://temas.folha.uol.com.br/natureza-do-desastre/amazonas/em-manaus-familias-vivem-dois-meses-por-ano-em-casas-inundadas-de-agua-suja.shtml>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

Theia - Land Data Centre. Disponível em: <<http://www.theia-land.fr/>>. Acesso em: 29 out. 2018.

VALE, R. DO et al. A cheia de 2009 na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 577–586, 1 dez. 2011.

VAUCHEL, P. **Estudo da cheia de 2014 na bacia do rio Madeira.** Institut de recherche pour le développement: SO HYBAM, abr. 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CÓDIGO DE CALIBRAÇÃO AUTOMÁTICA (VBA)

Sub Calibration()

```
*****  
*****
```

'Esse código tem como objetivo a calibração de um modelo do hec-ras que já possui parâmetros geométricos, condições de

'contorno introduzidas e níveis d'água observados que servirão para calibrar o valor do n de Manning do canal e da

'planície de inundação. Esse código destina-se à calibração dos Rios Negro, Solimões e Amazonas, mais precisamente no

'encontro das águas na cidade de Manaus. Foram usados os valores de RMSE para calibração

'dos valores de n de Manning em relação aos níveis d'água obtidos pelo modelo e observados em estações fluviométricas

```
*****  
*****
```

cells.Select

cells.Clear

Range("A1").Select 'ativa a célula A1

Dim RC As New HECRASController 'dimensiona RC como uma nova instância de um objeto como o HECRASController

Dim strRasProject As String 'define a variável Filename como uma string

Dim lngMessages As Long 'define a variável lngMessages como do tipo long

Dim strMessages() As String 'define a matriz strMessages() para retornar as mensagens do HECRASController

Dim blnDidItCompute As Boolean 'operador booleano que indica se o hec-ras rodou corretamente

strRasProject = "C:\Users\gabri\Map\rasamazonas4\rasmazonas4.prj" 'localização do projeto no computador

'algumas vezes o projeto pode dar um erro porque o caminho do arquivo é muito longo _

para resolver esse problema basta mover o projeto para uma pasta mais acima (C: por exemplo)

```

RC.Project_Open strRasProject 'abre o projeto designado à variável strFilename

RC.Compute_HideComputationWindow 'computa a simulação mas esconde a janela de
computação

blnDidItCompute = RC.Compute_CurrentPlan(IngMessages, _
    strMessages()) 'operador booleano que servirá para verificar o resultado do processamento
do modelo

'Aqui é impresso uma mensagem na tela de acordo com o resultado do processamento do
modelo

If blnDidItCompute = False Then
    MsgBox "Erro encontrado na computação do modelo"
Else
    MsgBox "Projeto computado corretamente!"
End If

'Aqui será determinado o número de perfis que o projeto possui
Dim lngProfiles As Long
lngProfiles = RC.SteadyFlow_nProfile

'Cria uma variável que servirá para armazenar os nomes dos perfis existentes
Dim strProfileName() As String

'Função Output que pega o número e nome dos perfis existentes no projeto PREVIAMENTE
computado.
RC.Output_GetProfiles lngProfiles, strProfileName()

'Fala para o usuário quantos são e quais são os perfis para o plano ATUAL.
Dim nperfis As Integer 'número de perfis no plano
Dim strListOfProfiles As String 'lista com os perfis do plano
strListOfProfiles = "Perfis do Plano Corrente" & Chr(13)

'Estrutura de repetição que preenche a lista com o nome dos perfis e o seu respectivo número
For nperfis = 1 To lngProfiles
    strListOfProfiles = strListOfProfiles & nperfis & Chr(9) & _
        strProfileName(nperfis) & Chr(13)
Next nperfis

```

MsgBox strListOfProfiles

Dim ContadorPerfis As Long

ContadorPerfis = 1

'Aqui serão classificadas as faixas de n de Manning para o canal e para a planície de inundação

'O n de Manning no canal irá variar de 0,004 em 0,004 no intervalo de valores [0,02; 0,04] _
e o n de Manning da planície (esquerda e direita) irá variar de 0,008 em 0,008 no intervalo de valores [0,04; 0,08]

Dim ContadorCanal As Integer

Dim ContadorPlanície As Integer

Dim NCanal As Single, NPlanície As Single

Dim strMsgErro As String

Dim a As Integer, b As Integer, c As Integer

Dim lngRio As Long, strRio() As String

Dim lngTrecho As Long, strTrecho() As String

Dim lngSeção As Long, strSeção() As String

Dim strTipoNó() As String

For nperfis = 1 To lngProfiles

For ContadorPlanície = 0 To 5

NPlanície = (ContadorPlanície * 0.008) + 0.04

ContadorCanal = 0

For ContadorCanal = 0 To 5

NCanal = (ContadorCanal * 0.004) + 0.02

RC.Geometry_GetRivers lngRio, strRio()

For a = 1 To lngRio

RC.Geometry_GetReaches CLng(a), lngTrecho, strTrecho()

For b = 1 To lngTrecho

RC.Geometry_GetNodes CLng(a), CLng(b), lngSeção, strSeção(), strTipoNó()

For c = 1 To lngSeção

```
RC.Geometry_SetMann_LChR strRio(a), strTrecho(b), strSeção(c), NPlanicie,  
NCanal, NPlanicie, strMensgErro
```

```
Next c
```

```
Next b
```

```
Next a
```

```
RC.Compute_HideComputationWindow
```

```
blnDidItCompute = RC.Compute_CurrentPlan(lngMessages, strMessages())
```

'agora devemos usar o HECRASController para achar o número de estações nos rios do projeto, seus nomes e os tipos de nós com o comando Geometry_GetNodes _

esse comando requer 5 argumentos: o ID do rio, o ID do ramo, o número de nós, uma matriz das estações e uma matriz com os tipos de nós _

as duas matrizes são parâmetros de referência que o RAS Controller vai popular dentro do comando Geometry_GetNodes antes de mandar de volta para o programa _

essas 5 variáveis devem ser previamente declaradas para que o comando Geometry_GetNodes possa ser chamado

```
Dim lngRiver As Long, strRiver() As String 'dimensiona as variáveis que serão  
populadas com os números e nomes dos rios
```

```
Dim lngRiverID As Long, lngReachID As Long, strReach() As String 'dimensiona a ID  
do rio e do ramo como váriaveis do tipo long
```

```
Dim lngNum_RS As Long 'Número de nós do tipo long (o HECRASController vai  
popular essa váriavel)
```

```
Dim strRS() As String 'Matriz com os nomes das estações
```

```
Dim strNodeType() As String 'Matriz com os tipos de nós
```

```
RC.Geometry_GetRivers lngRiver, strRiver()
```

```
Dim ContadorRiver As Long
```

```
Dim ContadorReach As Long
```

```
ContadorRiver = 1
```

```
ContadorReach = 1
```

```
Dim Rio As Integer
```

```
For Rio = 1 To lngRiver
```

```

RC.Geometry_GetReaches ContadorRiver, lngReachID, strReach()
Dim j As Integer
For j = 1 To lngReachID
    RC.Geometry_GetNodes ContadorRiver, ContadorReach, lngNum_RS, strRS(),
strNodeType()

```

'Agora que temos as estações e os tipos de nós, podemos obter saídas a partir do HECRASController. Devem ser declaradas duas variáveis antes desse processo _

Essas variáveis do tipo Single serão populadas com os níveis d'água e os valores de velocidades _

Como o número de seções transversais já foi determinado, essas variáveis podem ser redimensionadas para o número de estações: lngNum_RS. _

Finalmente, para que o HECRASController saiba quais variáveis retornar, ele precisa saber os números ID das variáveis requeridas. _

O ID de "Water Surface Elevation" é 2 e o de "Average Velocity for the Total Cross Section" é 23 (esses ID's estão disponíveis no apêndice E do livro)

```

Dim sngWS() As Single 'dimensiona o nível d'água como uma matriz do tipo single
Dim sngObsWS() As Single 'dimensiona o nível d'água observado como uma
matriz do tipo single
Dim sngMannEsq() As Single, sngMannCanal() As Single, sngMannDir() As
Single 'dimensiona os valores de n de Manning da margem esquerda, canal e _
margem direita, respectivamente

```

'redimensiona os valores de 1 para o número de estações de cada rio e trecho

```

ReDim sngWS(1 To lngNum_RS)
ReDim sngObsWS(1 To lngNum_RS)
ReDim sngMannEsq(1 To lngNum_RS)
ReDim sngMannCanal(1 To lngNum_RS)
ReDim sngMannDir(1 To lngNum_RS)

```

```

Dim lngWS_ID As Long 'dimensiona a variável como do tipo long

```

```

Dim lngObsWS_ID As Long 'dimensiona a variável como do tipo long

```

Dim lngMannEsq_ID As Long, lngMannCanal_ID As Long, lngMannDir_ID As Long

lngWS_ID = 2

lngObsWS_ID = 180

lngMannEsq_ID = 44

lngMannCanal_ID = 45

lngMannDir_ID = 46

Para retornar os resultados utiliza-se a função Output_NodeOutput. Por ser uma função, deve-se igualar variáveis declaradas à ela: sngWS() e sngAvgVel(). _

Essa função necessita de argumentos para os IDs dos rios e dos ramos, o ID da estação, um operador booleano "UPDN" (se declarado como 0 resultará _

na seção à montante de uma ponte por exemplo; no caso das seções transversais esse valor é irrelevante, o número do perfil e o ID da variável do HECRAS. _

Como a função só pode retornar uma saída para cada seção transversal por iteração, foi criado um loop "For-Next" para popular as matrizes sngWS() sngAvgVel _

O bloco "If-Then" é usado para retirar as estações que não são seções transversais, que poderiam ser: pontes, bueiros, estruturas em linha ou laterais, etc _

Os tipos de nós são retornados a partir da subrotina Geometry_GetNodes são do tipo String com dois caracteres IDs. Por exemplo: "BR" para ponte e _

"IS" para uma estrutura em linha. Seções transversais são retornadas como Strings vazias, que são "". Para retornar resultados apenas de seções transv. _

o bloco "If-Then" procura pelos nós do tipo "", e passa todo o resto.

Dim x As Long 'índice para o loop "For-Next"

For x = 1 To lngNum_RS 'para cada seção transversal executar:

If strNodeType(x) = "" Then 'verifica se o nó é do tipo correspondente à uma seção transversal

sngWS(x) = RC.Output_NodeOutput(ContadorRiver, ContadorReach, x, 0, ContadorPerfis, lngWS_ID) 'matriz do tipo single com os resultados dos níveis d'água para as XS

sngObsWS(x) = RC.Output_NodeOutput(ContadorRiver, ContadorReach, x, 0, ContadorPerfis, lngObsWS_ID) 'matriz com os níveis d'água observados para as XS

sngMannEsq(x) = RC.Output_NodeOutput(ContadorRiver, ContadorReach, x, 0, ContadorPerfis, lngMannEsq_ID) 'matriz com o n de Manning da margem esquerda


```

        sngMannCanal(x) = RC.Output_NodeOutput(ContadorRiver,
ContadorReach, x, 0, ContadorPerfis, lngMannCanal_ID) 'matriz com o n de Manning do canal
        sngMannDir(x) = RC.Output_NodeOutput(ContadorRiver, ContadorReach,
x, 0, ContadorPerfis, lngMannDir_ID) 'matriz com o n de Manning da margem direita
        strRS(x) = RC.Geometry.NodeRS(ContadorRiver, ContadorReach, x)
'preenche a matriz com o nome das estações dos rios e dos ramos
    End If
Next x

```

'Agora será criada uma nova planilha para mostrar os resultados obtidos de forma tabular no Excel. _

Será feito um "For-Next" loop que verifica se uma planilha com o nome "RASResults" já existe. Se sim, o código simplesmente à selecionará. _

Se não, o código irá criar uma nova planilha com esse nome. Essa planilha terá as seções transversais, o nível d'água e os valores de n de Manning.

Dim blnSheetExists As Boolean 'variável booleana que será "True" se uma planilha com o nome do perfil atual já existe.

```

For k = 1 To Sheets.Count
    If Sheets(k).Name = strProfileName(nperfis) Then
        blnSheetExists = True
    End If
Next k

```

```

If blnSheetExists = False Then
    Sheets.Add
    ActiveSheet.Name = strProfileName(nperfis)
End If

```

'Agora será populada a planilha criada com os dados. Se a planilha já existe, deve-se deletar qualquer data que esteja nela para evitar _

um conflito de dados com os novos dados. Serão criados também títulos para as colunas da tabela de saída dos dados.

'define o valor da célula atual

```
ActiveCell.Value = "Resultados do Rio: " & strRiver(Rio) & "Trecho: " & strReach(j) & "Dados de vazão do perfil: " & strProfileName(nperfis)
```

```
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "Seção Transversal"
```

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate 'seleciona a célula imediatamente à direita da atual

```
ActiveCell.Value = "Altura D'água Calculada(m)"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "Altura D'água Observada(m)"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "n de Manning Margem Esquerda"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "n de Manning Canal"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "n de Manning Margem Direita"
```

'Agora serão populadas as células abaixo das colunas nomeadas anteriormente com os dados do HEC-RAS. Para isso, será utilizada a função _

"Offset" que irá percorrer por toda a tabela movendo a célula atual para um valor específico de colunas e linhas. O primeiro argumento dessa função _

é o número de linhas que se deseja percorrer, o segundo é o número de colunas. A função "Round" será também usada para arredondar os valores encontrados. _

Essa tabela arredondará os valores da altura d'água para duas casas decimais e os valores de n de Manning para três. Vale notar que essa função não só _

arredonda os valores para x casas decimais, ela também os converte para uma valor do tipo string. É necessário então declarar variáveis desse tipo _

para cada valor de saída para que o código funcione corretamente.

```
Dim strWSEL As String, strObsWSEL As String, strMannEsq As String,  
strMannCanal As String, strMannDir As String
```

```
ActiveCell.Offset(1, -5).Activate
```

```
For l = 1 To lngNum_RS
```

```
strWSEL = Round(sngWS(l), 2)
```

```
strObsWSEL = Round(sngObsWS(l), 2)
```

```
strMannEsq = Round(sngMannEsq(1), 3)
strMannCanal = Round(sngMannCanal(1), 3)
strMannDir = Round(sngMannDir(1), 3)
```

```
Dim i As Integer
```

```
If strNodeType(1) = "" Then
    ActiveCell.Value = strRS(1)
    ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
    ActiveCell.Value = strWSEL
    ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
    ActiveCell.Value = strObsWSEL
    ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
    ActiveCell.Value = strMannEsq
    ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
    ActiveCell.Value = strMannCanal
    ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
    ActiveCell.Value = strMannDir
    ActiveCell.Offset(1, -5).Activate
```

```
End If
```

```
Next i
```

```
ContadorReach = ContadorReach + 1
```

```
Next j
```

```
ContadorReach = 1
```

```
ContadorRiver = ContadorRiver + 1
```

```
Next Rio
```

```
blnSheetExists = False
```

'Aqui será feita uma tabela para análise dos dados de nível d'água observados e calculados

```
ActiveCell.Offset(-207, 9).Activate
```

```
'Preenchimento dos títulos das colunas da tabela
```

ActiveCell.Value = "Rio"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.Value = "Seção Transversal"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.Value = "Altura D'água Calculada (m)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.Value = "Altura D'água Observada (m)"

'Preenchimento da primeira seção transversal

ActiveCell.Offset(1, -3).Activate

ActiveCell.Value = strRiver(1)

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(153469.2,RC[-10]:R[205]C[-5],1,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(153469.2,RC[-11]:R[205]C[-6],2,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(153469.2,RC[-12]:R[205]C[-7],3,FALSE)"

'Preenchimento da segunda seção transversal

ActiveCell.Offset(1, -3).Activate

ActiveCell.Value = strRiver(1)

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(129208.9,R[-1]C[-10]:R[204]C[-5],1,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(129208.9,R[-1]C[-11]:R[204]C[-6],2,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(129208.9,R[-1]C[-12]:R[204]C[-7],3,FALSE)"

'Preenchimento da terceira seção transversal

ActiveCell.Offset(1, -3).Activate

ActiveCell.Value = strRiver(1)

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(83056.26,R[-2]C[-10]:R[203]C[-5],1,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(83056.26,R[-2]C[-11]:R[203]C[-6],2,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(83056.26,R[-2]C[-12]:R[203]C[-7],3,FALSE)"

'Preenchimento da quarta seção transversal

ActiveCell.Offset(1, -3).Activate

ActiveCell.Value = strRiver(2)

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(47630.11,R[-3]C[-10]:R[202]C[-5],1,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(47630.11,R[-3]C[-11]:R[202]C[-6],2,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(47630.11,R[-3]C[-12]:R[202]C[-7],3,FALSE)"

'Preenchimento da quinta seção transversal

ActiveCell.Offset(1, -3).Activate

ActiveCell.Value = strRiver(3)

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(18874.36,R[-4]C[-10]:R[201]C[-5],1,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(18874.36,R[-4]C[-11]:R[201]C[-6],2,FALSE)"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(18874.36,R[-4]C[-12]:R[201]C[-7],3,FALSE)"

'Preenchimento da sexta seção transversal

ActiveCell.Offset(1, -3).Activate

ActiveCell.Value = strRiver(4)

```

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(29505.95,R[-5]C[-10]:R[200]C[-5],1,FALSE)"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(29505.95,R[-5]C[-11]:R[200]C[-6],2,FALSE)"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=VLOOKUP(29505.95,R[-5]C[-12]:R[200]C[-7],3,FALSE)"

```

'Agora será chamada a função RMSE para calcular o erro quadrático médio entre os valores observados e modelados

```

ActiveCell.Offset(-6, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Raiz do Erro Quadrático Médio (m)"
Columns("J:N").EntireColumn.AutoFit
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
ActiveCell.FormulaR1C1 = "=RMSE(RC[-2],RC[-1],R[1]C[-2],R[1]C[-1],R[2]C[-2],R[2]C[-1],R[3]C[-2],R[3]C[-1],R[4]C[-2],R[4]C[-1],R[5]C[-2],R[5]C[-1])"
ActiveCell.Offset(207, -13).Activate

```

```

Next ContadorCanal
Next ContadorPlanicie
MsgBox ("Perfil Concluído!")
ContadorPerfis = ContadorPerfis + 1
Next nperfis

```

'Para que o HEC-RAS não fique executando e abrindo uma janela a cada vez que o código acima é executado, é utilizado a função "QuitRAS" _

para fechar o HEC-RAS. Para que o usuário possa ver os resultados obtidos no próprio HEC-RAS, é utilizada uma caixa de mensagem que _

pausa a execução do código até que o usuário pressione o botão OK. Quando o botão é pressionado o HEC-RAS é fechado.

```

MsgBox "Programa Concluído!"
RC.Project_SaveAs ("Projeto Calibração Automática")

```

RC.QuitRas

End Sub

Function RMSE(Modelado1 As Double, Observado1 As Double, Modelado2 As Double, Observado2 As Double, Modelado3 As Double, Observado3 As Double, Modelado4 As Double, Observado4 As Double, Modelado5 As Double, Observado5 As Double, Modelado6 As Double, Observado6 As Double) As Double

Dim Somatorio As Double

Somatorio = ((Modelado1 - Observado1) ^ 2) + ((Modelado2 - Observado2) ^ 2) + ((Modelado3 - Observado3) ^ 2) + ((Modelado4 - Observado4) ^ 2) + ((Modelado5 - Observado5) ^ 2) + ((Modelado6 - Observado6) ^ 2)

RMSE = ((Somatorio / 6) ^ (1 / 2))

End Function

Sub MonteCarloNValues()

'Demonstra uma modelagem no HEC-RAS em um Experimento Monte Carlo

'Elaborado por Christopher Goodell

'7 de Novembro, 2013

'Adaptado por Gabriel Alcântara Puntel Ferreira

'14 de Novembro, 2018

'Essa subrotina gera valores aleatórios sob uma distribuição _
normal e aplica esse valor de N ao canal principal _
de cada seção transversal. O preçto do HEC-RAS _
é re-computado a cada realização. Níveis d'água _
calculados são guardados ao fim de cada realização _
e arranjados para determinar as probabilidades _
de excedência de elevação (percentis)

'Testado com dados próprios elaborados no âmbito do projeto final

'Pode ser modificado para funcionar com outros conjuntos de dados

'Marca o tempo de cada iteração

Dim timStartTime As Variant, timNowTime As Variant, _

timElapseTime As Variant

timStartTime = Timer

'Define a média e desvio padrão dos valores de N de Manning que serão utilizados em cada Rio

Dim dblMediaAmazonas As Double

Dim dblDesvPadAmazonas As Double

Dim dblMediaNegro As Double

Dim dblDesvPadNegro As Double

Dim dblMediaSolimões As Double

Dim dblDesvPadSolimões As Double

dblMediaAmazonas = 0.0243

dblMediaNegro = 0.0325

dblMediaSolimões = 0.0403

dblDesvPadAmazonas = 0.0022 'Isso determina 2 desvios-padrão para +- 0.01 (95% dos valores)

dblDesvPadNegro = 0.0038

dblDesvPadSolimões = 0.0052

Dim RC As New HECRASController

Dim strRASProj As String 'Projeto do Hec-RAS

strRASProj = "C:\Users\gabri\Map\rasamazonas4\rasmazonasCCVirtual.prj"

'Abre o projeto pela variável strRASProj

RC.Project_Open (strRASProj)

Dim lngProfiles As Long

Dim strProfileName() As String

'Função Output que pega o número e nome dos perfis existentes no projeto computado

RC.Output_GetProfiles lngProfiles, strProfileName()

'Perfil 1

Dim sngWSElevAmazonasMont1() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação mais a montante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngWSElevAmazonasJus1() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação mais a jusante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngWSElevCareiro1() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Careiro para cada iteração.

Dim sngWSElevNegro1() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Negro para cada iteração.

Dim sngWSElevSolimões1() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Solimões para cada iteração.

Dim sngObsWSElevAmazonasMont1() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação mais a montante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngObsWSElevAmazonasJus1() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação mais a jusante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngObsWSElevCareiro1() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Careiro para cada iteração.

Dim sngObsWSElevNegro1() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Negro para cada iteração.

Dim sngObsWSElevSolimões1() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Solimões para cada iteração.

'Perfil 2

Dim sngWSElevAmazonasMont2() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação mais a montante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngWSElevAmazonasJus2() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação mais a jusante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngWSElevCareiro2() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Careiro para cada iteração.

Dim sngWSElevNegro2() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Negro para cada iteração.

Dim sngWSElevSolimões2() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Solimões para cada iteração.

Dim sngObsWSElevAmazonasMont2() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação mais a montante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngObsWSElevAmazonasJus2() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação mais a jusante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngObsWSElevCareiro2() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Careiro para cada iteração.

Dim sngObsWSElevNegro2() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Negro para cada iteração.

Dim sngObsWSElevSolimões2() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Solimões para cada iteração.

'Perfil 3

Dim sngWSElevAmazonasMont3() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação mais a montante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngWSElevAmazonasJus3() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação mais a jusante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngWSElevCareiro3() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Careiro para cada iteração.

Dim sngWSElevNegro3() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Negro para cada iteração.

Dim sngWSElevSolimões3() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Solimões para cada iteração.

Dim sngObsWSElevAmazonasMont3() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação mais a montante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngObsWSElevAmazonasJus3() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação mais a jusante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngObsWSElevCareiro3() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Careiro para cada iteração.

Dim sngObsWSElevNegro3() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Negro para cada iteração.

Dim sngObsWSElevSolimões3() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Solimões para cada iteração.

'Perfil 4

Dim sngWSElevAmazonasMont4() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação mais a montante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngWSElevAmazonasJus4() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação mais a jusante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngWSElevCareiro4() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Careiro para cada iteração.

Dim sngWSElevNegro4() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Negro para cada iteração.

Dim sngWSElevSolimões4() As Single 'A array de níveis d'água computados na estação do Solimões para cada iteração.

Dim sngObsWSElevAmazonasMont4() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação mais a montante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngObsWSElevAmazonasJus4() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação mais a jusante do Amazonas para cada iteração.

Dim sngObsWSElevCareiro4() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Careiro para cada iteração.

Dim sngObsWSElevNegro4() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Negro para cada iteração.

Dim sngObsWSElevSolimões4() As Single 'A array de níveis d'água observados na estação do Solimões para cada iteração.

'Define as variáveis usadas no loop For-Next

Dim lngNumMessages As Long

Dim strMessages() As String

Dim blnDidItCompute As Boolean

Dim strMensgErro As String

Dim sngNL As Single, sngNR As Single, sngNCh As Single

Dim sngNChAmazonas As Single, sngNChNegro As Single, sngNChSolimões As Single

Dim sngSumMeanAmazonas As Single, sngCompMeanAmazonas As Single

Dim sngSumMeanNegro As Single, sngCompMeanNegro As Single

Dim sngSumMeanSolimões As Single, sngCompMeanSolimões As Single

Dim sngAllRandNAmazonas() As Single

Dim sngAllRandNNegro() As Single

Dim sngAllRandNSolimões() As Single

'Faz o loop por cada realização

Dim intNumRealizations As Integer

intNumRealizations = 100 'Esse número deve ser suficientemente _

grande para atingir convergência estatística com relação a _

média e desvio padrão computados do n de Manning _

ReDim sngAllRandNAmazonas(1 To intNumRealizations)

ReDim sngAllRandNNegro(1 To intNumRealizations)

ReDim sngAllRandNSolimões(1 To intNumRealizations)

Dim i As Integer

'Loop com as realizações de cada valor aleatório gerado

For i = 1 To intNumRealizations

'Gera o valor de n de manning para ser utilizado _

na amostragem aleatória com relação a distribuição normal

Randomize

sngNL = 0.06

sngNChAmazonas = Application.WorksheetFunction.Norm_Inv(Rnd(),
dblMediaAmazonas, dblDesvPadAmazonas)

sngNChNegro = Application.WorksheetFunction.Norm_Inv(Rnd(), dblMediaNegro,
dblDesvPadNegro)

sngNChSolimões = Application.WorksheetFunction.Norm_Inv(Rnd(),
dblMediaSolimões, dblDesvPadSolimões)

sngNR = 0.06

'Calcula a média dos valores aleatórios da distribuição normal gerados

sngAllRandNAmazonas(i) = sngNChAmazonas

sngSumMeanAmazonas = sngSumMeanAmazonas + sngNChAmazonas

sngCompMeanAmazonas = Round((sngSumMeanAmazonas / i), 4)

sngAllRandNNegro(i) = sngNChNegro

sngSumMeanNegro = sngSumMeanNegro + sngNChNegro

sngCompMeanNegro = Round((sngSumMeanNegro / i), 4)

sngAllRandNSolimões(i) = sngNChSolimões

sngSumMeanSolimões = sngSumMeanSolimões + sngNChSolimões

sngCompMeanSolimões = Round((sngSumMeanSolimões / i), 4)

'Aqui são definidos os parâmetros para a realização _

dos loops For-Next a seguir

Dim a As Integer, b As Integer, c As Integer

Dim lngRio As Long, strRio() As String

Dim lngTrecho As Long, strTrecho() As String

Dim lngSeção As Long, strSeção() As String

Dim strTipoNó() As String

RC.Geometry_GetRivers lngRio, strRio()

For a = 1 To lngRio

'Cada If-Then a seguir especifica o valor do n de Manning _

de acordo com o código do rio (1 = Amazonas, 2 = Amazonas (Careiro) _

3 = Negro e 4 = Solimões)

If a = 1 Then

sngNCh = sngNChAmazonas

End If

If a = 2 Then

sngNCh = sngNChAmazonas

End If

If a = 3 Then

sngNCh = sngNChNegro

End If

If a = 4 Then

sngNCh = sngNChSolimões

End If

RC.Geometry_GetReaches CLng(a), lngTrecho, strTrecho()

For b = 1 To lngTrecho

RC.Geometry_GetNodes CLng(a), CLng(b), lngSeção, strSeção(), strTipoNó()

For c = 1 To lngSeção

'A função abaixo altera o valor (Esq.,Canal,Dir.) do n de Manning de uma seção em um trecho de um rio

RC.Geometry_SetMann_LChR strRio(a), strTrecho(b), strSeção(c), sngNL, sngNCh, sngNR, strMensgErro

Next c

Next b

Next a

'Salva o projeto com os novos valores de n de Manning

RC.Project_Save

'Computa o projeto do HEC-RAS

RC.Compute_HideComputationWindow

blnDidItCompute = RC.Compute_CurrentPlan(lngNumMessages, strMessages())

'Redimensiona cada uma das arrays para o tamanho de cada iteração. _

A palavra-chave "Preserve" faz com que os valores anteriores da _

array não sejam perdidos após cada processo

'Perfil 1

ReDim Preserve sngWSElevAmazonasMont1(i)

ReDim Preserve sngWSElevAmazonasJus1(i)

ReDim Preserve sngWSElevCareiro1(i)

ReDim Preserve sngWSElevNegro1(i)

ReDim Preserve sngWSElevSolimões1(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevAmazonasMont1(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevAmazonasJus1(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevCareiro1(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevNegro1(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevSolimões1(i)

'Perfil 2

ReDim Preserve sngWSElevAmazonasMont2(i)

ReDim Preserve sngWSElevAmazonasJus2(i)

ReDim Preserve sngWSElevCareiro2(i)

ReDim Preserve sngWSElevNegro2(i)

ReDim Preserve sngWSElevSolimões2(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevAmazonasMont2(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevAmazonasJus2(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevCareiro2(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevNegro2(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevSolimões2(i)

'Perfil 3

ReDim Preserve sngWSElevAmazonasMont3(i)

ReDim Preserve sngWSElevAmazonasJus3(i)

ReDim Preserve sngWSElevCareiro3(i)

ReDim Preserve sngWSElevNegro3(i)

ReDim Preserve sngWSElevSolimões3(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevAmazonasMont3(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevAmazonasJus3(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevCareiro3(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevNegro3(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevSolimões3(i)

'Perfil 4

ReDim Preserve sngWSElevAmazonasMont4(i)

ReDim Preserve sngWSElevAmazonasJus4(i)

ReDim Preserve sngWSElevCareiro4(i)

ReDim Preserve sngWSElevNegro4(i)

ReDim Preserve sngWSElevSolimões4(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevAmazonasMont4(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevAmazonasJus4(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevCareiro4(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevNegro4(i)

ReDim Preserve sngObsWSElevSolimões4(i)

'Popula as variáveis do tipo Single com os valores de altura _
d'água calculado e observado

'Perfil 1

sngWSElevAmazonasMont1(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 1, 28, 0, 1, 2)

sngWSElevAmazonasJus1(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 2, 8, 0, 1, 2)

sngWSElevCareiro1(i) = RC.Output_NodeOutput(2, 1, 9, 0, 1, 2)

sngWSElevNegro1(i) = RC.Output_NodeOutput(3, 1, 7, 0, 1, 2)

sngWSElevSolimões1(i) = RC.Output_NodeOutput(4, 1, 1, 0, 1, 2)

sngObsWSElevAmazonasMont1(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 1, 28, 0, 1, 180)

sngObsWSElevAmazonasJus1(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 2, 8, 0, 1, 180)

sngObsWSElevCareiro1(i) = RC.Output_NodeOutput(2, 1, 9, 0, 1, 180)

sngObsWSElevNegro1(i) = RC.Output_NodeOutput(3, 1, 7, 0, 1, 180)

sngObsWSElevSolimões1(i) = RC.Output_NodeOutput(4, 1, 1, 0, 1, 180)

'Perfil 2

sngWSElevAmazonasMont2(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 1, 28, 0, 2, 2)

sngWSElevAmazonasJus2(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 2, 8, 0, 2, 2)

sngWSElevCareiro2(i) = RC.Output_NodeOutput(2, 1, 9, 0, 2, 2)

sngWSElevNegro2(i) = RC.Output_NodeOutput(3, 1, 7, 0, 2, 2)

sngWSElevSolimões2(i) = RC.Output_NodeOutput(4, 1, 1, 0, 2, 2)

sngObsWSElevAmazonasMont2(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 1, 28, 0, 2, 180)

sngObsWSElevAmazonasJus2(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 2, 8, 0, 2, 180)

sngObsWSElevCareiro2(i) = RC.Output_NodeOutput(2, 1, 9, 0, 2, 180)

sngObsWSElevNegro2(i) = RC.Output_NodeOutput(3, 1, 7, 0, 2, 180)

sngObsWSElevSolimões2(i) = RC.Output_NodeOutput(4, 1, 1, 0, 2, 180)

'Perfil 3

sngWSElevAmazonasMont3(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 1, 28, 0, 3, 2)

sngWSElevAmazonasJus3(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 2, 8, 0, 3, 2)

sngWSElevCareiro3(i) = RC.Output_NodeOutput(2, 1, 9, 0, 3, 2)

sngWSElevNegro3(i) = RC.Output_NodeOutput(3, 1, 7, 0, 3, 2)

sngWSElevSolimões3(i) = RC.Output_NodeOutput(4, 1, 1, 0, 3, 2)

sngObsWSElevAmazonasMont3(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 1, 28, 0, 3, 180)

sngObsWSElevAmazonasJus3(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 2, 8, 0, 3, 180)

sngObsWSElevCareiro3(i) = RC.Output_NodeOutput(2, 1, 9, 0, 3, 180)

sngObsWSElevNegro3(i) = RC.Output_NodeOutput(3, 1, 7, 0, 3, 180)

sngObsWSElevSolimões3(i) = RC.Output_NodeOutput(4, 1, 1, 0, 3, 180)

'Perfil 4

sngWSElevAmazonasMont4(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 1, 28, 0, 4, 2)

sngWSElevAmazonasJus4(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 2, 8, 0, 4, 2)

sngWSElevCareiro4(i) = RC.Output_NodeOutput(2, 1, 9, 0, 4, 2)

sngWSElevNegro4(i) = RC.Output_NodeOutput(3, 1, 7, 0, 4, 2)

sngWSElevSolimões4(i) = RC.Output_NodeOutput(4, 1, 1, 0, 4, 2)


```

sngObsWSElevAmazonasMont4(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 1, 28, 0, 4, 180)
sngObsWSElevAmazonasJus4(i) = RC.Output_NodeOutput(1, 2, 8, 0, 4, 180)
sngObsWSElevCareiro4(i) = RC.Output_NodeOutput(2, 1, 9, 0, 4, 180)
sngObsWSElevNegro4(i) = RC.Output_NodeOutput(3, 1, 7, 0, 4, 180)
sngObsWSElevSolimões4(i) = RC.Output_NodeOutput(4, 1, 1, 0, 4, 180)

```

'Mostra o progresso dos cálculos na barra inferior do Excel

```
timNowTime = Timer
```

```
timElapseTime = _
```

```
Round((timNowTime - timStartTime) / 60, 2)
```

```
Application.StatusBar = "Finalizado Cálculo da " & _
```

```
"repetição #" & i & " de " & intNumRealizations _
```

```
& ". Tempo Decorrido: " & timElapseTime & " minutos."
```

```
ActiveCell.Activate
```

```
ActiveCell.Value = "N Amazonas"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "N Médio Amazonas"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "N Negro"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "N Médio Negro"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "N Solimões"
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = "N Médio Solimões"
```

```
ActiveCell.Offset(1, -5).Activate
```

```
ActiveCell.Value = sngNChAmazonas
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = sngCompMeanAmazonas
```

```
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
```

```
ActiveCell.Value = sngNChNegro
```

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngCompMeanNegro
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngNChSolimões
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngCompMeanSolimões
ActiveCell.Offset(1, -5).Activate

'Perfil 1

ActiveCell.Value = "Perfil 1"
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
ActiveCell.Value = "Rio"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Trecho"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Seção"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Nível d'água calculado"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Nível d'água observado"
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Amazonas"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "conflu-mononc"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "153469.2"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevAmazonasMont1(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevAmazonasMont1(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Amazonas"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "mononc-irac"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "129208.9"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevAmazonasJus1(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevAmazonasJus1(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Careiro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Varzea"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "47630.11"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevCareiro1(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevCareiro1(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Negro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "manaus-conflu"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "18874.36"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevNegro1(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevNegro1(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Solimões"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "irand-care"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "29505.95"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevSolimões1(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevSolimões1(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
'Perfil 2
ActiveCell.Value = "Perfil 2"
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
ActiveCell.Value = "Rio"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Trecho"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Seção"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Nível d'água calculado"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Nível d'água observado"
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Amazonas"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "conflu-mononc"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "153469.2"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevAmazonasMont2(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevAmazonasMont2(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Amazonas"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.Value = "mononc-irac"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "129208.9"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevAmazonasJus2(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevAmazonasJus2(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Careiro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Varzea"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "47630.11"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevCareiro2(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevCareiro2(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Negro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "manaus-conflu"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "18874.36"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevNegro2(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevNegro2(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Solimões"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "irand-care"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.Value = "29505.95"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevSolimões2(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevSolimões2(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
'Perfil 3
ActiveCell.Value = "Perfil 3"
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
ActiveCell.Value = "Rio"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Trecho"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Seção"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Nível d'água calculado"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Nível d'água observado"
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Amazonas"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "conflu-mononc"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "153469.2"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevAmazonasMont3(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevAmazonasMont3(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Amazonas"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "mononc-irac"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "129208.9"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevAmazonasJus3(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevAmazonasJus3(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Careiro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Varzea"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "47630.11"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevCareiro3(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevCareiro3(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Negro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "manaus-conflu"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "18874.36"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevNegro3(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevNegro3(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Solimões"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "irand-care"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "29505.95"

ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevSolimões3(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevSolimões3(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
'Perfil 4
ActiveCell.Value = "Perfil 4"
ActiveCell.Offset(1, 0).Activate
ActiveCell.Value = "Rio"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Trecho"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Seção"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Nível d'água calculado"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Nível d'água observado"
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Amazonas"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "conflu-mononc"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "153469.2"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevAmazonasMont4(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevAmazonasMont4(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Amazonas"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "mononc-irac"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

ActiveCell.Value = "129208.9"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevAmazonasJus4(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevAmazonasJus4(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Careiro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "Varzea"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "47630.11"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevCareiro4(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevCareiro4(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Negro"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "manaus-conflu"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "18874.36"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngWSElevNegro4(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevNegro4(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
ActiveCell.Value = "Solimões"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "irand-care"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = "29505.95"
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate

```
ActiveCell.Value = sngWSElevSolimões4(i)
ActiveCell.Offset(0, 1).Activate
ActiveCell.Value = sngObsWSElevSolimões4(i)
ActiveCell.Offset(1, -4).Activate
```

```
Next i
```

```
'Fecha o HEC-RAS
```

```
RC.QuitRas
```

```
'Organiza os níveis d'água do menor para o maior
```

```
Dim blnSorted As Boolean
```

```
Dim sngTemp As Single
```

```
Dim intX As Integer
```

```
blnSorted = False
```

```
Do While Not blnSorted
```

```
    blnSorted = True
```

```
    For intX = 0 To UBound(sngWSElevNegro1) - 1
```

```
        If sngWSElevNegro1(intX) > sngWSElevNegro1(intX + 1) Then
```

```
            sngTemp = sngWSElevNegro1(intX + 1)
```

```
            sngWSElevNegro1(intX + 1) = sngWSElevNegro1(intX)
```

```
            sngWSElevNegro1(intX) = sngTemp
```

```
        blnSorted = False
```

```
    End If
```

```
Next intX
```

```
For intX = 0 To UBound(sngWSElevNegro2) - 1
```

```
    If sngWSElevNegro2(intX) > sngWSElevNegro2(intX + 1) Then
```

```
        sngTemp = sngWSElevNegro2(intX + 1)
```

```
        sngWSElevNegro2(intX + 1) = sngWSElevNegro2(intX)
```

```
        sngWSElevNegro2(intX) = sngTemp
```

```
    blnSorted = False
```

```
End If
```

```

Next intX
For intX = 0 To UBound(sngWSElevNegro3) - 1
    If sngWSElevNegro3(intX) > sngWSElevNegro3(intX + 1) Then
        sngTemp = sngWSElevNegro3(intX + 1)
        sngWSElevNegro3(intX + 1) = sngWSElevNegro3(intX)
        sngWSElevNegro3(intX) = sngTemp
        blnSorted = False
    End If
Next intX
For intX = 0 To UBound(sngWSElevNegro4) - 1
    If sngWSElevNegro4(intX) > sngWSElevNegro4(intX + 1) Then
        sngTemp = sngWSElevNegro4(intX + 1)
        sngWSElevNegro4(intX + 1) = sngWSElevNegro4(intX)
        sngWSElevNegro4(intX) = sngTemp
        blnSorted = False
    End If
Next intX
Loop

```

'Determina a probabilidade de excedência para os níveis d'água calculados

```

Dim sngWSEL99Perfil1 As Single, sngWSEL90Perfil1 As Single, _
    sngWSEL50Perfil1 As Single, sngWSEL10Perfil1 As Single, _
    sngWSEL1Perfil1 As Single
Dim sngWSEL99Perfil2 As Single, sngWSEL90Perfil2 As Single, _
    sngWSEL50Perfil2 As Single, sngWSEL10Perfil2 As Single, _
    sngWSEL1Perfil2 As Single
Dim sngWSEL99Perfil3 As Single, sngWSEL90Perfil3 As Single, _
    sngWSEL50Perfil3 As Single, sngWSEL10Perfil3 As Single, _
    sngWSEL1Perfil3 As Single
Dim sngWSEL99Perfil4 As Single, sngWSEL90Perfil4 As Single, _
    sngWSEL50Perfil4 As Single, sngWSEL10Perfil4 As Single, _
    sngWSEL1Perfil4 As Single

```

```

sngWSEL99Perfil1 = sngWSElevNegro1(CInt(0.01 * UBound(sngWSElevNegro1)))
sngWSEL90Perfil1 = sngWSElevNegro1(CInt(0.1 * UBound(sngWSElevNegro1)))
sngWSEL50Perfil1 = sngWSElevNegro1(CInt(0.5 * UBound(sngWSElevNegro1)))
sngWSEL10Perfil1 = sngWSElevNegro1(CInt(0.9 * UBound(sngWSElevNegro1)))
sngWSEL1Perfil1 = sngWSElevNegro1(CInt(0.99 * UBound(sngWSElevNegro1)))
sngWSEL99Perfil2 = sngWSElevNegro2(CInt(0.01 * UBound(sngWSElevNegro2)))
sngWSEL90Perfil2 = sngWSElevNegro2(CInt(0.1 * UBound(sngWSElevNegro2)))
sngWSEL50Perfil2 = sngWSElevNegro2(CInt(0.5 * UBound(sngWSElevNegro2)))
sngWSEL10Perfil2 = sngWSElevNegro2(CInt(0.9 * UBound(sngWSElevNegro2)))
sngWSEL1Perfil2 = sngWSElevNegro2(CInt(0.99 * UBound(sngWSElevNegro2)))
sngWSEL99Perfil3 = sngWSElevNegro3(CInt(0.01 * UBound(sngWSElevNegro3)))
sngWSEL90Perfil3 = sngWSElevNegro3(CInt(0.1 * UBound(sngWSElevNegro3)))
sngWSEL50Perfil3 = sngWSElevNegro3(CInt(0.5 * UBound(sngWSElevNegro3)))
sngWSEL10Perfil3 = sngWSElevNegro3(CInt(0.9 * UBound(sngWSElevNegro3)))
sngWSEL1Perfil3 = sngWSElevNegro3(CInt(0.99 * UBound(sngWSElevNegro3)))
sngWSEL99Perfil4 = sngWSElevNegro4(CInt(0.01 * UBound(sngWSElevNegro4)))
sngWSEL90Perfil4 = sngWSElevNegro4(CInt(0.1 * UBound(sngWSElevNegro4)))
sngWSEL50Perfil4 = sngWSElevNegro4(CInt(0.5 * UBound(sngWSElevNegro4)))
sngWSEL10Perfil4 = sngWSElevNegro4(CInt(0.9 * UBound(sngWSElevNegro4)))
sngWSEL1Perfil4 = sngWSElevNegro4(CInt(0.99 * UBound(sngWSElevNegro4)))

```

'Manda a média e probabilidade de excedência para os níveis d'água calculados _
para uma caixa de mensagem no Excel

Dim strOutput As String

strOutput = "99% Excedência do Nível D'água (Perfil 1) = " & _

Round(sngWSEL99Perfil1, 2) & Chr(13)

strOutput = strOutput & "90% Excedência do Nível D'água (Perfil 1) = " & _

Round(sngWSEL90Perfil1, 2) & Chr(13)

strOutput = strOutput & "50% Excedência do Nível D'água (Perfil 1) = " & _

Round(sngWSEL50Perfil1, 2) & Chr(13)

strOutput = strOutput & "10% Excedência do Nível D'água (Perfil 1) = " & _

Round(sngWSEL10Perfil1, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "1% Excedência do Nível D'água (Perfil 1) = " & _
 Round(sngWSEL1Perfil1, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "99% Excedência do Nível D'água (Perfil 2) = " & _
 Round(sngWSEL99Perfil2, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "90% Excedência do Nível D'água (Perfil 2) = " & _
 Round(sngWSEL90Perfil2, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "50% Excedência do Nível D'água (Perfil 2) = " & _
 Round(sngWSEL50Perfil2, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "10% Excedência do Nível D'água (Perfil 2) = " & _
 Round(sngWSEL10Perfil2, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "1% Excedência do Nível D'água (Perfil 2) = " & _
 Round(sngWSEL1Perfil2, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "99% Excedência do Nível D'água (Perfil 3) = " & _
 Round(sngWSEL99Perfil3, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "90% Excedência do Nível D'água (Perfil 3) = " & _
 Round(sngWSEL90Perfil3, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "50% Excedência do Nível D'água (Perfil 3) = " & _
 Round(sngWSEL50Perfil3, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "10% Excedência do Nível D'água (Perfil 3) = " & _
 Round(sngWSEL10Perfil3, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "1% Excedência do Nível D'água (Perfil 3) = " & _
 Round(sngWSEL1Perfil3, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "99% Excedência do Nível D'água (Perfil 4) = " & _
 Round(sngWSEL99Perfil4, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "90% Excedência do Nível D'água (Perfil 4) = " & _
 Round(sngWSEL90Perfil4, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "50% Excedência do Nível D'água (Perfil 4) = " & _
 Round(sngWSEL50Perfil4, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "10% Excedência do Nível D'água (Perfil 4) = " & _
 Round(sngWSEL10Perfil4, 2) & Chr(13)
 strOutput = strOutput & "1% Excedência do Nível D'água (Perfil 4) = " & _

```
Round(sngWSEL1Perfil4, 2) & Chr(13)
timElapseTime = Round((timNowTime - timStartTime) / 60, 1)
MsgBox "Tempo Total: " & timElapseTime & " minutos." & _
Chr(13) & strOutput & Chr(13)
```

End Sub