

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

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO RIO AMAZONAS
ENTRE A CONFLUÊNCIA NEGRO-SOLIMÕES E A FOZ
DO MADEIRA**

GUSTAVO NASCIMENTO LINS

ORIENTADOR: ALEXANDRE KEPLER SOARES

CO-ORIENTADOR: LEONARDO ZANDONADI MOURA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2019

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

**MODELAGEM HIDRODINÂMICA DO RIO AMAZONAS
ENTRE A CONFLUÊNCIA NEGRO-SOLIMÕES E A FOZ
DO MADEIRA**

GUSTAVO NASCIMENTO LINS

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 AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**Prof. Alexandre Kepler Soares, D.Sc (ENC/FT/UNB)
(ORIENTADOR)**

**Prof. Pedro Augusto Fernandes Pereira, D.Sc (ENC/FT/UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Renato Souza Amorim, M.Sc (DNIT)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 DE DEZEMBRO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

LINS, GUSTAVO NASCIMENTO

Modelagem hidrodinâmica do rio Amazonas entre a confluência Negro-Solimões e a foz do Madeira [Distrito Federal] 2019

xi, 82 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Hidráulica Fluvial

2. Modelos Hidráulicos

3. escoamento Variável

4. HEC-RAS

I. ENC/FT/UnB

II. BACHAREL (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LINS,G.N. (2019). *Modelagem Hidrodinâmica Do Rio Amazonas Entre A Confluência Negro-Solimões E A Foz Do Madeira*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 82 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gustavo Nascimento Lins

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Modelagem Hidrodinâmica Do Rio Amazonas Entre A Confluência Negro-Solimões E A Foz Do Madeira

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

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.

Gustavo Nascimento Lins
gnlins@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Deus, que me guiou nos momentos mais difíceis e colocou no meu caminho as pessoas as quais sou grato por terem me ajudado a chegar até aqui. Sou grato a comunidade 3 do Neocatecumenato da Paróquia Bom Jesus dos Aflitos, pelas orações e pelas conversas que me ajudaram a manter a minha paz de espírito até o final do curso.

Agradeço à minha família, por ser suporte em todos os momentos, e estarem sempre disponíveis a me ajudar em todas as dificuldades, a celebrar em todas as minhas conquistas e por confiarem nas minhas decisões e no meu potencial para atingir meus sonhos. Agradeço em especial ao meu irmão e a minha cunhada, por me darem sobrinhos que trazem alegria sempre que me visitam.

Sou grato aos meus amigos que me acompanham desde o tempo de escola e pela amizade que tornou essa caminhada mais leve, em especial: Guilherme, Daniel, Pedrinho, Caio, Maurício, João Victor, Renan, Raul, Victor, Pedron, Fernando, Murilo, Davi, João Pedro, Ingrid e Izabela. Agradeço pelas amizades que a UnB fortaleceu e às novas que me trouxe, que são minha inspiração para me tornar um bom profissional na Engenharia, em especial: Giovanna, Raquel, Matheus, Fabrício, Larissa, Giampaolo, Tatiana, Gino, Paulo Buta, Rebeca e Murilo.

Agradeço à Flua Consultoria, que nesses anos em que pude fazer parte deste time, me ajudaram na minha formação como profissional, de caráter e de liderança. Em especial aos que eu trabalhei de maneira mais próxima na diretoria executiva de 2019 (Paulo, Gabi, Luquinhas, Menescal e Vodka) e na diretoria de gestão de pessoas (Thatiane, Ester, Victor e Beatriz).

Sou grato aos colegas da CAESB, onde estagiei no fim do meu curso, pela amizade e por sempre acreditarem no meu potencial e me darem autonomia para tomar decisões que melhorassem nossos processos. Em especial: Tattiane, Marcos, Luciano, Fernando, Luiz (grilo), Judenor, Tairone e Monyque.

Por fim, mas não menos importante, sou extremamente grato pela orientação dos professores Alexandre e Leonardo, que me guiaram neste estudo, me mostrando sempre o melhor caminho a ser trilhado, sempre com paciência e disponibilidade para tirar as mais diversas dúvidas, tornando a produção deste trabalho menos pesada, e agradeço pela ajuda de Jales e Gabriel, pela amizade e por me mostrarem como solucionar os impasses na elaboração dos seus modelos.

RESUMO

O presente trabalho analisa o comportamento do escoamento na confluência Negro-Solimões em regime transiente a partir da aplicação de modelagem computacional utilizando o software HEC-RAS (5.0). No caso dos cursos hídricos citados, o escoamento ocorre em regime transiente, portanto modelos em regime permanentes não representam fielmente o escoamento nesta situação. Exemplo disto é a ocorrência de histerese em curvas-chave, que reflete a não biunivocidade da relação entre cota e vazão no escoamento em rios. O modelo teve como dados de entrada: no rio Solimões, vazões disponibilizadas pela ANA, na plataforma Hidroweb, no rio Negro foi utilizado resultados obtidos na literatura a partir de modelagem hidrológica obtida por Wongchuig *et al.*(2019) e no rio Amazonas, dados de níveis d'água obtidos a partir de regressão polinomial de dados disponibilizados em estações virtuais. O coeficiente de rugosidade de Manning foi escolhido como parâmetro de calibração, que foi feita de forma manual. A análise dos resultados obtidos foi feita com base na métrica RMSE (raiz quadrada do erro médio), utilizando o nível de 7 estações, 3 fluviométricas e 4 virtuais, como dado observado. Em 6 das 7 estações utilizadas para calibração, os valores do RMSE foram menores que 0,5 m, e a média dos resultados entre as estações foi de 0,270, apresentando melhor resultado do que o modelo em regime permanente. O modelo apresentou boa aderência aos dados na cheia, entretanto não apresentou resultados tão bons na época de vazante. A histerese obtida no modelo não apresentou resultados esperados segundo a literatura, Mansanarez *et al.* (2016) por exemplo. As incertezas envolvidas nas condições de contorno utilizadas no modelo, indicam justificativa para os valores. No Rio Solimões o uso de vazão obtidas de curva-chave, no rio Amazonas a interpolação de dados de estações virtuais.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS E QUADROS	ix
LISTA DE ABREVIACOES, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 CANAIS	4
3.1.1 Descrição do Escoamento.....	4
3.1.2 Soluções Numéricas	9
3.2 CURVA-CHAVE E HISTERESE.....	10
3.3 MODELAGEM HIDRÁULICA.....	12
3.4 HEC-RAS	14
3.5 REGIÃO AMAZÔNICA.....	15
4 METODOLOGIA	21
4.1 DESCRO DA ÁREA DE ESTUDO	21
4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO	24
4.3 CONDIOES DE CONTORNO	26
4.3.1 Rio Negro.....	27
4.3.2 Rio Solimões	27
4.3.3 Rio Amazonas	28
4.4 CALIBRAÇÃO	32
4.4.1 ESTAOES DE CALIBRAÇÃO.....	32
5 RESULTADOS E DISCUSSOES	38
5.1 CALIBRAÇÃO	38
5.2 RESULTADOS ESTAOES MANAUS, JATUARANA E CAREIRO	43
5.3 RESULTADOS ESTAÇÃO IRACEMA	49
5.4 HISTERESE.....	51
5.5 ÁREAS INEFETIVAS	57
6 CONCLUSO E RECOMENDAOES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
APÊNDICES	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Exemplo de um canal de forma irregular (Fonte: Porto, 2006).....	5
Figura 3.2 - Representação visual da Equação de Energia (Fonte: Adaptado de Brunner, 2016).....	7
Figura 3.3 - Exemplificação da ocorrência da histerese na Curva-Chave (Fonte: Osorio, 2017)	11
Figura 3.4 - Fluxograma do processo de Modelagem	12
Figura 3.5 - Região Hidrográfica Amazônica com seus principais rios e afluentes (Fonte: ANTAQ, 2013)	16
Figura 3.6 - Batimetria da confluência Negro-Solimões (a) e suas localizações (b) (Fonte: Adaptado de Franzinelli, 2011).....	20
Figura 4.1 - Área de Estudo.....	22
Figura 4.2 - Modelo Digital de Superfície da área de estudo	25
Figura 4.3-Elementos geométricos do modelo	25
Figura 4.4 - Localização das condições de contorno do modelo.....	26
Figura 4.5- Modelo de Wongchuig et al. (2019) comparado ao observado na estação de Manaus no ano de 2010	27
Figura 4.6 - Modelo de Wongchuig et al. (2019) comparado ao observado na estação de Manaus	29
Figura 4.7 - Dados de vazão da estação fluviométrica de Manacapuru (Rio Solimões).....	30
Figura 4.8 - Distribuição dos dados de nível no rio Amazonas no ano de 2010 nas proximidades da estação Iracema	30
Figura 4.9 - Distribuição temporal dos dados das duas estações virtuais próximas a estação de Iracema.....	31
Figura 4.10-Regressão Polinomial Dados de Nível Amazonas próximo à estação Iracema	31
Figura 4.11 - Trechos do modelo, estações e seções usadas para calibração	33
Figura 4.12 - Níveis d'água em 2010 da estação fluviométrica Manaus	34
Figura 4.13 - Níveis d'água em 2010 da estação fluviométrica Jatuarana.....	34
Figura 4.14 - Níveis d'água em 2010 da estação fluviométrica Careiro.....	35
Figura 4.15 - Níveis d'água em 2010 da estação virtual amz_ngo_jas_0063_01	35
Figura 4.16 - Níveis d'água em 2010 da estação virtual amz_sol_jas_0063_01	36
Figura 4.17 - Níveis d'água em 2010 da estação virtual JA2152Eva	36
Figura 4.18 - Níveis d'água em 2010 da estação virtual JA2063Encont	37
Figura 5.1 - Estação fluviométrica Manaus.....	40
Figura 5.2 - Estação fluviométrica Jatuarana	40
Figura 5.3 – Estação fluviométrica Careiro.....	41
Figura 5.4 - Estação virtual amz_ngo_jas_0063_01	41
Figura 5.5 - Estação virtual amz_sol_jas_0063_01.....	42
Figura 5.6 - Estação virtual JA2152Eva.....	42
Figura 5.7 - Estação virtual JA2063Encont.....	43

Figura 5.8 - Seção Transversal da Estação Manaus em Julho (a) e em Outubro (b).....	45
Figura 5.9 - Seção Transversal da Estação Jatuarana em Julho (a) e em Outubro (b)	46
Figura 5.10 - Seção Transversal da Estação Careiro em Julho (a) e em Outubro (b)	47
Figura 5.11 - Vazão obtida pelo modelo na Seção da estação fluviométrica Jatuarana.....	48
Figura 5.12 - Vazão obtida pelo modelo na Seção da estação fluviométrica Careiro	48
Figura 5.13 - Dados de níveis da seção transversal de Iracema	49
Figura 5.14 - Seção Transversal da Estação Iracema em Julho (a) e em Outubro (b)	50
Figura 5.15 - Vazão e Cota obtidas pelo modelo na estação Manaus	52
Figura 5.16 - Cota vs vazão na estação Manaus.....	52
Figura 5.17 - Vazão e Cota obtidas pelo modelo na estação Careiro.....	53
Figura 5.18 - Cota vs vazão na estação Careiro	53
Figura 5.19 - Vazão e Cota obtidas pelo modelo na estação Jatuarana.....	54
Figura 5.20 - Cota vs vazão na estação Jatuarana	54
Figura 5.21 - Vazão e Cota obtidas pelo modelo na estação Iracema	55
Figura 5.22 - Cota vs vazão na estação Iracema.....	55
Figura 5.23 - Níveis medidos com destaque no período de pico (a) e área destacada (b)...	56
Figura 5.24 - Comparação dos resultados de calibração com e sem áreas de escoamento inefetivo.....	57

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 3.1-Valores Comuns de Manning e Chézy	6
Tabela 3.2 - Valores comuns do n de Manning para a bacia Amazônica.....	18
Tabela 4.1 - Dados Disponíveis das Estações Fluviométricas (Fonte: ANA, 2019).....	22
Tabela 4.2 - Períodos de níveis d'água disponíveis em estações virtuais (Fonte: <i>Theia-Land Data Centre</i> , 2019).....	23
Tabela 4.3-Períodos de níveis d'água disponíveis em estações virtuais (Fonte: HYBAM, 2019)	24
Tabela 5.1 – Menores valores de RMSE obtidos nas estações de calibração em 2010.....	38
Tabela 5.2 - Combinação dos coeficientes de Manning que apresentou menor valor de RMSE	39
Tabela 5.3 - RMSE médio obtidos no estudo de Ferreira (2018).....	39
Tabela 5.4 - Diferença entre nível simulado e o medido na estação fluviométrica (em metros).....	44
Tabela 5.5 - Defasagem entre cota e vazão nas estações.....	57
Tabela 1 - Combinações do Manning do canal principal considerando os valores das planícies de inundação do trabalho de Ferreira (2018).....	67
Tabela 2 - Combinações do Manning do canal principal considerando os valores das planícies de inundação do trabalho de Ferreira (2018) (Cont.)	68
Tabela 3 - Combinações do Manning do canal principal considerando os valores das planícies de inundação do trabalho de Ferreira (2018) (Conclusão).....	69
Tabela 4 - Combinações dos Mannings para a seção inteira.....	69
Tabela 5 - Combinações dos Mannings para a seção inteira (Cont.)	70
Tabela 6 - Combinações dos Mannings para a seção inteira (Conclusão)	71
Tabela 7 - Combinações do Manning variando os valores na planície de inundação	72

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Centers River Analysis System
USACE	US Army Corps of Engineers
NS	Coeficiente de Nash-Sutcliffe
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
AM	Amazonas
SEMASDH	Secretaria Municipal de Assistência Social e Direitos Humanos
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
EGM	Earth Gravitational Model 2008
VBA	<i>Visual Basic Application</i>
V	Velocidade de escoamento (m/s)
C	Coeficiente de Chézy (adimensional)
R_h	Raio hidráulico (m)
I_0	Declividade do canal (m/m)
n	Coeficiente de Manning ($s/m^{1/3}$)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
f	Fator de atrito (adimensional)
$\frac{P}{\gamma}$	Energia de pressão (m)
Z	Energia potencial (m)
α	Coeficiente de Coriolis (adimensional)
$\frac{v^2}{2g}$	Carga cinética (m)
ΔH_{12}	Perda de energia entre dois pontos
Q	Vazão (m^3/s)
t	Tempo (s)
A	Área da Seção Transversal (m^2)
x	Posição transversal do escoamento
H	Altura do nível d'água (m)
h	Profundidade da água (m)
I_f	Inclinação da Linha de Energia (m/m)
ΔT	Passo de tempo (s)

Δx	Distância entre as seções transversais ou tamanho médio da célula (m)
q	Vazão lateral

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de compreender como ocorre o escoamento dos rios da bacia Amazônica é motivada por diversas áreas de estudo, como transporte de sedimentos, viabilidade de uso como hidrovias, ocorrência de eventos extremos, por exemplo. O melhor entendimento de como ocorrem fenômenos de cheias, por exemplo, bem como suas causas e consequências, ajudam a aumentar sua previsibilidade e, conseqüentemente, a salvar vidas de pessoas que vivam na proximidade do rio em eventos extremos, como é o caso de Manaus, onde, desde 2000, mais de 700 mil pessoas foram desabrigadas devido a inundações (Folha, 2018). A região também é conhecida por ter importantes hidrovias como os rios Negro, Solimões e Amazonas, que são rotas de grande relevância no transporte de pessoas e cargas (ANTAQ,2013), tornando necessário o conhecimento da profundidade nos diferentes trechos para melhor navegabilidade.

Faz-se necessária a coleta de informações referentes a um fenômeno físico para que haja a compreensão sobre a maneira que este ocorre. No caso do escoamento do rio, as informações mais importantes para a maior parte dos estudos são nível d'água e vazão, que são mais representativos quando apresentados em formatos de séries históricas, geralmente coletadas em estações fluviométricas ao longo do rio. O nível d'água é considerado uma variável de medição fácil e baixo custo, enquanto que a vazão, ao contrário, é uma variável de obtenção difícil e alto custo, pois necessitam de profissionais capacitados, equipamentos e de tempo para a sua coleta/determinação (Maldonado e Gamaro, 2013). Essa dificuldade reflete na diferença na quantidade de informações existentes entre as duas variáveis, já que o número de medições de cota disponíveis nas estações fluviométricas é consideravelmente maior do que os de vazões, como é o exemplo da estação fluviométrica de Novo Airão, no Rio Negro, que possui dados de cota no período entre 2014 e 2018, mas nenhuma informação de vazão (HIDROWEB,2019).

A necessidade da melhor compreensão de um fenômeno resulta no uso de alguns modelos hidráulicos ou hidrológicos para relacionar dados medidos com resultados esperados, não necessariamente da mesma variável. Um dos mais frequentemente utilizados é a Curva-Chave, que são funções que associam valores de vazão para cada valor de nível de água em uma seção da calha fluvial. Usualmente, são obtidas por meio de medições simultâneas de nível e vazão, ou de nível e velocidade de fluxo transversal, em diversas condições de fluxo (Rosa et al., 2017).

Apesar de frequentemente utilizadas, as Curvas-chave possuem algumas desvantagens. Entre elas estão, devido a fatores logísticos, financeiros e de segurança, a maioria das medidas utilizadas para a elaboração da curvas-chaves não são feitas em condições hidráulicas variáveis, variando seca e enchente, tendo a maioria dos dados em condições normais de cota e vazão desconsiderando então a variação do escoamento no tempo, a existência de remanso, bem como o efeito da propagação de cheia, ignorando o efeito de histerese (Velasco e Cook ,2011).

Segundo Velasco e Cook (2011), o fenômeno de histerese ocorre devido a passagem de uma enchente por uma seção que altera a velocidade de certa forma que a frente crescente da enchente acelera o fluxo e a parte traseira decrescente desacelera o fluxo, sendo assim possível observar vazões significativamente diferentes na mesma cota em uma única enchente dependendo de quando as medições são feitas, gerando uma curva-chave em laço. A busca por maior exatidão e descrição mais detalhada de fenômenos que ocorrem no escoamento do rio traz como uma alternativa a utilização de modelos hidrodinâmicos.

O software HEC-RAS é um dos mais consagrados neste tipo de modelagem. Desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center*, do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, o modelo tem sido utilizado em diversos casos, como, por exemplo:

- Obtenção de curva chave (Rosa et al., 2017; Vanelli et al. 2018)
- Simulação hidrodinâmica com dados remotos (Souza et al., 2007)
- Estudo de áreas de inundação (Cabral et al., 2016)

O presente trabalho buscou descrever de maneira significativa o comportamento hidráulico fluvial do trecho de rio entre a confluência Negro-Solimões e a foz do rio Madeira a partir do uso do HEC-RAS.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é o desenvolvimento de um modelo hidrodinâmico representativo do sistema fluvial no trecho inicial do Rio Amazonas, compreendido entre a confluência dos Rios Negro e Solimões e a foz do Rio Madeira, utilizando o software HEC-RAS.

A partir desta ideia central, os objetivos específicos são:

- Calibração do modelo hidráulico unidimensional utilizando o coeficiente de Manning como parâmetro de calibração;
- avaliar o comportamento sazonal do sistema considerando os efeitos de histerese da curva-chave.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CANAIS

3.1.1 Descrição do escoamento

O escoamento da água pode ocorrer de diversas maneiras, sendo classificado de diferentes modos a depender das condições gerais a que está sujeito. Em relação ao conduto, pode-se classificar como livre quando o líquido estiver em contato com a atmosfera e o transporte ocorre, necessariamente, pela ação da gravidade. Em relação ao ordenamento do movimento do fluido, pode-se classificar como turbulento quando as partículas movem-se em trajetórias irregulares, com movimento aleatório, sendo o caso mais comum na engenharia (Porto, 2006).

Quando o escoamento não altera seu comportamento no decorrer do tempo, este é qualificado como permanente, caso contrário, como não-permanente ou transiente, sendo que essa classificação também depende da localização do observador em relação a água. Além do tempo, alterações podem ocorrer em relação ao espaço. No caso em que as todas as seções transversais do conduto forem iguais e a velocidade média em todas as seções, em um determinado instante, for a mesma, o escoamento é classificado como uniforme, caso contrário, se o vetor velocidade se modificar de ponto a ponto, num momento qualquer, o escoamento é dito não uniforme ou variado (Porto, 2006).

Tratando-se de escoamento em canais abertos, os cálculos estão baseados em equações de resistência, ou seja, equações que ligam a perda de carga em um trecho à velocidade média, ou vazão, por meio de parâmetros geométricos e da rugosidade do perímetro molhado, comprimento da parte sólida do canal (paredes e fundos) em contato com o líquido (Porto, 2006).

Duas fórmulas de extrema importância para o estudo de escoamento em canais estão apresentadas pelas Equações 3.1 e 3.2, são as fórmulas de *Chézy* e de *Manning*, respectivamente, em que V é a velocidade do escoamento (m/s), C coeficiente de rugosidade de *Chézy* (adimensional), R_h é o raio hidráulico (área molhada dividida pelo perímetro molhado, o termo ‘molhado’ indica a ocupação feita pelo fluido), I_0 é a declividade de fundo do canal (igual a declividade da linha de energia, vista mais a diante, no caso de escoamento permanente e uniforme) e n é o coeficiente de *Manning* ($s.m^{-1/3}$). Utilizando-se da equação da continuidade, multiplicando-se ambas as equações pela área molhada, obtém-se o valor da vazão na seção.

$$V = C\sqrt{R_h * I_0} \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$V = \frac{R_h^{2/3} * I_0^{1/2}}{n} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Devido ao escoamento livre ocorrer, necessariamente, movido pela gravidade, a declividade do fundo do canal (I_0) é de suma importância devido a sua influência na velocidade do escoamento e altura da coluna d'água, sendo direta e inversamente proporcional a elas, respectivamente. Este parâmetro é obtido pela divisão entre a diferença de cota entre dois pontos no escoamento e a distância entre eles, bem como as características das seções transversais, representadas nas Equações 3.1 e 3.2 pelo termo do raio hidráulico (R_h). Sendo a fórmula de Manning válida para escoamentos permanentes e uniformes, em alguns casos a declividade da linha d'água (Alves *et al.*, 2017) ou da linha de energia do escoamento (Brunner, 2016), são substitutas utilizadas na equação.

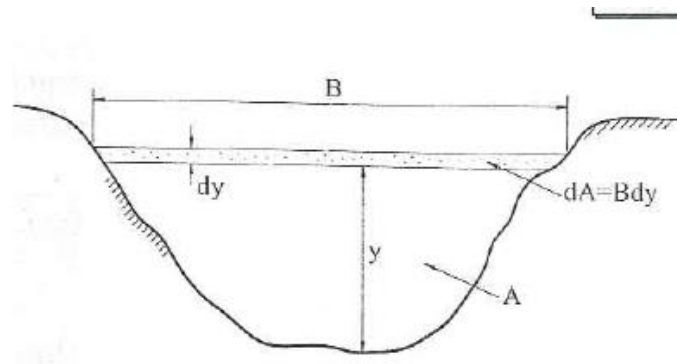


Figura 3.1 - Exemplo de um canal de forma irregular
(Fonte: Porto, 2006)

As variações que ocorrem no fundo do canal, como na descontinuidade das características geométricas, as diferentes formações do solo ou sedimentos, ou outros elementos presentes, podem interferir na resistência do escoamento, alterando assim valores que relacionam a chamada rugosidade do canal (Amanini, 2005). Essas características são em muitos casos agregadas e associadas a um coeficiente de rugosidade. No caso da Equação 3.1, o coeficiente de Chézy pode ser expresso segundo a equação 3.3.

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}} \quad (\text{Equação 3.3})$$

em que g é a aceleração da gravidade e f é o fator de atrito em função do número de Reynolds e da rugosidade da parede. Embora seu comportamento em tubos circulares seja bem definido, a dificuldade do seu uso em canais abertos é a grande variedade de revestimentos de canais, além de suas formas geométricas, dificultando na especificação do fator de resistência (Porto, 2006).

Na equação 3.2, o fator que expressa as forças resistivas do escoamento é o coeficiente de Manning (n). Obtido de maneira empírica, este parâmetro está relacionado a diversas características do canal como material do leito, irregularidade da margem, vegetação, presença de eventuais obstruções, carga de sedimentos, entre outros (Limerinos e Resources, 1970 apud Alves *et al.*, 2017). Este coeficiente, na calha principal do rio, apresenta, frequentemente, relação decrescente com o nível d'água, representando que quanto maior a quantidade de água num canal, menor é a influência do fundo e das paredes no escoamento (Alves, 2017). Na Tabela 3.1 há alguns valores comuns dos coeficientes.

Tabela 3.1-Valores Comuns de Manning e Chézy

(Fonte: Warmink *et al.*, 2007 com adaptações)

Descrição	n	C
Canal revestido de concreto	0,013	≈ 100
Canal de terra sem revestimento	0,020	73
Canal Natural Profundo Estável Retilíneo	0,030	49
Riachos Sinuosos	0,035	42
Rios intermitentes, margem com vegetação	0,040	37
Leito Rochoso	0,050	29

Apesar de extremamente importantes, as equações citadas não apresentam todas as informações necessárias para uma boa compreensão do escoamento plenamente, além de serem simplificadas para o caso de escoamento uniforme. Na necessidade de obter-se informações mais detalhadas sobre o escoamento, constantemente faz-se uso da equação da energia.

Explicitada na Equação 3.4, considerando-se um escoamento permanente, esta pode representar a variação do escoamento entre dois pontos, onde, no ponto observado: $\frac{P}{\gamma}$

representa a energia ou carga de pressão, considerada, geralmente, como a altura d'água do escoamento livre. Z é a carga de posição (energia potencial de posição em relação a um plano horizontal de referência), α é o coeficiente de Coriolis, usado para correção de carga cinética, representada por $\frac{V^2}{2g}$, que representa a elevação necessária para que a água atinja a velocidade V durante a queda livre sem atrito (Çengel, 2007) e ΔH_{12} a perda de energia entre os dois pontos causadas pela resistência ao escoamento. Para obter-se a linha de energia do escoamento, basta calcular o lado esquerdo da equação em cada ponto do fluxo (Porto, 2006).

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \Delta H_{12} \quad (\text{Equação 3.4})$$

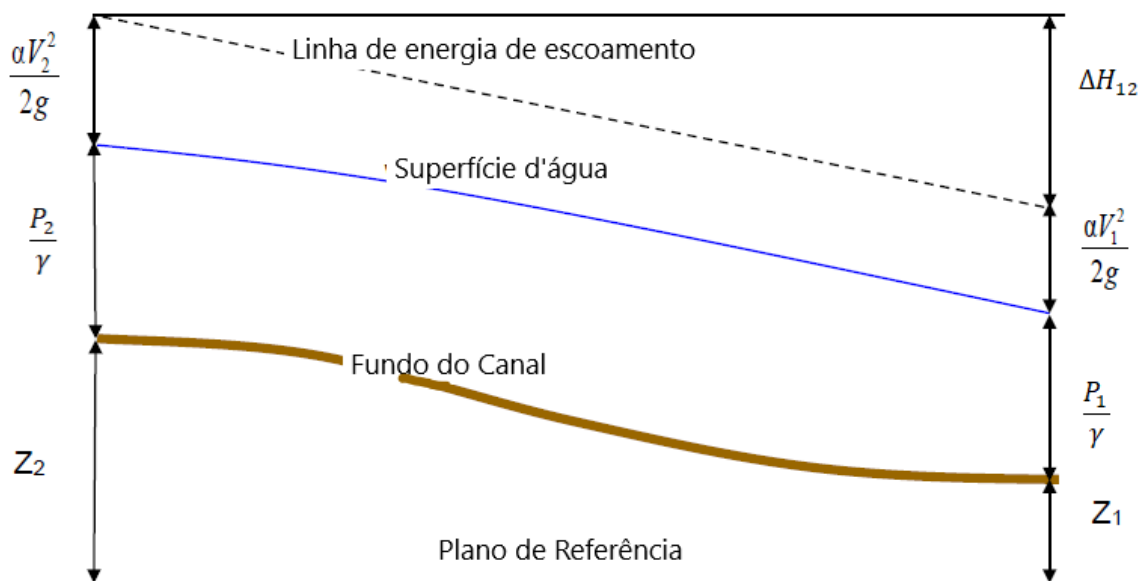


Figura 3.2 - Representação visual da Equação de Energia
(Fonte: Adaptado de Brunner, 2016)

O uso deste equacionamento permite a análise mais detalhada do fluxo, possibilitando a descrição de variações nas seções transversais, nos casos de, por exemplo, escoamento permanente gradualmente variado, que ocorre em qualquer canal irregular no qual a vazão mantém-se constante ou em canais regulares quando a altura do escoamento e, conseqüentemente, a velocidade, variam de uma seção para outra (Martins, 1997). Esse efeito no escoamento pode ocorrer em casos de algum barramento a jusante, alterações na

seção transversal, na declividade de fundo do canal ou na confluência de grandes rios (Alves, 2017).

A descrição do escoamento feita pela Equação 3.4 apresenta resultados comumente utilizados para compreensão do comportamento de canais, entretanto esta possui limitações ao não levar em consideração a ocorrência de variações temporais. Esta lacuna pode ser preenchida ao resolver-se as equações de Saint-Venant.

As equações da continuidade (Equação 3.5) e de quantidade de movimento (Equação 3.6), baseadas nos princípios de conservação de massa e de momento, respectivamente, aplicadas ao escoamento em canais, são as chamadas Equações de Saint-Venant.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (\text{Equação 3.5})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + I_f \right) = 0 \quad (\text{Equação 3.6})$$

A equação de continuidade (3.5) é deduzida do princípio de que não há geração nem desaparecimento de água durante o escoamento, em outras palavras, ele traduz o fato de que a diferença entre o volume de água afluente à seção de montante e o volume efluente do trecho, num dado intervalo de tempo, corresponde exatamente à variação do volume de água dentro deste trecho e no mesmo intervalo (Silva *et al.*, 2003).

O primeiro termo da Equação 3.5 representa a taxa de elevação do nível d'água, que define as mudanças de armazenamento com o tempo. O segundo representa a variação do armazenamento em função da variação da área molhada pela distância e variação espacial da velocidade. O termo q representa a contribuição lateral de escoamento por unidade de comprimento (Silva *et al.*, 2003).

A equação da quantidade de movimento (3.6) é baseada na segunda lei de Newton onde a variação temporal do momento linear em um sistema é igual a soma das forças que atuam no mesmo. Considerando o escoamento de um rio, as forças que atuam sobre a massa de água em um volume de controle são a componente da força gravitacional no sentido do escoamento, a força de atrito junto às margens e ao fundo do canal e as forças de pressão hidrostática a jusante e a montante (Coutinho, 2015).

Na Equação 3.6, os dois primeiros termos representam a inércia do escoamento, o terceiro representa a força de pressão e o último a força de atrito (Coutinho, 2015).

Em casos de alta declividade do fundo, os termos de inércia da equação de momento possuem ordem de grandeza muito menor do que os demais termos. Nesse caso, a omissão destes diminui a dificuldade matemática e numérica na resolução dos problemas sem

grandes perdas de precisão. Esse modelo é conhecido como onda difusiva e é utilizado em situações em que a velocidade não possui grande variação no espaço e no tempo (Negrão, 2015).

Para maior detalhamento das equações de Saint-Venant aplicadas a hidráulica fluvial, o autor recomenda a consulta a referência Silva *et al.*(2005).

3.1.2 Soluções Numéricas

As equações apresentadas na seção anterior são, costumeiramente, resolvidas por computadores. Para que isso seja feito, a resolução analítica tende a ser substituída por resolução numérica das equações. Alguns métodos numéricos serão apresentados nesta seção.

O método do passo padrão, ou “*Standard Step Method*” se baseia na aplicação da Equação da Conservação de Energia (Equação 3.4) entre duas seções de cálculo e na fórmula de Manning (Equação 3.2) para determinação da perda de carga entre as seções consideradas. O procedimento considera o escoamento unidimensional, permanente e gradualmente variado em canal prismático, declividade da linha de energia é constante entre as duas seções transversais e declividade do canal a 1:10 (Sousa, 2010). O procedimento inicia-se em uma seção de controle e prossegue no sentido no qual o controle está sendo exercido, no caso de escoamento subcrítico, de jusante para montante. O cálculo da declividade da curva de energia é tão preciso quanto menor for a distância entre as seções calculadas (Porto, 2006).

Um método que se destaca na resolução numérica das equações de Saint-Venant é o de diferenças finitas (Negrão, 2015). Este baseia-se na aproximação das derivadas da equação por diferenças finitas, como, por exemplo, a variação da altura do nível d’água em relação ao tempo, mostrado na Equação 3.7 (Fan et al., 2016). Sua solução pode ser feita pela técnica iterativa de Newton-Raphson (Akan, 1981).

$$\frac{\partial h}{\partial t} \cong \frac{h_i^{k+1} - h_i^k}{\Delta t} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Um critério de precisão numérica que pode ser utilizado é o número de Courant. Este permite a avaliação e decisão de passo de tempo ou de espaçamento entre as seções transversais, no caso de 1D, ou tamanho médio da célula, no caso de 2D. A premissa básica é que o intervalo de cálculo deve ser igual ou menor do que o tempo que a água leva

para viajar de uma seção transversal para outra (Coutinho,2015). Este número é definido pela Equação 3.8, onde: V_w é a velocidade de onda de cheia (m/s), normalmente maior que a velocidade média, ΔT (s) é o tempo do intervalo de cálculo, ou passo de tempo e Δx (m) é a distância entre as seções transversais ou tamanho médio da célula.

$$C = V_w \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Equação 3.8})$$

3.2 CURVA-CHAVE E HISTERESE

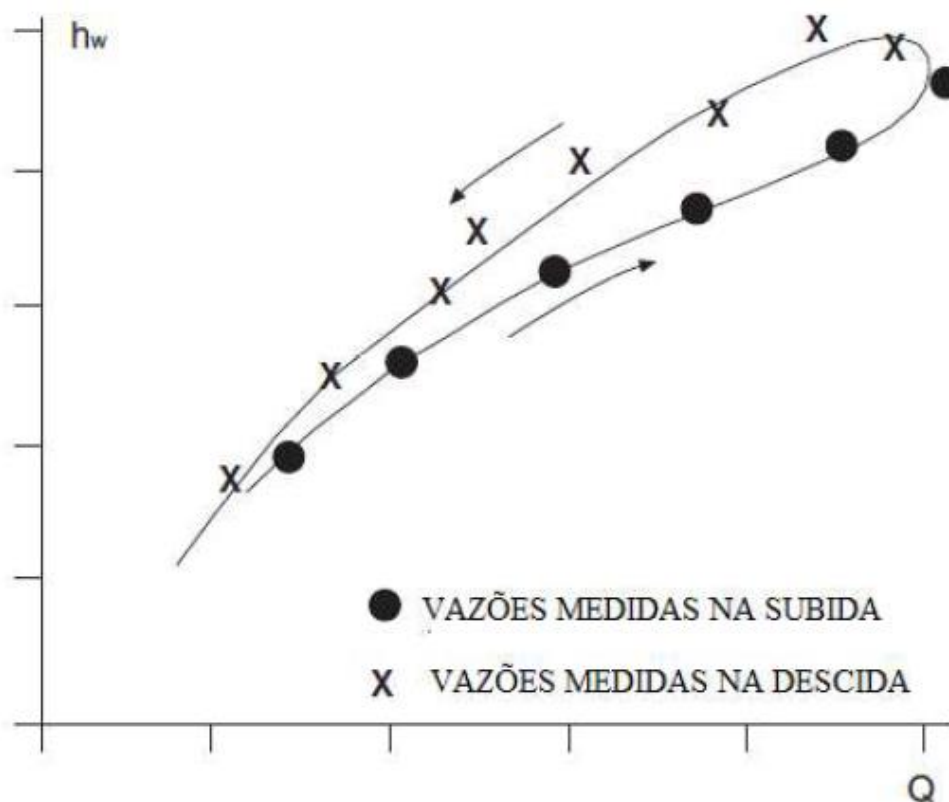
Para a análise do comportamento da água em canais livres, faz-se necessária a obtenção de dados históricos referentes ao escoamento, como nível d'água e vazão, por exemplo. A medição de vazão é um processo que demanda investimento significativo de tempo e recursos financeiros. Por isso é comum que a vazão seja determinada através de dados substitutos que sejam mais fáceis de obter e que sirvam como representantes da vazão (Velasco e Cook ,2011). Um dos métodos utilizados para a obtenção de dados de vazão é a geração de uma curva chave. Esse processo objetiva-se em, a partir de diversos pares de medições de vazões e suas respectivas cotas, obter uma função que melhor relacione os dados de cota e vazão, por meio de regressões ou métodos manuais, por exemplo (Osorio, 2017).

Apesar de sua importância, um dos grandes problemas do uso dos dados de vazões obtidos pela curva-chave é a incerteza envolvida em sua estimativa, por exemplo, a falta de conhecimento pleno da seção transversal do canal em épocas de cheia, tendo em vista que variações na geometria do canal após eventos de cheia são comuns, e compreensão plena do escoamento, como a alteração considerável que ocorre no regime de vazão quando o escoamento passa a ocorrer nas planícies de inundação (Pappenberger *et al.*, 2006). Velasco e Cook (2011) afirmam que a maior causa do entendimento limitado na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no desenvolvimento da curva chave, é o fato de que a grande maioria das pesquisas terem como objetivo a aplicação do método e não o conhecimento da física governante.

Pappenberger *et al.* (2006) afirma a necessidade da compreensão das incertezas envolvidas ao usar curva-chave como dado de entrada na condição de contorno, tendo em vista que estas podem atribuir até 25% de incerteza no pico de vazão. O modelo de seu trabalho se mostrou mais sensível aos dados de entrada de vazão do que ao coeficiente de Manning.

Outra premissa que agrega incertezas é a que a relação entre cota e vazão seja biunívoca, ou seja, para cada valor de cota tem-se um único valor da vazão, considerando o escoamento permanente. Entretanto, essa relação nem sempre acontece (Osorio, 2017).

Em muitos casos, a curva-chave não apresenta a biunivocidade da relação entre os valores de cota e vazão, apresentando, para uma mesma vazão, mais de um valor de cota, e vice versa. Esse efeito é conhecido como histerese (Kennedy, 1984). Esse fenômeno é geralmente associado a um escoamento transiente em canais de baixa declividade, quando a celeridade da onda de pressão (nível) é menor que a celeridade da onda de velocidade, fazendo com que a vazão máxima em uma determinada seção ocorra antes que a altura máxima. Este pode ser representado por um loop na relação de nível-vazão (Figura 3.3). Entretanto, remanso e rugosidade variáveis podem gerar curvas semelhantes (Mansanarez et al., 2016)



assim a necessidade do desenvolvimento de modelos mais complexos para a compreensão destes fenômenos.

3.3 MODELAGEM HIDRÁULICA

Em muitos dos casos de estudos de fenômenos ambientais, não se faz possível a medição de características relevantes, devido a limitações técnicas, tornando-se necessária a estimativa destas a partir de relações indiretas. Extrapolações ou previsões feitas a partir de medições anteriores para tomadas de decisões, são algumas das vantagens ao se fazer o uso de modelos (Beven, 2012).

Para a compreensão de um modelo, faz-se necessário o entendimento do processo de modelagem, este representado pelo fluxograma da Figura 3.4. Nela é possível observar que o início da modelagem se dá no conhecimento do sistema.

Na literatura existem algumas definições sobre sistema. Campos (2009) define sistema como uma estrutura formada por vários componentes que interagem entre si, recebendo impulsos, efetuando transformações e emitindo respostas. Um exemplo que pode ser configurado nessa definição são os rios, que interagem com características da bacia, como uso e ocupação do solo, e com afluentes, como em confluências, onde diferentes intensidades dessas interações podem levar a alterações no seu comportamento, como elevação do seu nível ou da sua vazão.

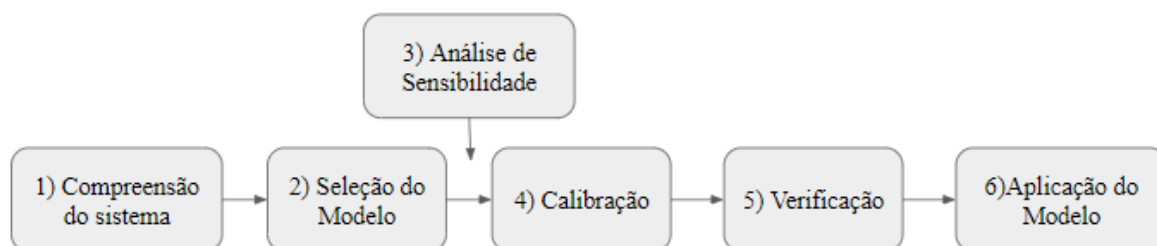


Figura 3.4 - Fluxograma do processo de Modelagem

Faz-se necessária a obtenção de informações relevantes do sistema para uma compreensão aceitável do mesmo. No caso de cursos d'água, a obtenção de dados como vazão, nível d'água, topografia e batimetria favorecem o entendimento e a modelagem.

Após a compreensão do sistema, faz-se necessária escolha de um modelo que possa representá-lo bem. Segundo Campos (2009) um modelo pode ser definido com um conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico pelo qual se procura explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades de um sistema.

Tucci (2005) apud Santos (2016) classifica os modelos em 3 tipos: físico, analógico e matemático. O primeiro é representado por um protótipo do sistema em escala menor, comuns em experimentos hidráulicos feitos em laboratório, como vertedores. O segundo busca semelhanças entre dois fenômenos físicos de maneira a realizar simulações de um a partir do outro, por exemplo a comparação entre um escoamento hidráulico e um circuito elétrico. Embora fundamentados em conceitos simples, intuitivos e fáceis de entender, são bastantes limitados em sua complexidade. Os modelos matemáticos são a representação de um sistema físico por meio de equações.

Dentro da última classificação, também ocorre a categorização de acordo com a relação entre as variáveis envolvidas no modelo em, por exemplo, empíricos e conceituais. Os modelos empíricos não necessariamente apresentam relação com os processos físicos envolvidos no sistema, utilizando funções que são baseadas em análises estatísticas. O modelo conceitual baseia-se na representação dos processos físicos que envolvem o fenômeno estudado, sendo subdividido em: semi conceituais e fisicamente fundamentados. O primeiro relaciona as características físicas do processo mantendo razoável empirismo na definição dos parâmetros e o segundo se aproxima bastante da base física do sistema (Filho et al., 2012). Conhecendo-se as classificações possíveis de modelo, torna-se mais bem fundamentada a escolha de um para a análise desejada.

A sensibilidade representa o nível em que um sistema responderá a uma mudança ocorrida em fatores controlantes (Christofolletti, 1999). Ou seja, a partir da mudança dos valores de uma variável independente, analisa quão grandes são as mudanças de uma variável dependente. Esse processo faz-se importante para que possa se escolher o melhor parâmetro para se fazer a calibração do modelo. Autores como Vanelli (2018), Alves (2017) e Lara (2017) utilizaram o coeficiente de Manning como parâmetro para calibração do modelo em seus estudos.

A calibração é o processo de ajuste definido como uma técnica de otimização na qual os valores dos parâmetros de um modelo são modificados pelos usuários ou através de uma técnica numérica (Santos, 2016). Nessa etapa ocorre a variação do(s) parâmetro(s) selecionado(s) até que uma função objetivo seja maximizada ou minimizada.

Fassoni-Andrade *et al.* (2017) utilizaram a minimização da raiz quadrada do erro quadrático médio (*root mean square error* – RMSE) entre o nível simulado e o observado para calibração do manning no baixo Amazonas. Esta função objetivo pode ser observada na Equação 3.9, onde $H_{OBS\ i}$, $H_{CALC\ i}$ e N são, respectivamente, nível observado, nível obtido pelo modelo e quantidade total de dados observados.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (H_{OBS\ i} - H_{CALC\ i})^2}{N}} \quad \text{Equação 3.9}$$

Oliveira et al. (2016), por exemplo, utilizam o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (Equação 3.10) como função objetivo a ser maximizada na calibração, onde $H_{obs_{i,x}}$ é a variável observada no tempo i na seção x ; $H_{calc_{i,x}}$ é a variável calculada no tempo i na seção x ; H_{obs_x} é o valor médio da variável na seção x , e t é o número de dados observados. No estudo citado, a variável H em questão foi o nível d'água.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (H_{obs_{i,x}} - H_{calc_{i,x}})^2}{\sum_{i=1}^t (H_{obs_{i,x}} - H_{obs_x})^2} \quad \text{(Equação 3.10)}$$

A verificação consiste na simulação do modelo, em um novo intervalo de dados, com os parâmetros ajustados para que seja conferida a consistência da calibração. Após os processos de modelagem, o modelo deverá apresentar resultados aceitáveis para simulação de dados futuros, sendo esta sua aplicação.

3.4 HEC-RAS

Com sua primeira versão lançada em 1995 pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército Americano (USACE), o software HEC-RAS 5.0 é um modelo que permite a simulação unidimensional de fluxo permanente, uni e bidimensional de fluxo variável, transporte de sedimentos, computação de leito móvel, bem como modelagem da temperatura e da qualidade da água (Brunner, 2016).

O software já foi utilizado em diversos estudos para compreensão do escoamento em rios. Consagrado em análise hidrodinâmica (Souza et al., 2007), faz uso das equações de Energia e de Saint-Venant para resolução de simulações em regime permanente e variável, respectivamente.

Vanelli *et al.* (2018), que fizeram uso do modelo para obtenção de curva-chave por simulação hidrodinâmica, afirmaram que o uso de simulação hidrodinâmica não elimina as incertezas referente às maiores vazões, entretanto por considerar as condições físicas do trecho do rio, pode contribuir para análise dos dados disponibilizados e auxiliar na obtenção de uma relação cota-vazão mais confiável. No estudo fizeram calibração manual

do coeficiente de Manning, alterando-o até que o nível d'água observado se aproximar do calculado. Estudo Semelhante também foi desenvolvido por Rosa *et al.* (2017).

Lara (2017) usou o modelo para análise da variabilidade do coeficiente de Manning no Rio Tapajós. A calibração e validação foram feitas em escoamento transiente e não uniforme, ajustando o coeficiente de rugosidade para variar em função da vazão e nível d'água. O modelo mostrou ser útil na reconstituição do comportamento no nível d'água do rio, e através de sua formulação, foi possível identificar o padrão de variabilidade hidráulico e temporal do coeficiente.

Cabral *et al.* (2016) fizeram o uso do modelo integrado a ferramentas de SIG para mapeamento de áreas de inundação urbana, apresentando resultados satisfatórios na representação da mancha de inundação. A calibração foi bem sucedida e demonstrou ser uma forma confiável de verificação de outros eventos de cheia.

Quiroga *et al.* (2016) e Fassoni-Andrade *et al.* (2017) fizeram uso do modelo em simulação bidimensional, o primeiro em análise de cheia na Amazônia Boliviana, o segundo, para análise da velocidade de escoamento em planícies de inundação do baixo rio Amazonas. Em ambos os casos os resultados apresentaram boa performance do modelo, o último apresentando resultados de velocidade próximos a 0,2 m/s nas planícies de inundação.

3.5 REGIÃO AMAZÔNICA

A Região Hidrográfica Amazônica é definida pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos como sendo constituída pela Bacia hidrográfica do Rio Amazonas, situada em território nacional, e pelas bacias da Ilha do Marajó e do estado do Amapá. Abrangendo os estados do Amazonas, Acre, Rondônia, Roraima, Pará, Amapá e norte do Mato Grosso, a região ocupa uma área de 3,8 milhões de quilômetros quadrados, correspondendo a 45% da área total do país (CNRH, 2003 apud ANTAQ 2013).

O rio Amazonas é o mais extenso da região. Com 6.515 quilômetros, 3.220 em território brasileiro, este nasce nos Andes peruanos com nome de Marañón, dividindo-se no Brasil em 2 trechos: Solimões, que se estende de Tabatinga (AM) até a confluência com o Rio Negro, próximo a Manaus (AM), e Amazonas, que vai deste ponto até a foz no Oceano Atlântico, trecho que possui, aproximadamente, 1.508 quilômetros (ANTAQ 2013).

O rio Negro nasce na Colômbia sob o nome de Rio Guainia, estando 1200 km dos 1700 km totais, dentro do território nacional. Possui extensão navegável descontínua de 801 km,

fluviométricas da bacia amazônica em relação ao modelo do geopotencial EGM08. Este mesmo referencial é utilizado pelas estações virtuais presentes na região.

Estações virtuais correspondem ao ponto de cruzamento da passagem do satélite com um corpo hídrico (Freitas *et al.*, 2010). Os níveis de água dos rios amazônicos são estimados por satélite desde o ano 2002, graças à introdução da altimetria espacial pelo observatório HYBAM na região. O Serviço de Observação HYBAM é uma estrutura de cooperação internacional criada no ano 2003 e financiada pelo IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*), o INSU e o *Observatoire Midi-Pyrénées*, em colaboração com várias universidades e serviços hidrológicos dos países da região da bacia amazônica (Brasil, Peru, Bolívia, Equador, Venezuela, Colômbia) (Vauchel, 2014). Outra base de dados disponível para níveis d'água obtidas por estações virtuais na região é o Centro de Dados e Serviços Theia (*Theia Land Data Centre*), criada em 2012 por 9 instituições públicas francesas envolvidas em ciências do ambiente (Theia, 2019). Segundo Ferreira (2018), as estações virtuais geradas pelos satélites ICESAT, ENVISAT e JASON-2 possuem diferenças em relação as estações fluviométricas na faixa de 0,3 a 0,5 metros.

Apesar dos dados de níveis na região serem diversos, os dados de vazão são mais escassos, gerando a necessidade de alternativas para sua obtenção. Wongchuig *et al.* (2019), fizeram uso do Modelo de Grandes Bacias para obtenção de dados de vazões, na bacia Amazônica. Este é um modelo hidrológico, semi-distribuído de larga escala para simular a fase terrestre do ciclo hidrológico. A análise foi feita de 1910 a 2010 em diversos rios da bacia amazônica, utilizando o coeficiente de Nash-Sutcliffe como métrica de performance, os valores variaram entre 0,6 e 0,7, demonstrando bons resultados.

Um fenômeno comum na bacia Amazônica é o extravasamento da calha principal do rio sobre as planícies de inundação (Lara, 2017), portanto, além do conhecimento de dados de nível e vazão, faz-se também necessário o conhecimento de informações sobre o relevo da região, tanto no canal principal quanto nas suas proximidades.

Confluências, como é o caso do ponto em que os rios Negro e Solimões unem-se para formar o rio Amazonas, próximo à Manaus, são locais suscetíveis a ocorrências de turbulência, com movimentos convergentes e divergentes, formação de vórtices ascendentes, descendentes e horizontais. As alterações nas características de fluxo, junto com a movimentação da carga de fundo nestes pontos, geralmente provocam transformações morfológicas no canal, com formações de cavidades similares a poços e deposição de sedimentos sob formas de barras. Franzinelli (2011) estudou a batimetria da região e a variação do relevo no período entre 1978 e 1998 e demonstrou como a região da

confluência está sujeita a maior variação da seção transversal do canal ao decorrer dos anos do que outros trechos. Parte desta análise pode ser visualizada na Figura 3.6.

A variação do relevo interfere diretamente no valor de rugosidade do canal. Alguns estudos relacionados ao coeficiente de Manning foram desenvolvidos na região da bacia amazônica, possibilitando o conhecimento de alguns dos valores comuns em diversos trechos. Os resultados de alguns destes estudos podem ser vistos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Valores comuns do n de Manning para a bacia Amazônica

Estudo	Trecho	Varição do n de Manning
Ferreira (2018)	Rio Amazonas	0,023
Fassoni-Andrade <i>et al.</i> (2017)	Rio Amazonas (Próximo ao município de Óbidos)	0,027
Strasser <i>et al.</i> (2005)	Rio Amazonas (Itacoatiara – Óbidos)	0,020-0,035
Strasser <i>et al.</i> (2005)	Rio Madeira (Manicoré – Faz. Vista Alegre)	0,015-0,043
Ferreira (2018)	Rio Negro	0,033
Ferreira (2018)	Rio Solimões	0,039
Alves (2018)	Rio Solimões	0,035-0,062
Ribeiro Neto (2001)	Rio Solimões (Manacapuru – Confluência)	0,028-0,036
Lara (2017)	Rio Tapajós	0,023-0,028

Ferreira (2018) usou o coeficiente de Manning como parâmetro de calibração na construção do modelo hidráulico em escoamento permanente unidimensional com uso de dados de altimetria de satélite no software HEC-RAS (5.0). O modelo também foi utilizado por Lara (2017) para reconstituir o comportamento fluviométrico do rio Tapajós, a fim de identificar o comportamento da variabilidade do coeficiente de Manning em função do regime fluviométrico. Fassoni-Andrade *et al.* (2017) fizeram uso da mesma ferramenta, porém para escoamento bidimensional no baixo rio Amazonas. Strasser *et al.* (2005)

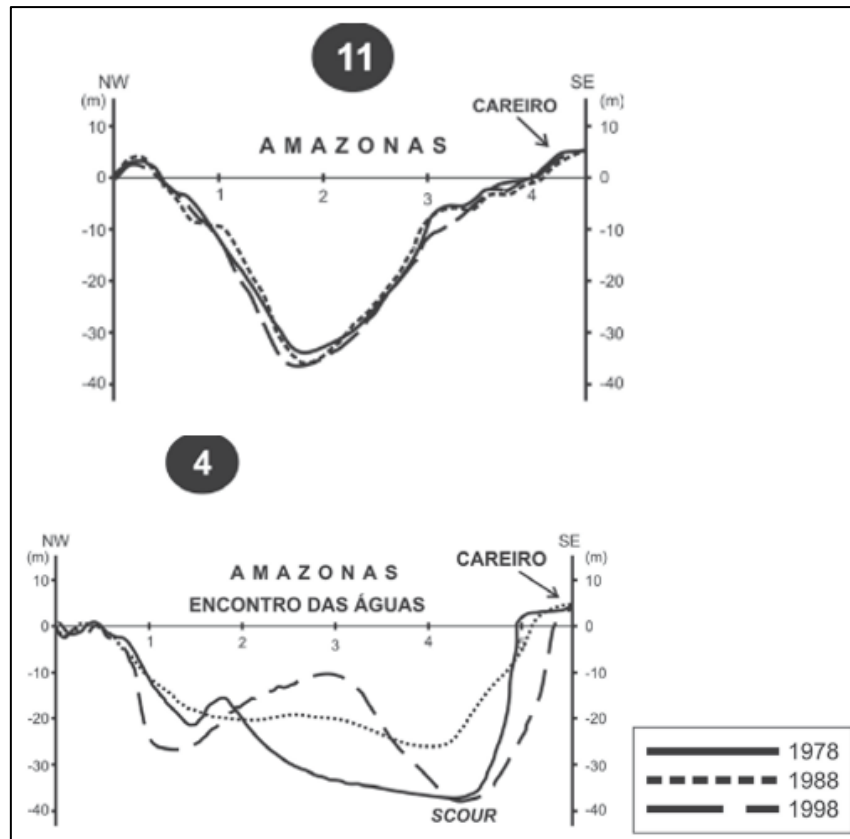
utilizou o modelo hidrodinâmico unidimensional PSV-Rio que, assim como o HEC-RAS, resolve as equações de Saint-Venant por diferenças finitas, e observou a variação do coeficiente de Manning em relação ao nível d'água. Alves (2018) obteve o coeficiente a partir da fórmula de Manning e de medições de vazão na estação de Manacapuru. Ribeiro Neto (2001) realizou simulações em regime permanente no curso médio do rio Amazonas com o modelo *Simulation of Irrigation Canal* (SIC).

A variação dos valores do coeficiente de Manning para trechos semelhantes dá-se pelas diferentes abordagens feitas na obtenção do mesmo. Lara (2017) afirma que um fluxo preferencial bem definido e composição do fundo do canal por sedimentos de areia fina e média contribui para um coeficiente de rugosidade mais baixo.

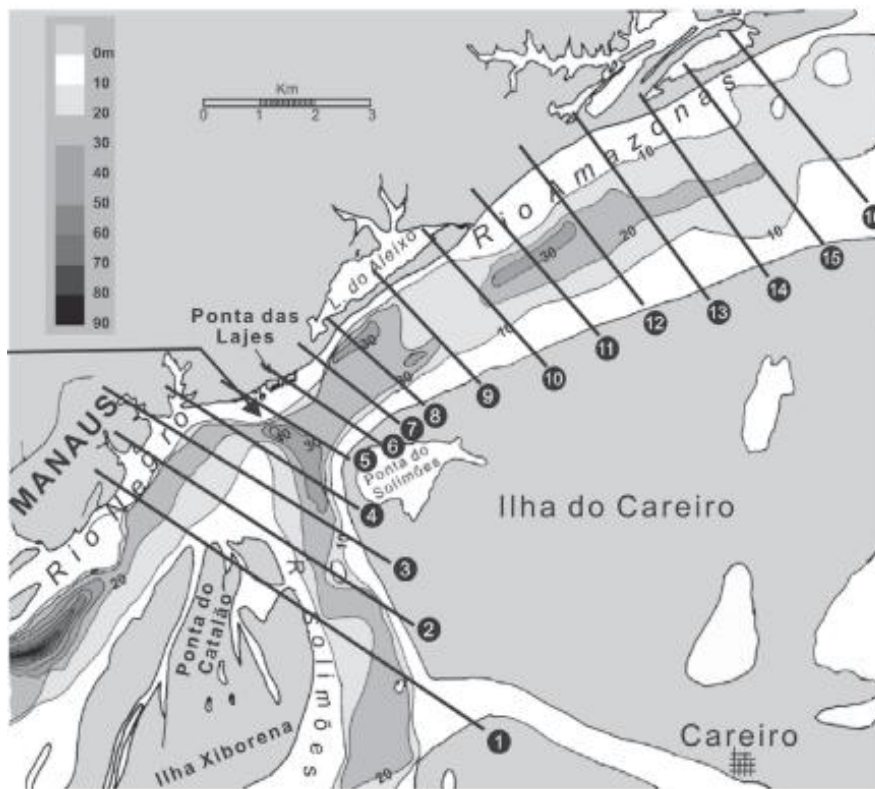
As diversas informações da bacia Amazônica apresentadas nesta seção são utilizadas para melhor compreensão do comportamento dos cursos hídricos da região.

As comunidades que residem próximas ao rio, também são dependentes do comportamento deste para o planejamento de suas rotinas. A compreensão do comportamento do rio, permite que algumas medidas tomadas pelo governo tenham respaldo técnico mais bem estabelecido. Um exemplo pode ser o do município de Manaus que decretou em 2012 a Lei nº 1666, que institui o “Auxílio Aluguel”. Este benefício refere-se a quantia de R\$ 300,00 a ser concedida pela Secretaria Municipal de Assistência Social e Direitos Humanos (SEMASDH) às famílias vítimas de enchentes, desmoronamentos, remoção de situação de risco ou por forças de obras públicas, que estejam desabrigadas, desalojadas ou em situação de vulnerabilidade temporária.

Situações deste tipo reafirmam a necessidade de estudos que descrevam de maneira representativa o comportamento hidrodinâmico dos rios da região.



(a)



(b)

Figura 3.6 - Batimetria da confluência Negro-Solimões (a) e suas localizações (b)
(Fonte: Adaptado de Franzinelli, 2011)

4 METODOLOGIA

A seguir será apresentado o procedimento adotado para alcançar os objetivos propostos, tanto o principal quanto o específico. A metodologia apresenta uma descrição dos passos realizados no modelo. Iniciando pela descrição da área e das informações iniciais utilizadas baseadas no trabalho de Ferreira (2018). Em seguida a obtenção dos dados obtidos para situação de contorno das simulações em escoamento variável. Posteriormente, a definição das estações utilizadas para a calibração do modelo. Por fim os métodos utilizados para a calibração.

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada entre a confluência dos rios Negro e Solimões até a foz do rio Madeira, como está representado na Figura 4.1. A área apresenta influência de remanso e, como consequência, histerese na curva-chave, fenômenos que atraem a atenção para estudos hidráulicos.

No caso do presente estudo, foram compiladas as informações disponíveis em estações fluviométricas, disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas no site HIDROWEB, e virtuais, disponibilizadas pelo Serviço de Observação SO HYBAM e na base de dados do *Theia-Land Data Centre*. Então foi analisada a sua distribuição no tempo para avaliação do período em análise (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3). Além das informações das estações, foram utilizadas também informações do estudo de Wongchuig *et al.* (2019).

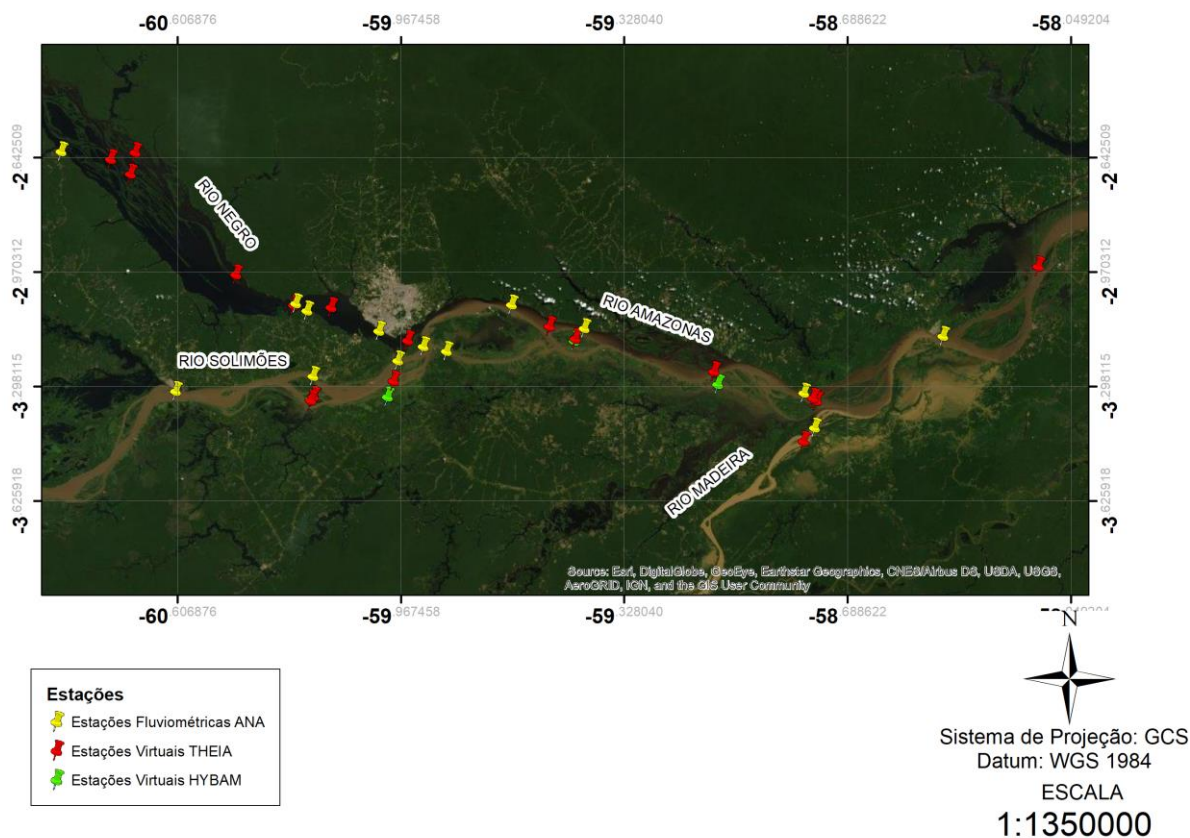


Figura 4.1 - Área de Estudo

Tabela 4.1 - Dados Disponíveis das Estações Fluviométricas
(Fonte: ANA, 2019)

Rio	Nome	Código	Tipo de dado e período disponível		
			Nível d'água	Resumo de descarga	Vazões
Negro	Novo Airão	14900050	12/2014-08/2018	-	-
Negro	Tatu Paricatuba	14911000	10/2014-01/2019	01/2014-02/2019	-
Negro	Paricatuba	14910000	-	03/1995-07/2011	-
Negro	Manaus	14990000	09/1902-06/2014	04/2008-02/2019	-
Solimões	Manacapuru montante	14070000	-	01/2014-10/2018	
Solimões	Manacapuru	14100000	04/1972-01/2019	05/1973-02/2019	01/1972-05/2018
Solimões	Irاندuba	14101000	12/2014-01/2019	-	-
Solimões	Comunidade Santa Luzia	14201000	10/2014-02/2015	-	-
Solimões	Fazenda Bom jardim	14200000	01/2008-02/2009	-	-
Solimões	Careiro	15042200	08/1977-02/2019	08/1977-03/2019	01/2006-11/2017

Tabela 4.1 - Dados Disponíveis das Estações Fluviométricas
(Fonte: ANA, 2019) (Cont.)

Amazonas	Jatuarana	15030000	08/1977-02/2019	10/1977-03/2019	08/1977-01/2015
Amazonas	Comunidade Bom Sucesso	15031000	11/2014-02/2019	-	-
Amazonas	Iracema	15042200	11/2014-02/2019	-	-
Amazonas	Iatacoatiara	16030000	11/1972-12/2018	03/2008-02/2019	01/2015-05/2018
Madeira	Foz do Madeira	15901000	-	04/2014-03/2019	-

Tabela 4.2 - Períodos de níveis d'água disponíveis em estações virtuais
(Fonte: *Theia-Land Data Centre*, 2019)

Rio	Nome	Período de informação disponível
Negro	Amz_ngo_env_0106_01	10/2002-09/2010
Negro	Amz_ngo_env_0149_01	11/2002-09/2010
Negro	Amz_ngo_env_0564_01	10/2002-10/2010
Negro	Amz_ngo_jas_0063_01	07/2008-11/2019
Negro	Amz_ngo_s3a_0177_00	07/2016-11/2019
Negro	Amz_ngo_s3a_0676_00	06/2016-11/2019
Negro	Amz_ngo_s3a_0676_01	06/2016-11/2019
Solimões	Amz_sol_env_0149_01	12/2002-09/2010
Solimões	Amz_sol_env_0564_01	10/2002-10/2010
Solimões	Amz_sol_jas_0063_01	07/2008-11/2019
Madeira	Amz_mad_env_0478_01	10/2002-09/2010
Amazonas	Amz_amz_env_0020_01	10/2002-09/2010
Amazonas	Amz_amz_env_0063_01	10/2002-09/2010
Amazonas	Amz_amz_env_0478_02	10/2002-09/2010
Amazonas	Amz_amz_env_0521_01	10/2002-10/2010
Amazonas	Amz_amz_env_0607_01	10/2002-10/2010
Amazonas	Amz_amz_jas_0152_01	07/2008-11/2019

Tabela 4.3-Períodos de níveis d'água disponíveis em estações virtuais
(Fonte: HYBAM, 2019)

Rio	Nome	Período de informação disponível
Negro	ENV564Parica	11/2002-07/2010
Solimões	ENV564JuMana	11/2002-08/2010
Solimões	ENV149StaLuz	01/2003-07/2010
Solimões	JA2063Encont	07/2008-04/2017
Amazonas	ENV020JuJatu	01/2003-07/2010
Amazonas	JA2152Eva	07/2008-09/2016

4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

No presente trabalho, as estações fluviométricas e estações virtuais foram colocadas numa mesma referência, o geoide EGM 2008, a partir do acréscimo dos zeros fixos nas réguas das estações fluviométricas, que podem ter valores positivos ou negativos dependendo da estação, obtidos na tese de Moreira (2016).

As informações topobatimétricas do modelo foram obtidas a partir do modelo digital de superfície gerado do estudo de Ferreira (2018), que utilizou dados altimétricos de satélite fornecido pela Universidade de Bristol (2015) e dados batimétricos do rio disponíveis no site da diretoria de hidrografia e navegação (DHN) da marinha do Brasil, que são profundidades reduzidas ao nível acima do qual o rio Amazonas permanece por, aproximadamente, 90% do tempo. Para mais detalhes sobre como foi feita a adaptação dos dados de batimetria da DHN ao modelo digital, recomenda-se a consulta à referência Ferreira (2018). O modelo digital de superfície pode ser visualizado na área de estudo na Figura 4.2.

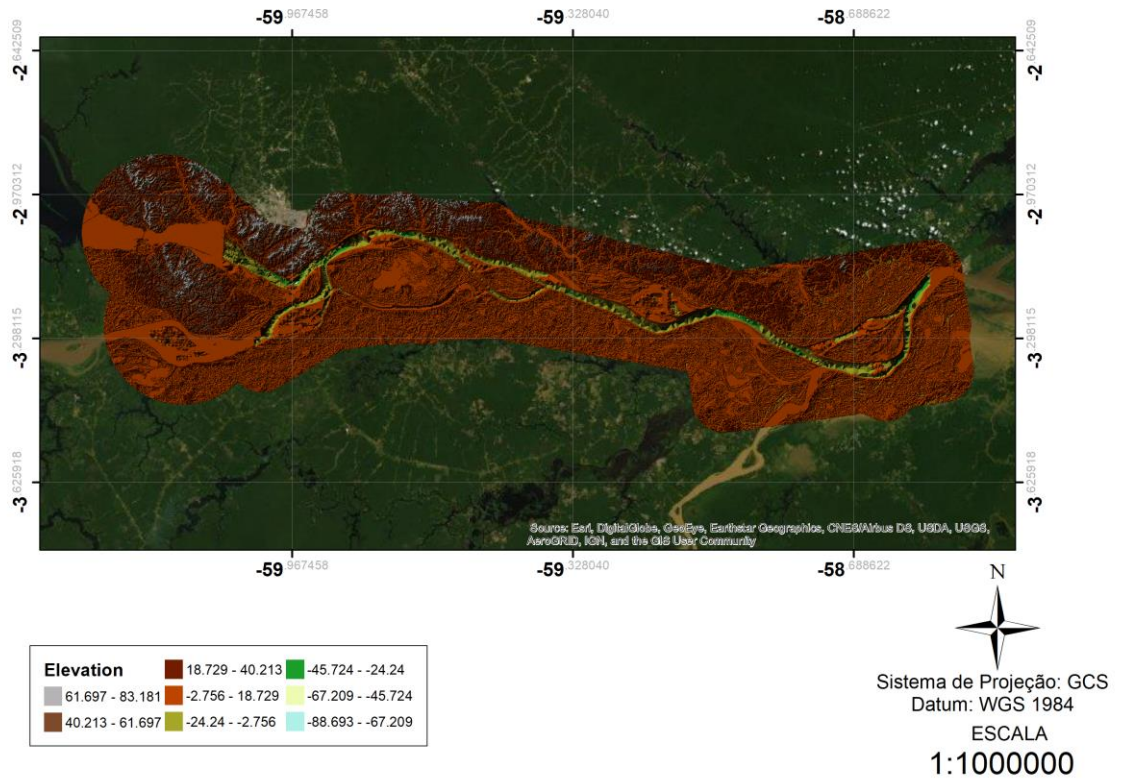


Figura 4.2 - Modelo Digital de Superfície da área de estudo

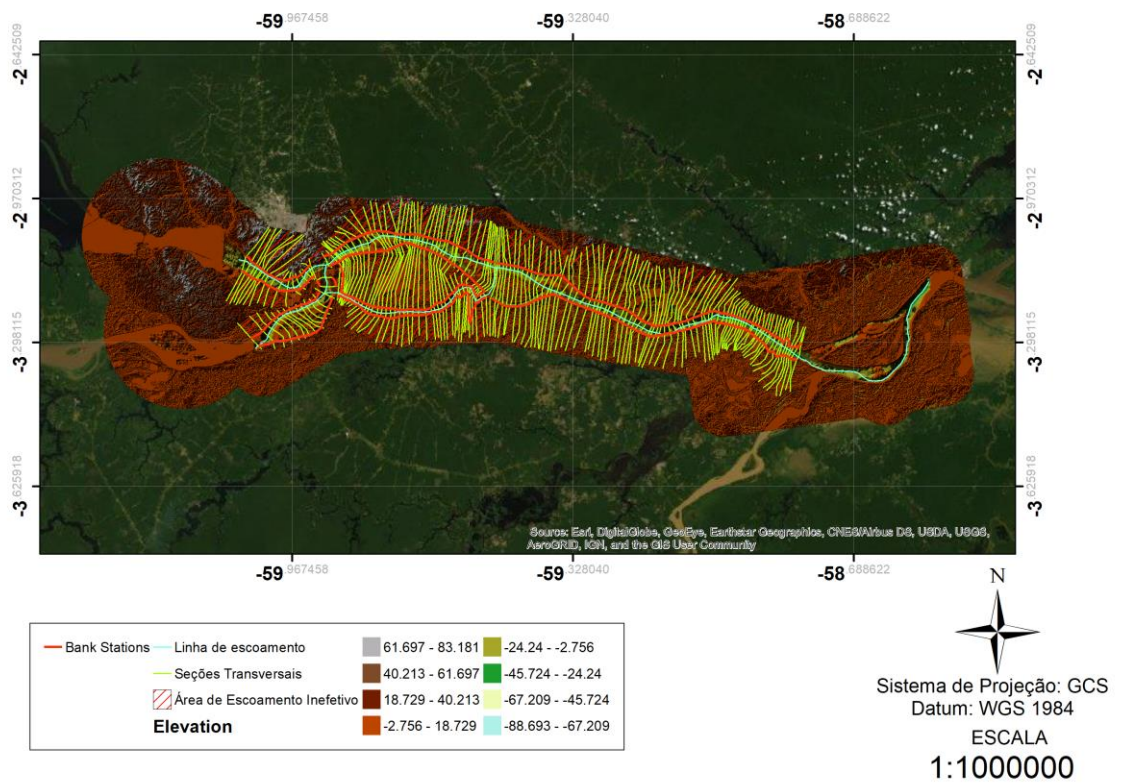


Figura 4.3-Elementos geométricos do modelo

O TIN apresentado na Figura 4.2 serviu como base para os cálculos referentes à geometria e propriedades hidráulicas do canal. Foi utilizada a ferramenta HEC-GeoRAS para a construção das seções transversais, talvegue do rio e áreas inefetivas e posteriormente exportadas para o HEC-RAS (Figura 4.3).

As simulações foram feitas em escoamento não-permanente com o modelo hidrodinâmico do HEC-RAS no período de 01 de janeiro de 2010 a 31 de dezembro de 2010. Considerando o critério de estabilidade de Courant:

$$\Delta t * \frac{v}{\Delta x} \leq 1 \quad \text{Equação 4.1}$$

o estudo de Fassoni-Andrade *et al.* (2017) utilizou, no baixo rio Amazonas, $\Delta t = 2 \text{ min}$ e $\Delta x = 300m$, para o modelo hidrodinâmico. O espaçamento médio (Δx) das seções do presente estudo foi de 1km, portanto, foi escolhido o passo de 5 min para as simulações.

4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para que o modelo fosse simulado em condição de escoamento transiente no período de um ano, foram utilizadas como condições de contorno vazão nos rios Negro e Solimões, referenciadas às seções mais a montante do modelo, e nível d'água no rio Amazonas, na seção mais a jusante, nos locais destacados na Figura 4.4, nas três situações foram utilizados dados diários.

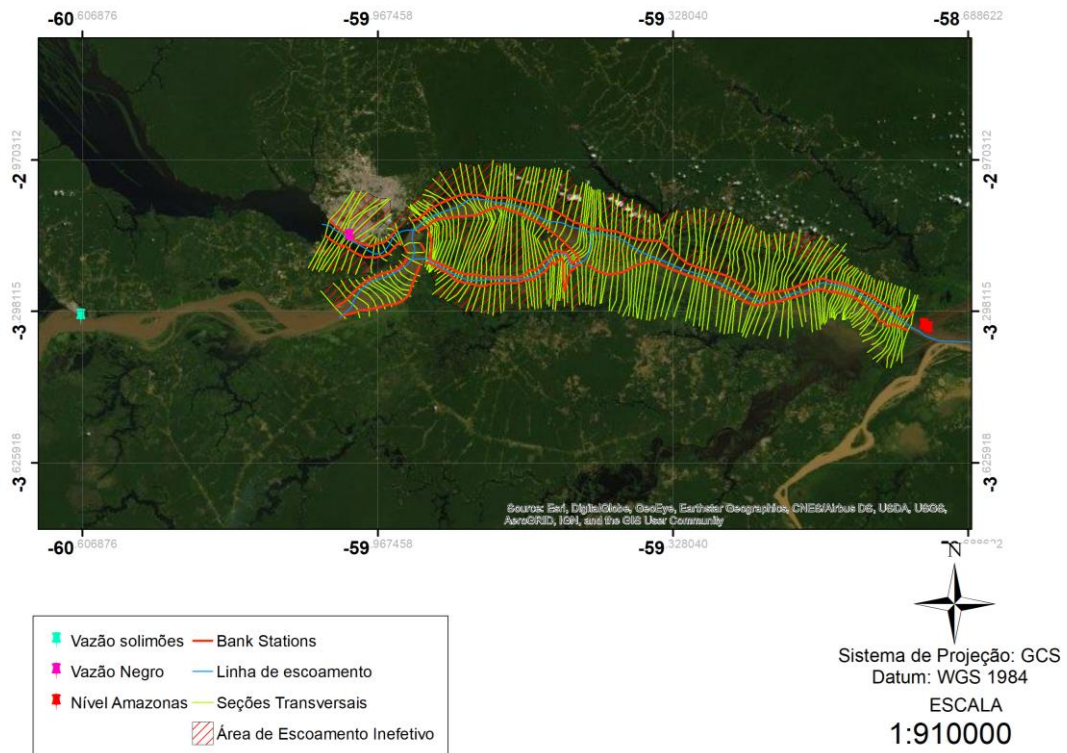


Figura 4.4 - Localização das condições de contorno do modelo

4.3.1 Rio Negro

Devido à falta de dados diários de vazão no Rio Negro no período de um ano, foi assumida a confiabilidade dos dados do estudo de Wongchuig *et al.* (2019). Para o rio Negro, o ano de 2010 apresentou boa aderência ao comparar-se com os dados de vazão medidos na estação de Manaus, com coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,96, justificando assim o uso para que fosse assumido os valores de vazões diárias. Os resultados do modelo de Wongchuig *et al.*(2019) comparados aos dados observados na estação de Manaus, podem ser visualizados nas Figura 4.5 e Figura 4.6.

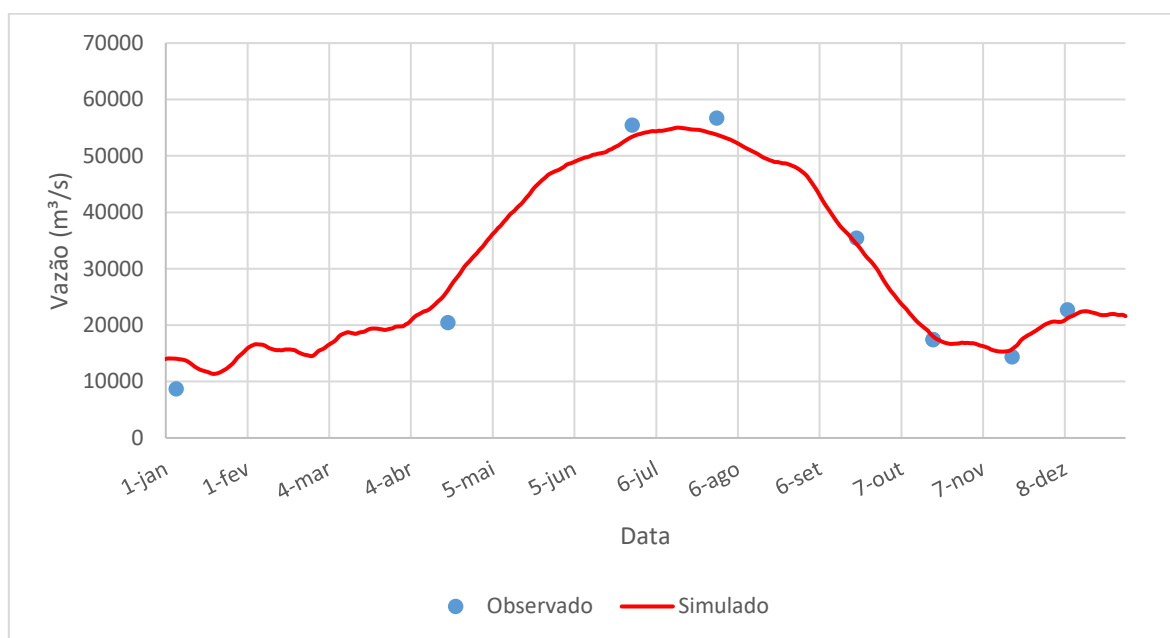


Figura 4.5- Modelo de Wongchuig *et al.* (2019) comparado ao observado na estação de Manaus no ano de 2010

4.3.2 Rio Solimões

Os dados de vazão do rio Solimões foram obtidos da estação fluviométrica de Manacapuru, que fica 63 quilômetros a montante da seção transversal na qual os dados foram atribuídos. Os dados de vazão na estação disponibilizados pela ANA foram obtidos a partir da curva de descarga da seção e foram utilizados por cobrir praticamente o ano de 2010 inteiro, faltando apenas 3 dias no mês de outubro, que foram preenchidos automaticamente por regressão pelo HEC-RAS.

Pelo princípio da continuidade, foi considerado que a vazão referente a estação, é a mesma que passa na seção determinada no modelo. A distribuição dos dados está apresentada na Figura 4.7.

4.3.3 Rio Amazonas

A condição de jusante solicitada pelo modelo é a de nível d'água. Para a obtenção destas informações foram utilizadas as cotas disponibilizadas pelas estações virtuais amz_amz_env_0063_01 e amz_amz_env_0478_02, ambas com informações disponíveis no Hidroweb do *Theia-Land Data Centre*. No ano de 2010, fazendo-se o uso das informações presentes das duas estações, não foi possível obter dados do ano inteiro, a distribuição do ano pode ser vista na Figura 4.8.

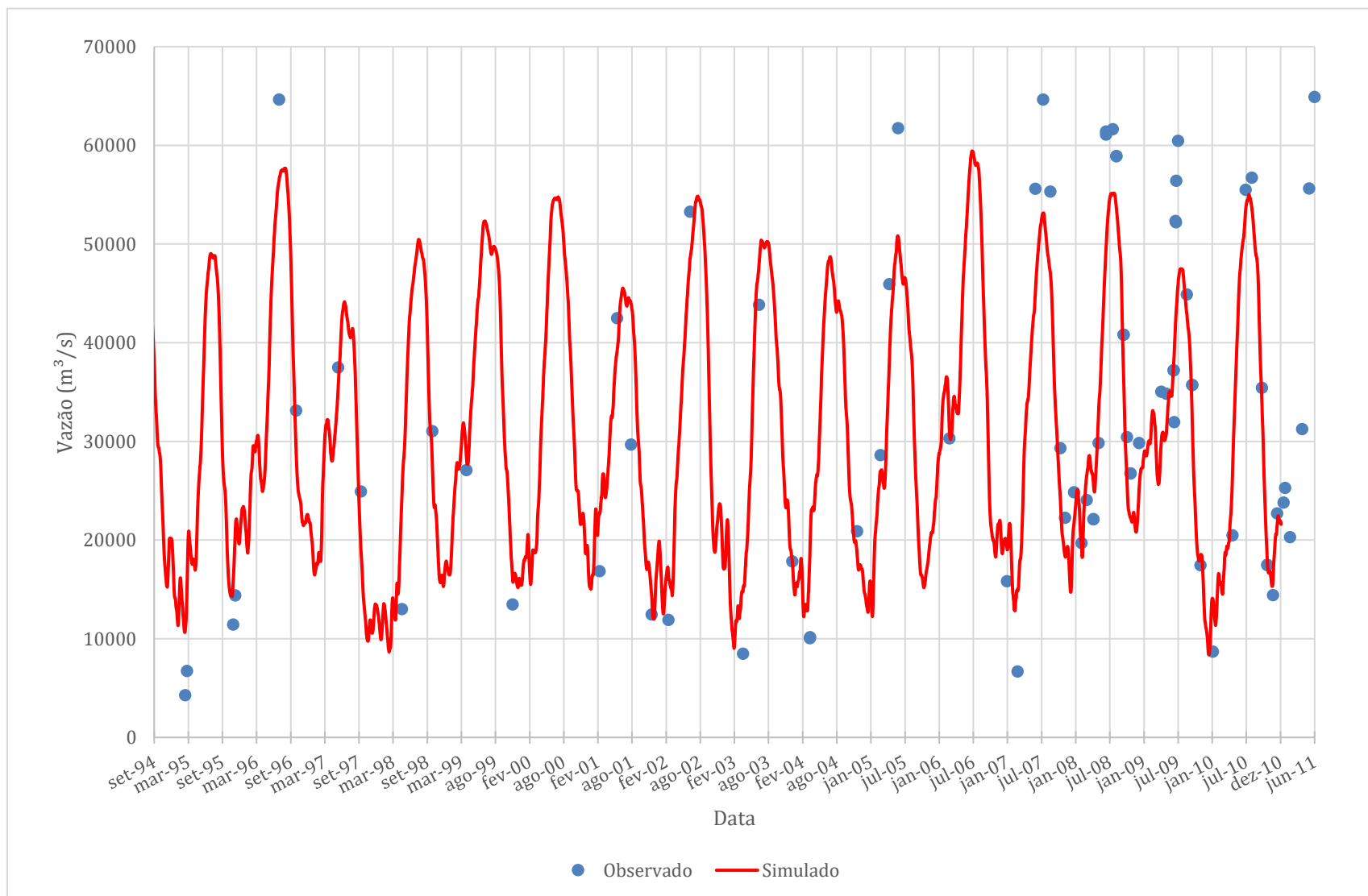


Figura 4.6 - Modelo de Wongchuig et al. (2019) comparado ao observado na estação de Manaus

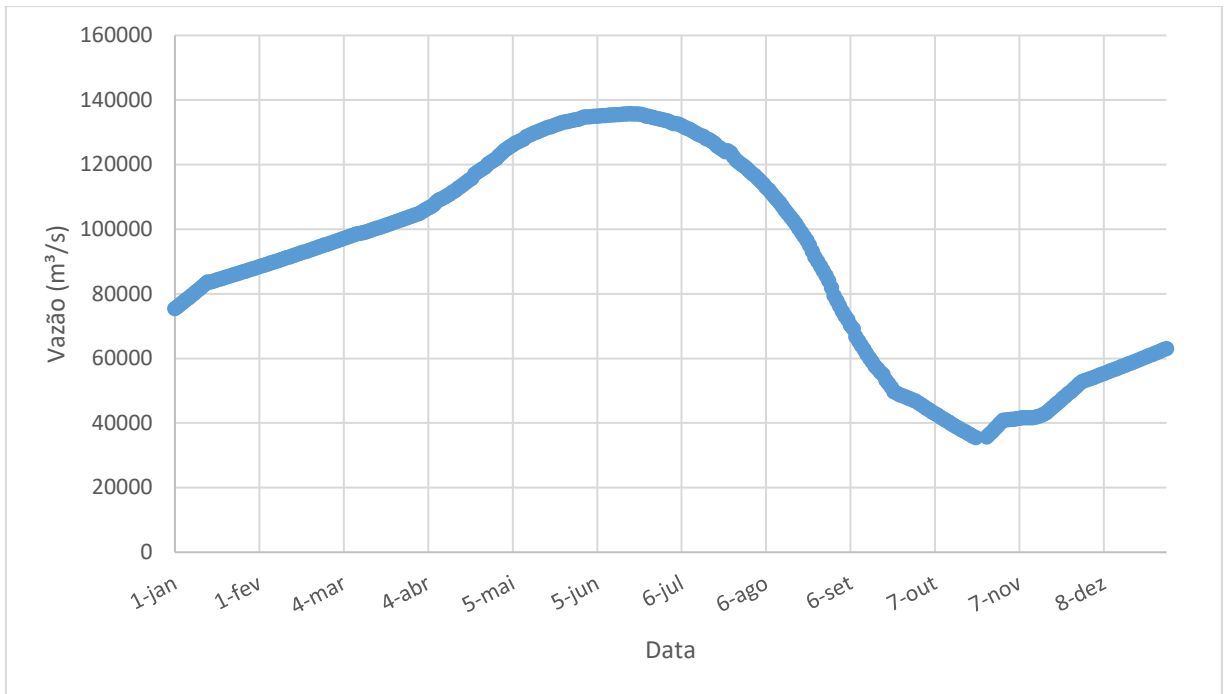


Figura 4.7 - Dados de vazão da estação fluviométrica de Manacapuru (Rio Solimões)

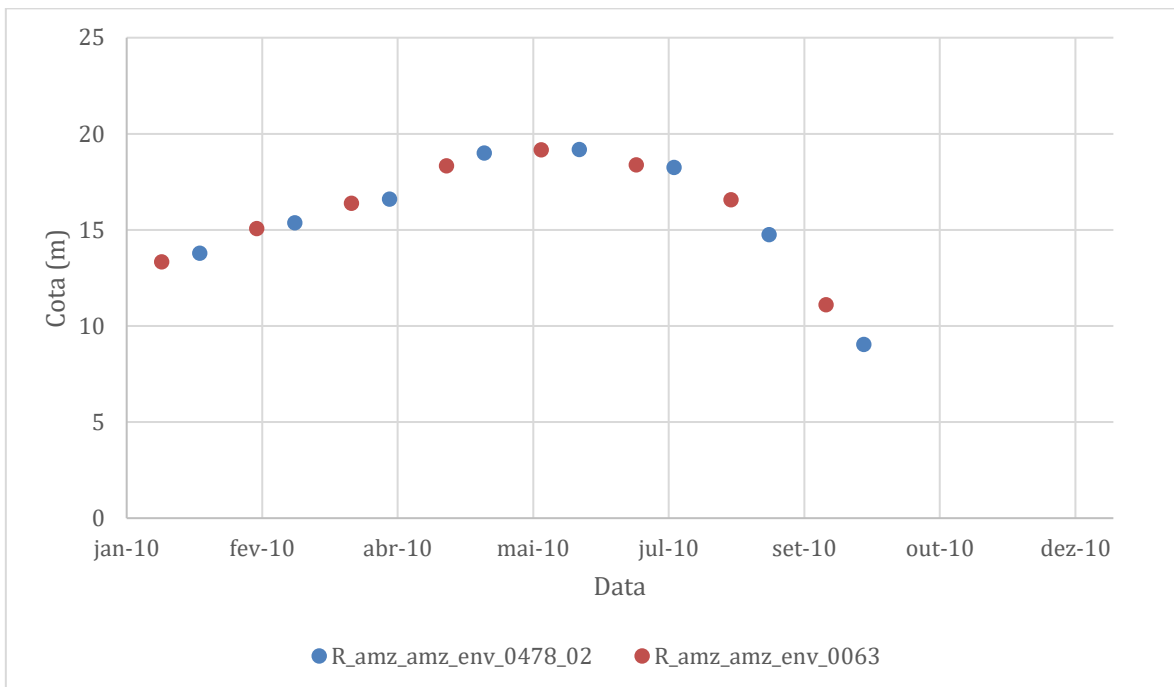


Figura 4.8 - Distribuição dos dados de nível no rio Amazonas no ano de 2010 nas proximidades da estação Iracema

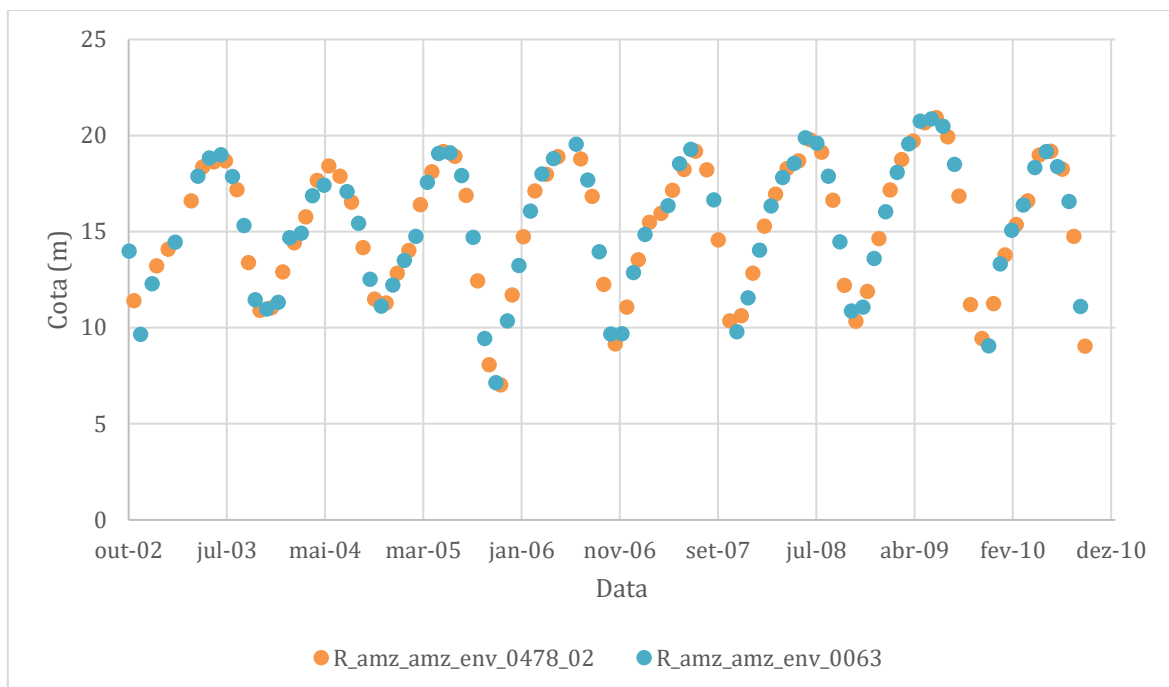


Figura 4.9 - Distribuição temporal dos dados das duas estações virtuais próximas a estação de Iracema

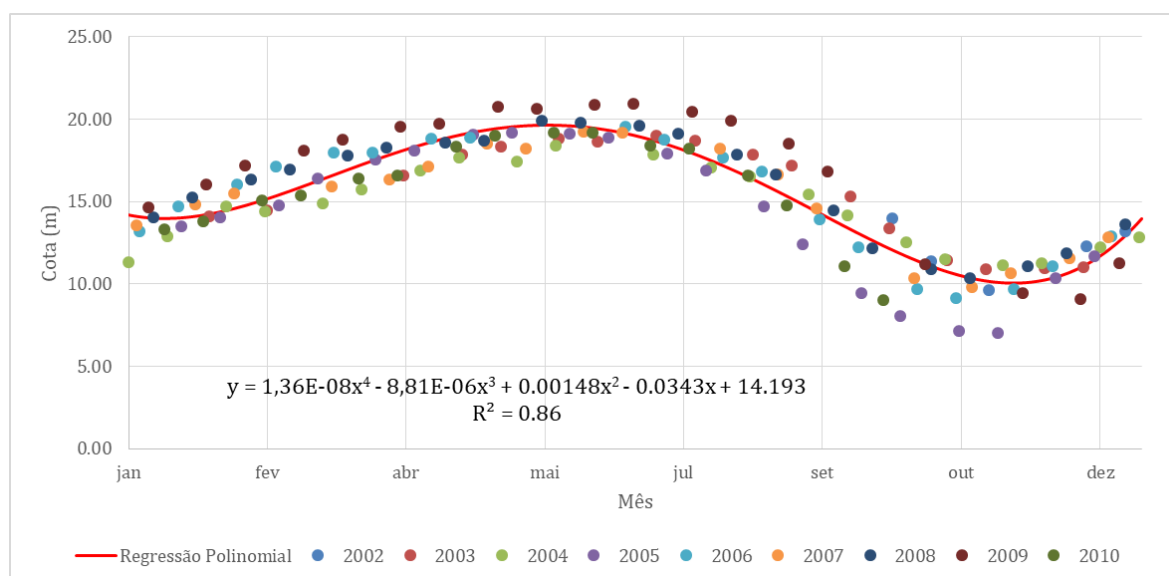


Figura 4.10-Regressão Polinomial Dados de Nível Amazonas próximo à estação Iracema

Para obtenção de dados que pudessem ser usados de espaçamento diário de nível a jusante, foram coletados todos os dados das duas estações virtuais próximas a estação de Iracema (Figura 4.9), redistribuídos no espaçamento de um ano e feita uma regressão polinomial em função do dia do ano (Figura 4.10) para utilização no modelo. A regressão polinomial não apresentou melhoria significativa para polinômios com grau maior que 4,

portanto foi-se utilizado o que está representado na Figura 4.10. Obtendo-se o valor referente a cada dia do ano, foi-se então colocado os valores no software HEC-RAS.

4.4 CALIBRAÇÃO

Para a calibração do modelo foi escolhido o coeficiente de Manning como parâmetro a ser calibrado, utilizando-se valores médios da planície de inundação baseadas no trabalho de Ferreira (2018) e alterando-se manualmente os valores do canal principal de 6 trechos (Figura 4.11) entre 0.01 e 0.04. Em seguida foi feita a calibração com um mesmo Manning para toda seção transversal, a fim da tentativa de simplificar a calibração do modelo. Por fim foram feitas algumas alterações dos valores de Manning nas planícies de inundação. A alteração dos valores de Manning foi feita de forma que buscou-se obter o menor valor de RMSE, então a cada simulação, o resultado do RMSE era comparado com o anterior, na simulação em que o valor fosse maior que o anterior, alterava-se o trecho a ter o valor de Manning mudado.

Como medição para calibração foi utilizada a métrica estatística RMSE (*Root-Mean-Square Error*), comparando-se os níveis medidos nas estações equivalentes as seções e o valor das simulações.

4.4.1 ESTAÇÕES DE CALIBRAÇÃO

Como o modelo de Wongchuig *et al.* (2019) apresentou melhores resultados no ano de 2010, este foi o ano escolhido para simular o modelo, portanto os dados utilizados para calibração foram referentes as estações presentes na área de estudo com a maior quantidade de dados no ano de 2010. Analisando-se todas as estações disponíveis na região, foram então escolhidas 7 estações, 3 fluviométricas e 4 virtuais. As primeiras foram corrigidas baseado na tese de Moreira (2016) e as seguintes já estavam no mesmo referencial. A localização das estações e das seções podem ser visualizadas na Figura 4.11. A distribuição temporal dos dados de nível podem ser vistas nas Figura 4.12 a Figura 4.18.

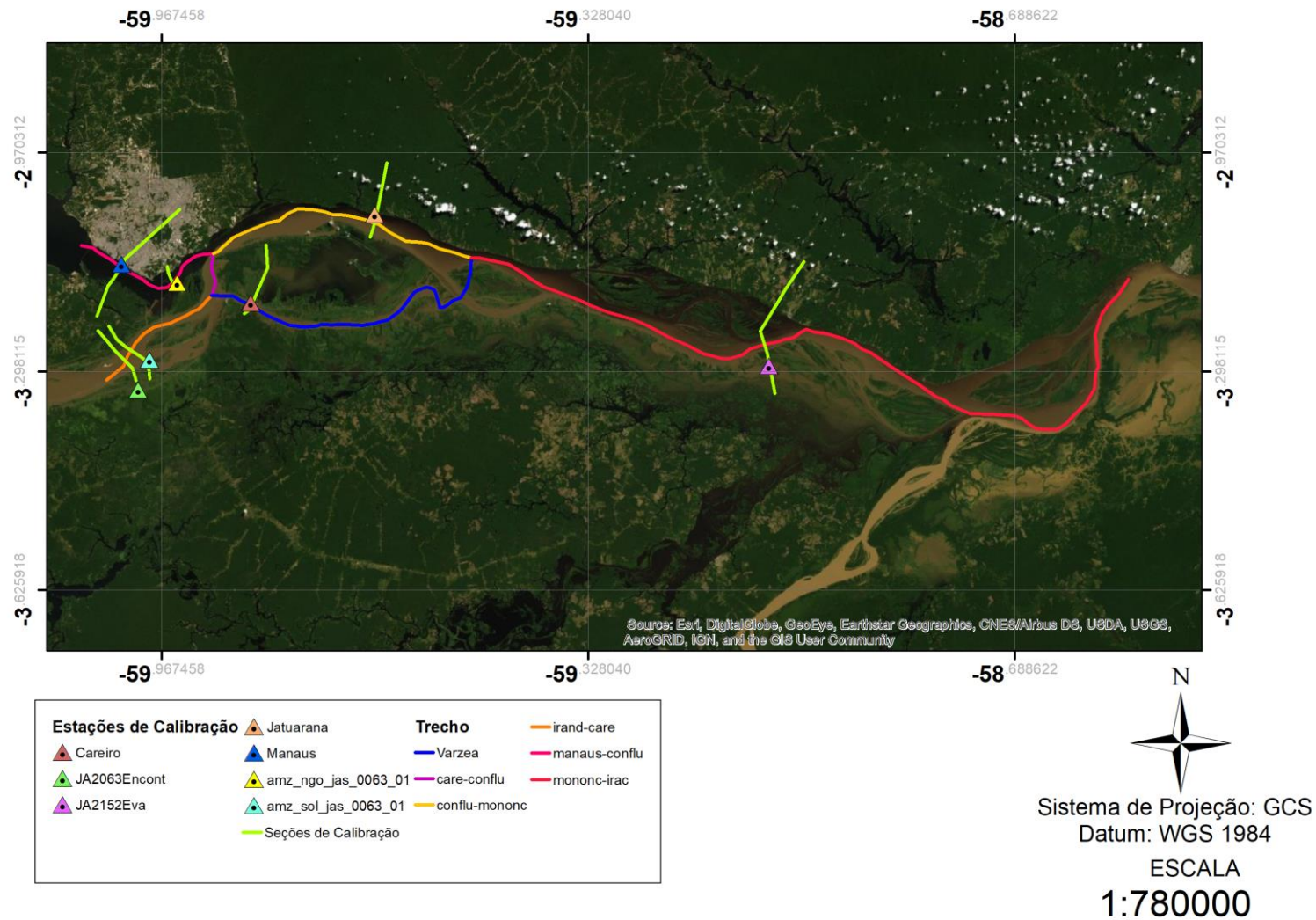


Figura 4.11 - Trechos do modelo, estações e seções usadas para calibração

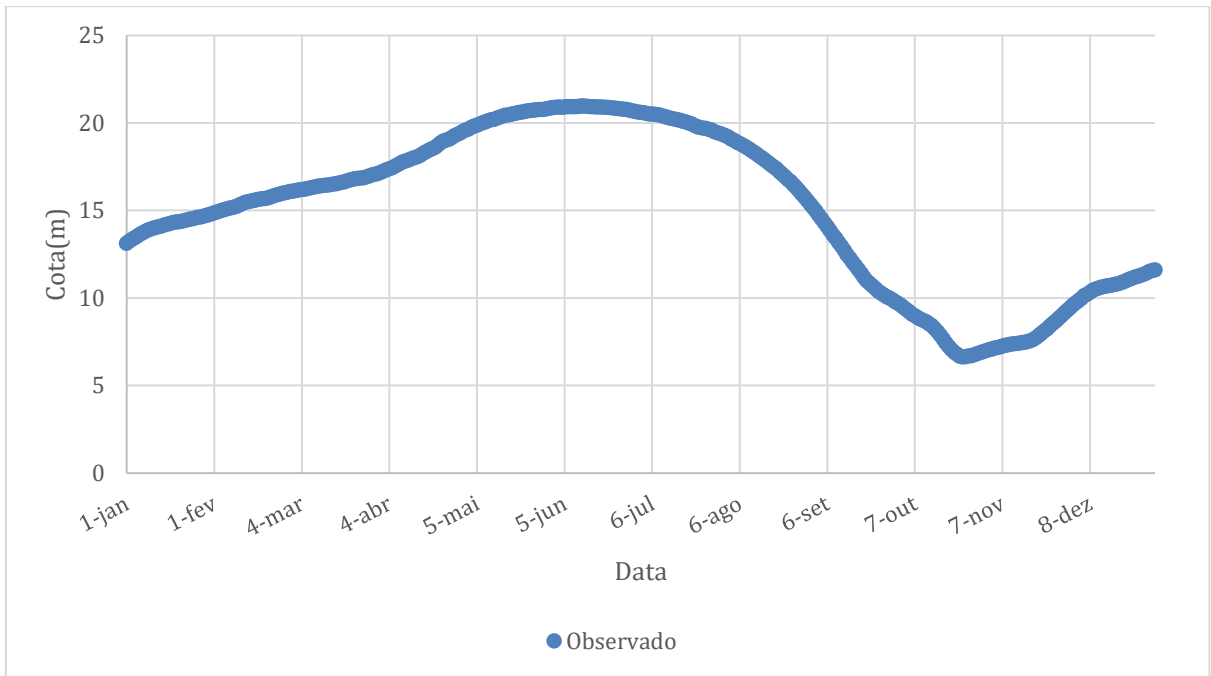


Figura 4.12 - Níveis d'água em 2010 da estação fluviométrica Manaus

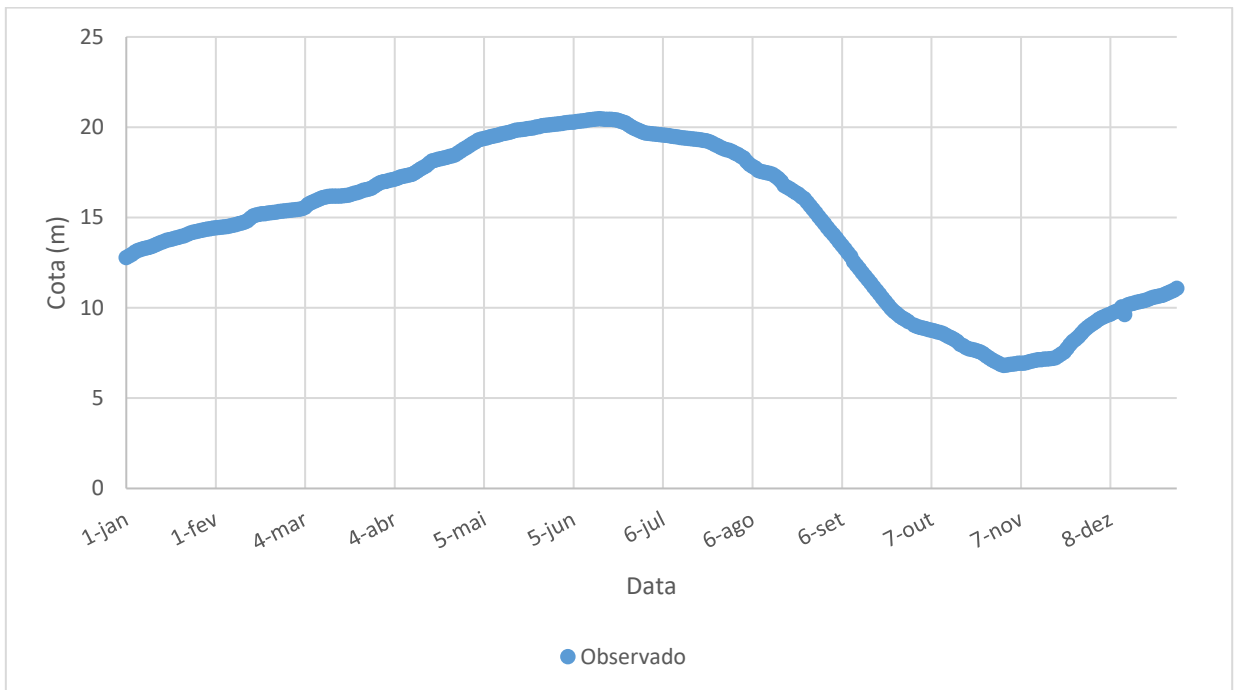


Figura 4.13 - Níveis d'água em 2010 da estação fluviométrica Jatuarana

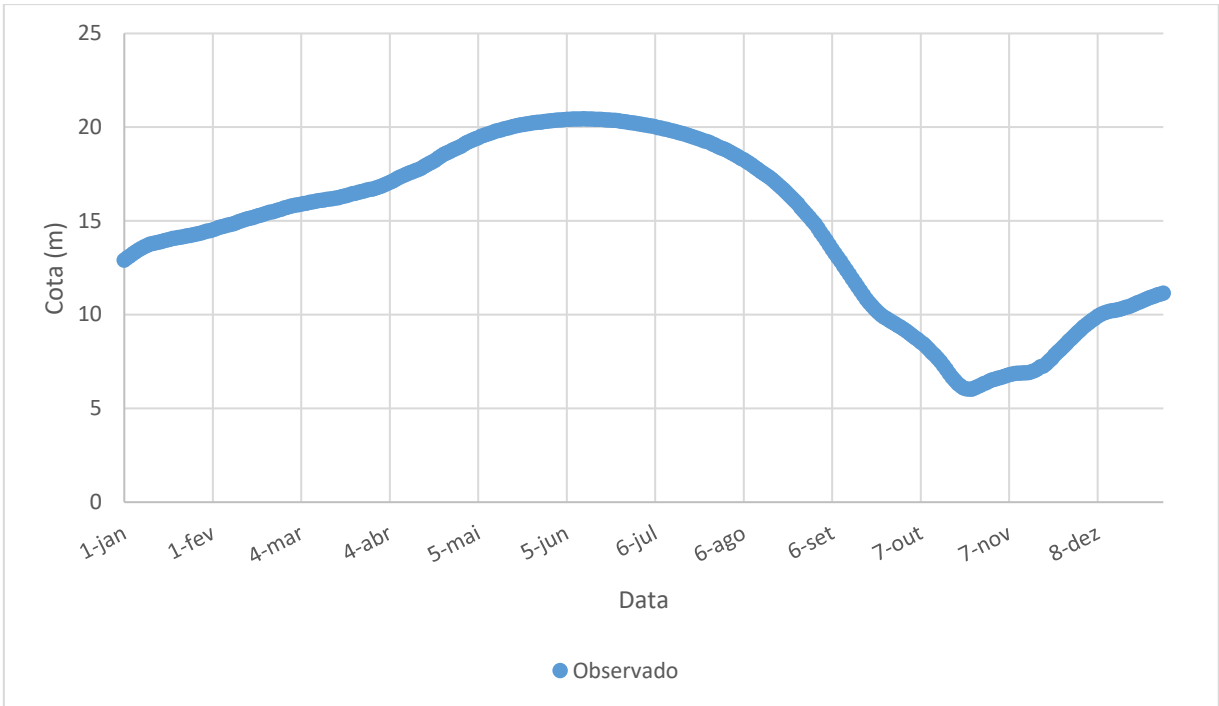


Figura 4.14 - Níveis d'água em 2010 da estação fluviométrica Careiro

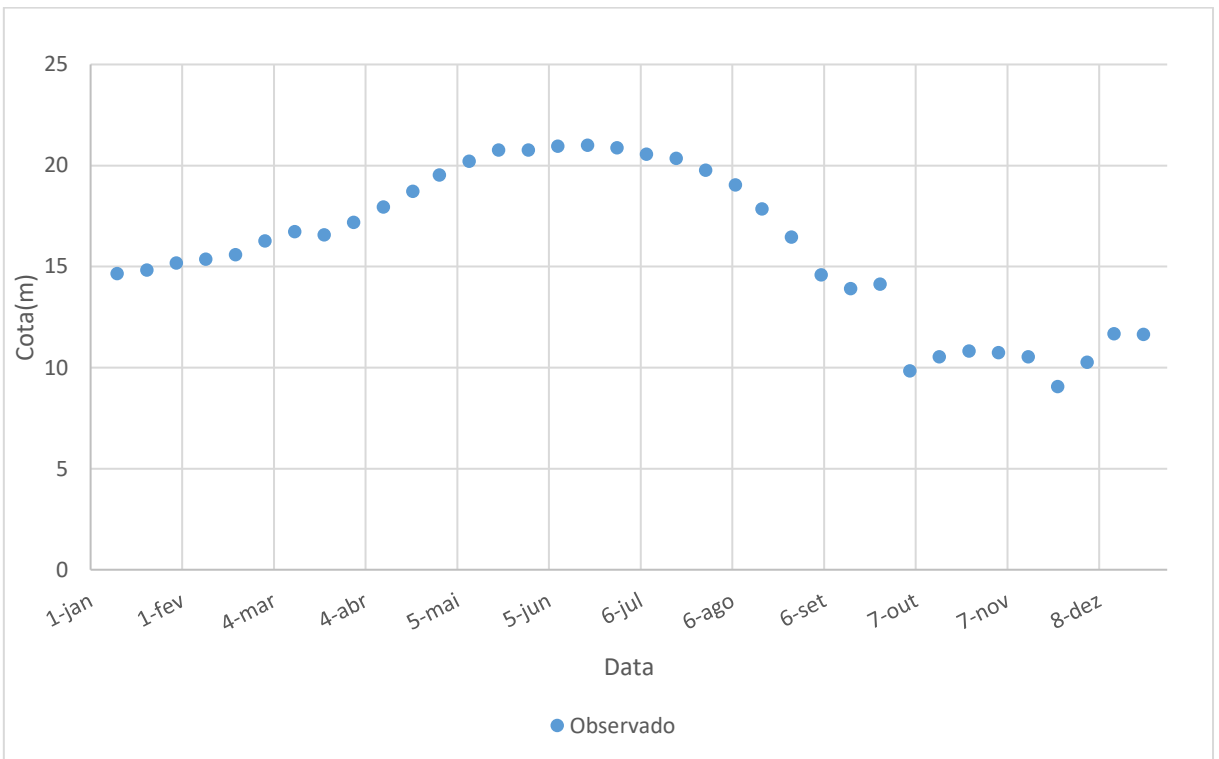


Figura 4.15 - Níveis d'água em 2010 da estação virtual amz_ngo_jas_0063_01

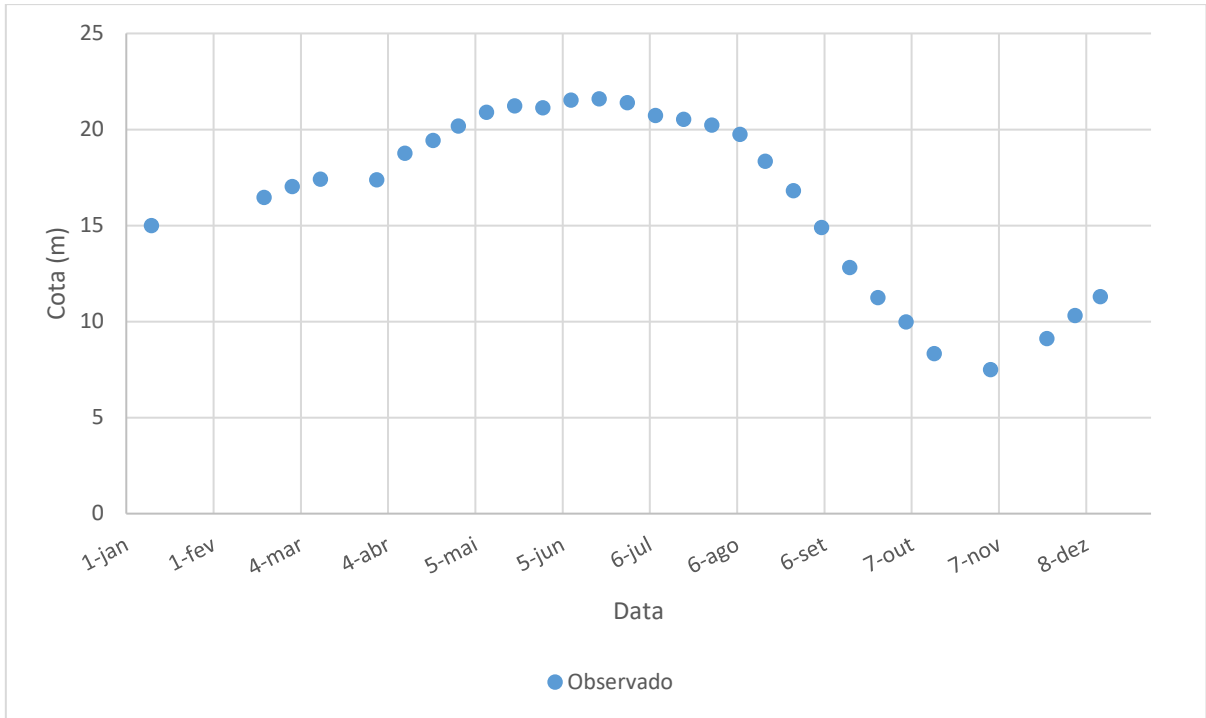


Figura 4.16 - Níveis d'água em 2010 da estação virtual amz_sol_jas_0063_01

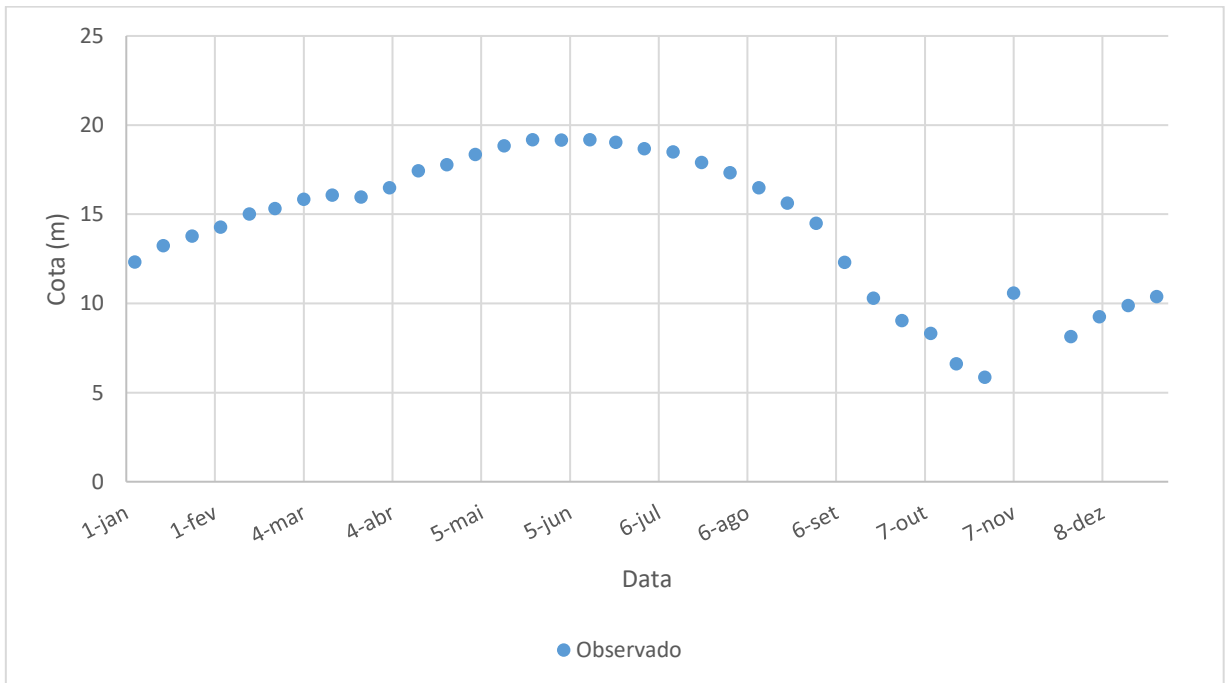


Figura 4.17 - Níveis d'água em 2010 da estação virtual JA2152Eva

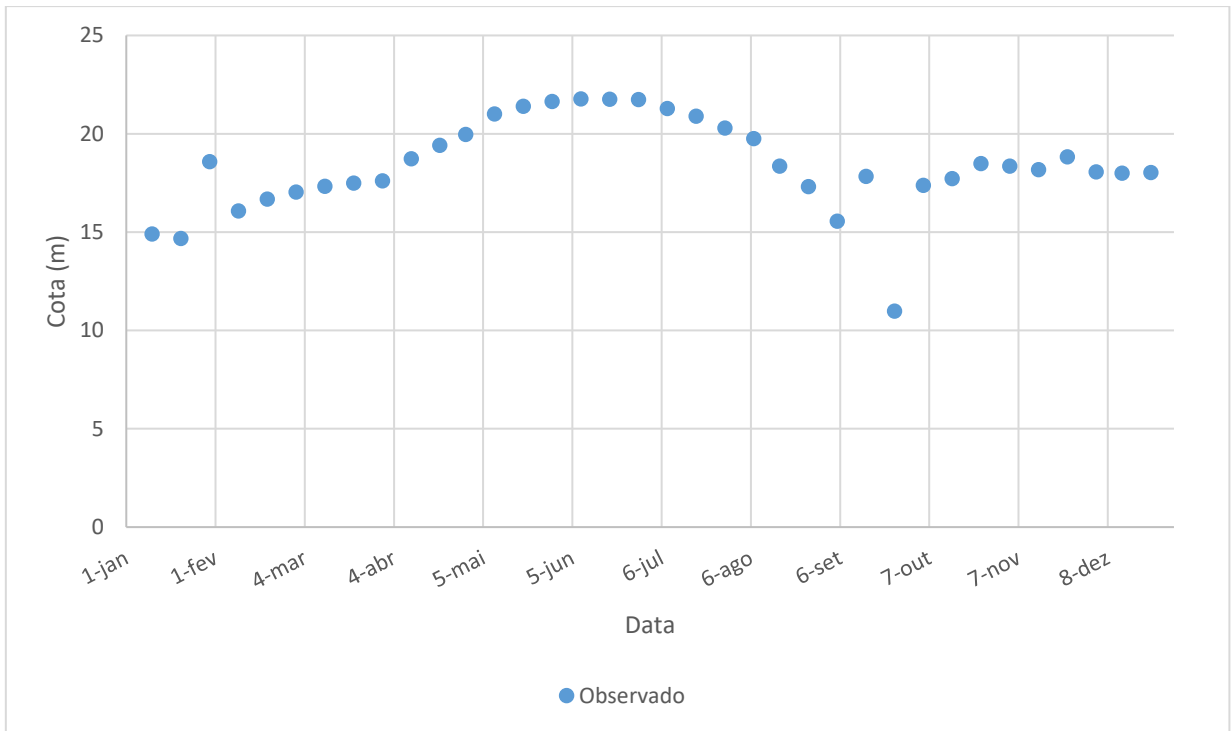


Figura 4.18 - Níveis d'água em 2010 da estação virtual JA2063Encont

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os principais resultados obtidos a partir da calibração do modelo hidrodinâmico utilizado no software HEC-RAS em escoamento transiente. Primeiro serão apresentados os resultados obtidos do coeficiente de Manning na calibração e a aderência do modelo ao observado no decorrer do ano. Em seguida são apresentados os resultados obtidos de vazão após a bipartição entre Careiro e Amazonas, e visuais pelo HEC-RAS para as seções com mais dados observados disponíveis e a seção mais a jusante do modelo. Depois será apresentada a discussão sobre histerese observada nas estações no modelo e, por fim, a comparação do modelo entre a simulação feita com e sem as áreas de escoamento inefetivo.

5.1 CALIBRAÇÃO

Após o cálculo dos valores do RMSE para as diferentes seções no intervalo de um ano, os resultados foram organizados em tabelas divididas pelos tipos de combinações feitas:

1. variando o valor do Manning do canal principal, usando o trabalho de Ferreira (2019) como referência para os valores nas planícies de inundação;
2. considerando um mesmo valor do Manning para toda seção transversal;
3. variando-se os valores das planícies de inundação nos trechos apresentados.

Todas as combinações e resultados do RMSE estão presentes no apêndice do trabalho. Na Tabela 5.1, estão apresentados os menores valores obtidos em cada situação descrita acima, cada coluna segue a mesma numeração. A Tabela 5.2 apresenta a melhor combinação obtida dos coeficientes de Manning, canal principal e planície de inundação (referentes a coluna 3 da Tabela 5.1), os quais serão considerados para os próximos resultados do presente capítulo.

Tabela 5.1 – Menores valores de RMSE obtidos nas estações de calibração em 2010

Estação	(1) RMSE (m)	(2) RMSE (m)	(3) RMSE (m)
14990000 - Manaus	0.129	0.193	0.108
15030000 - Jatuarana	0.188	0.251	0.189
15040000 - Careiro	0.131	0.202	0.130
amz_ngo_jas_0063_01	0.176	0.390	0.177
amz_sol_jas_0063_01	0.630	0.619	0.626
JA2152Eva	0.408	0.450	0.408
JA2063Encont	0.250	0.372	0.252
RMSE total	1.912	2.478	1.89
RMSE médio	0,273	0,354	0.270

Apesar dos valores do coeficiente de rugosidade do canal principal se apresentarem menor do que a média esperada para canais irregulares como rios, os valores se aproximam dos medidos por Strasser (2005) em trechos próximos. Além disso, o mesmo estudo também indicou relação do coeficiente de Manning com o relevo do canal.

Tabela 5.2 - Combinação dos coeficientes de Manning que apresentou menor valor de RMSE

Trechos	Planície esquerda	Canal Principal	Planície direita
Amazonas: conflu-monoc	0.04	0.015	0.035
Amazonas: monoc-irac	0.06	0.015	0.05
Careiro: Varzea	0.035	0.02	0.035
Negro: manaus-conflu	0.06	0.023	0.06
Solimoes: irand-care	0.06	0.021	0.06
Solimões: care-conflu	-	0.02	0.039

A fim de comparação com o trabalho de Ferreira (2018), que simulou o escoamento na mesma região em regime permanente, utilizando RMSE médio entre 5 estações para 4 perfis de vazão (Tabela 5.3), foi feita a média dos RMSEs obtidos em cada estação (última linha da Tabela 5.1). Observa-se que, para a melhor simulação (coluna 3), os resultados apresentaram valores melhores que 3 dos 4 perfis do trabalho de Ferreira (2018), indicando a melhoria do modelo quando simulado em regime transiente. Para os mesmos meses analisados por Ferreira (2018), maio e junho, foram calculados os RMSEs, que tiveram resultados iguais a 0,331 e 0,241, respectivamente.

Tabela 5.3 - RMSE médio obtidos no estudo de Ferreira (2018)

Perfil	RMSE (m)
Maio 2015	0,4486
Junho 2015	0,2110
Julho 2015	0,2947
Maio 2016	0,4513

Da Figura 5.1 a Figura 5.7 estão apresentados graficamente os resultados obtidos para cada estação utilizada para calibração no intervalo do ano de 2010.

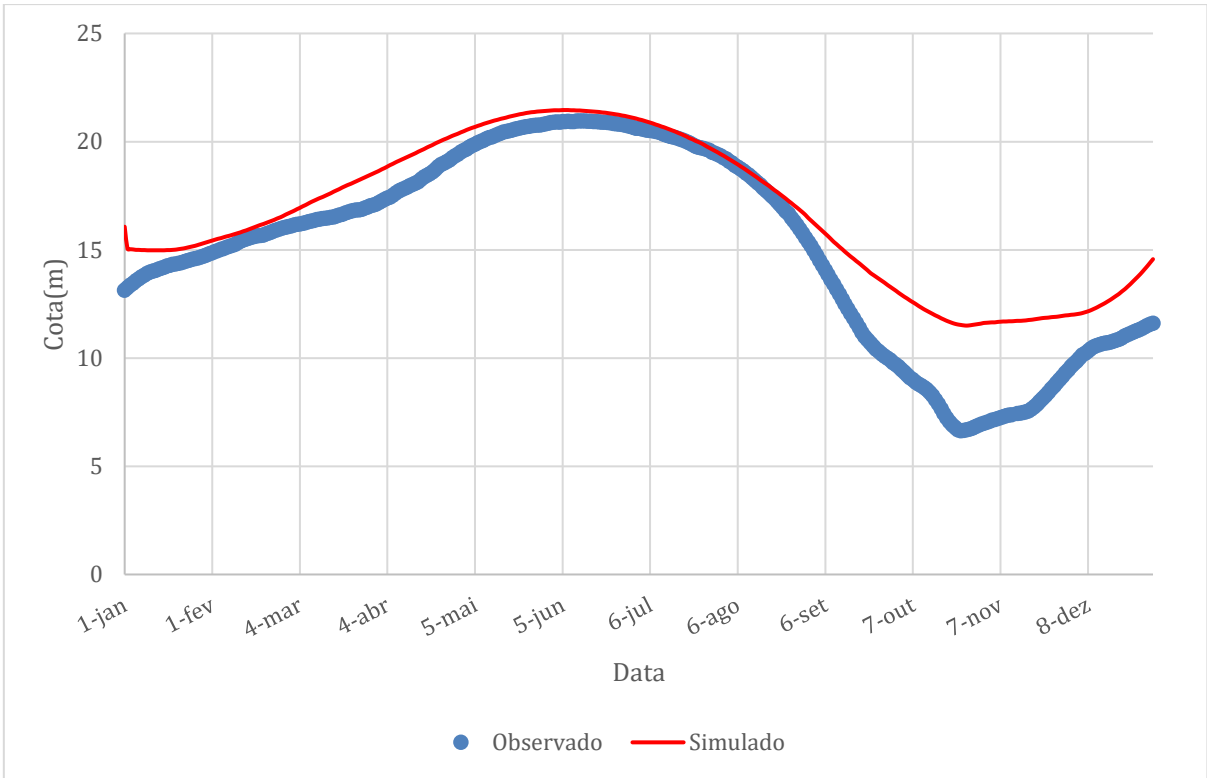


Figura 5.1 - Estação fluviométrica Manaus

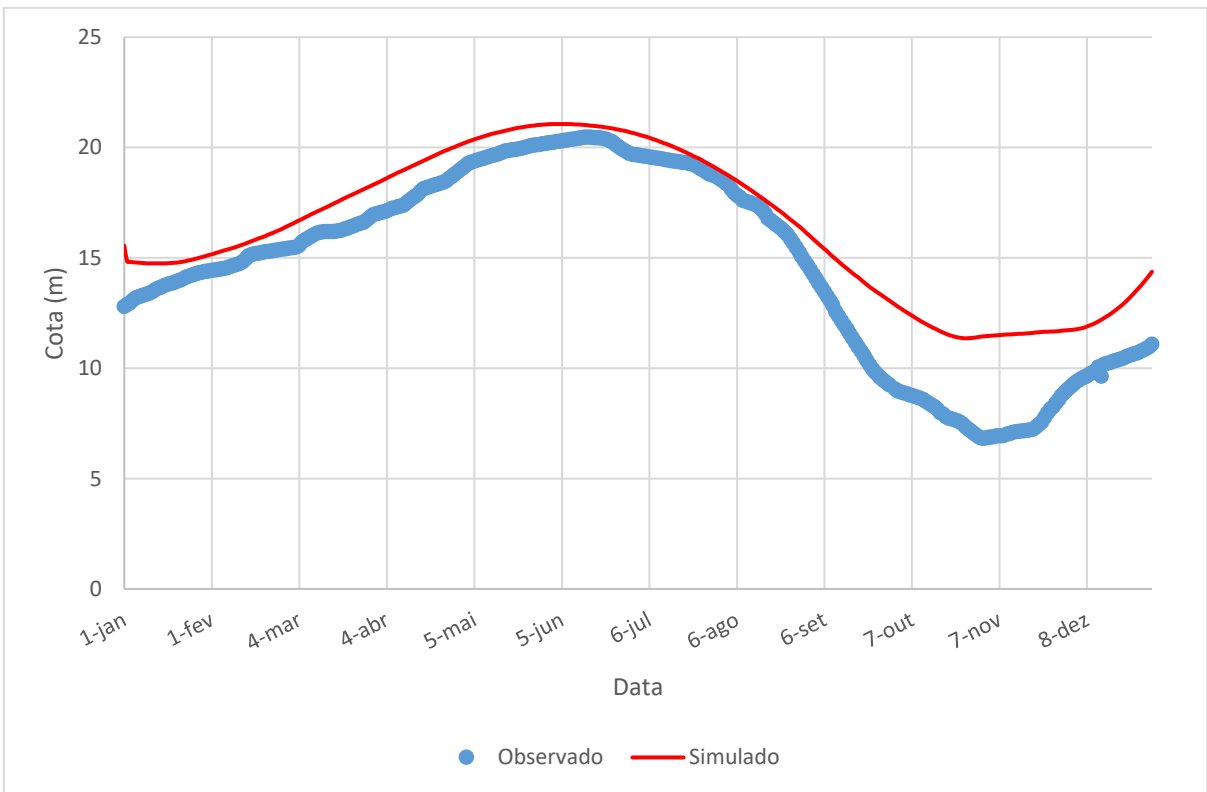


Figura 5.2 - Estação fluviométrica Jatuarana

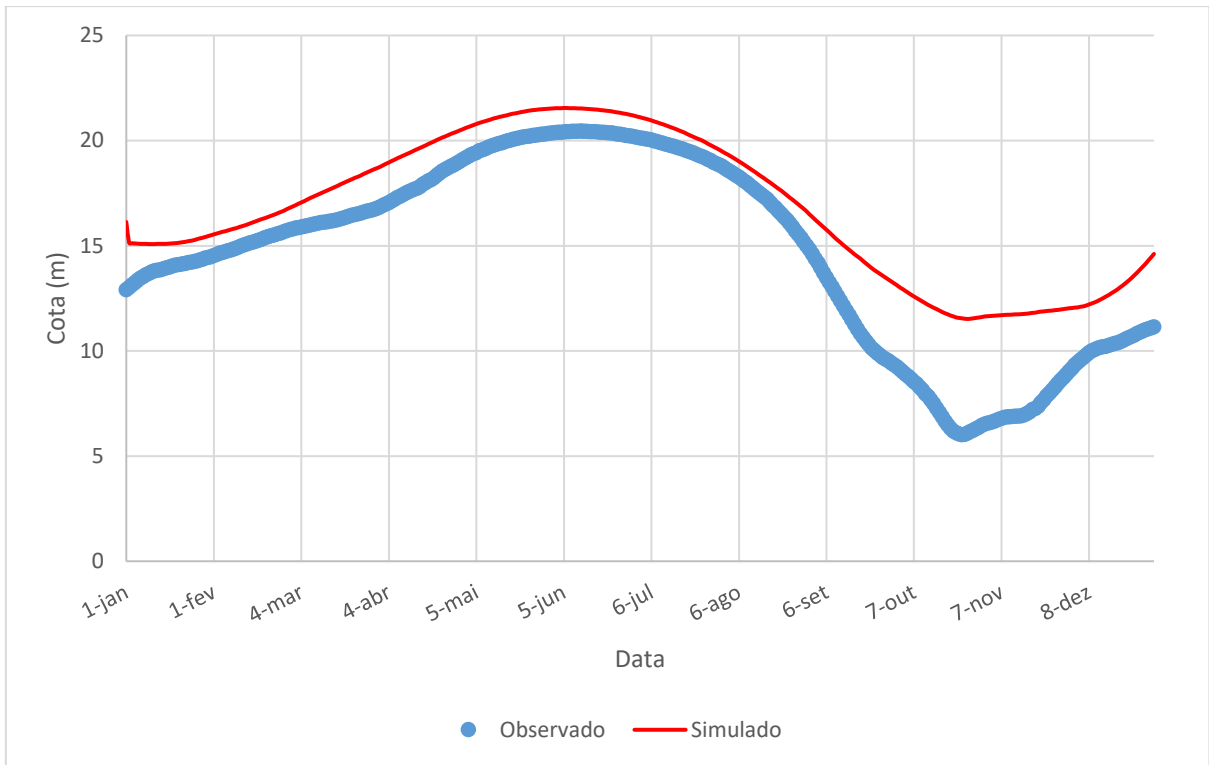


Figura 5.3 – Estação fluviométrica Careiro

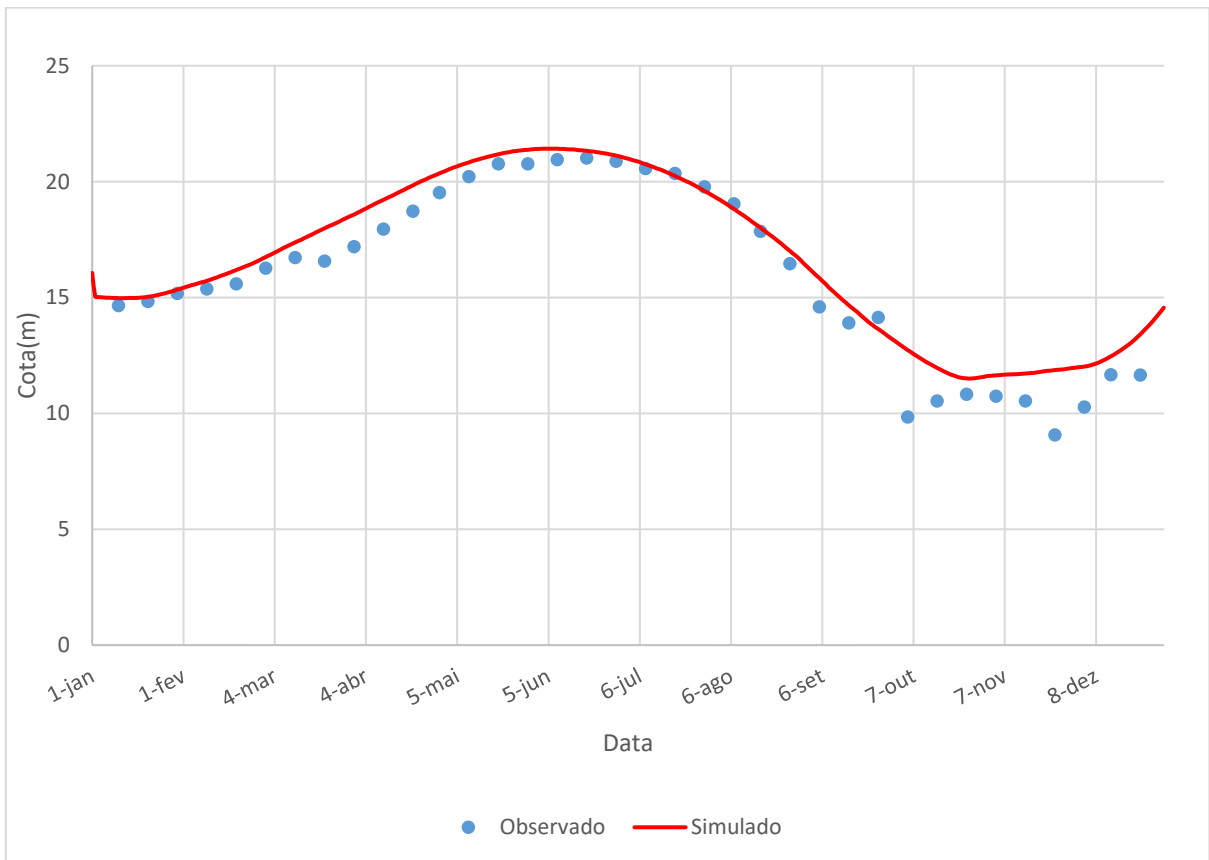


Figura 5.4 - Estação virtual amz_ngo_jas_0063_01

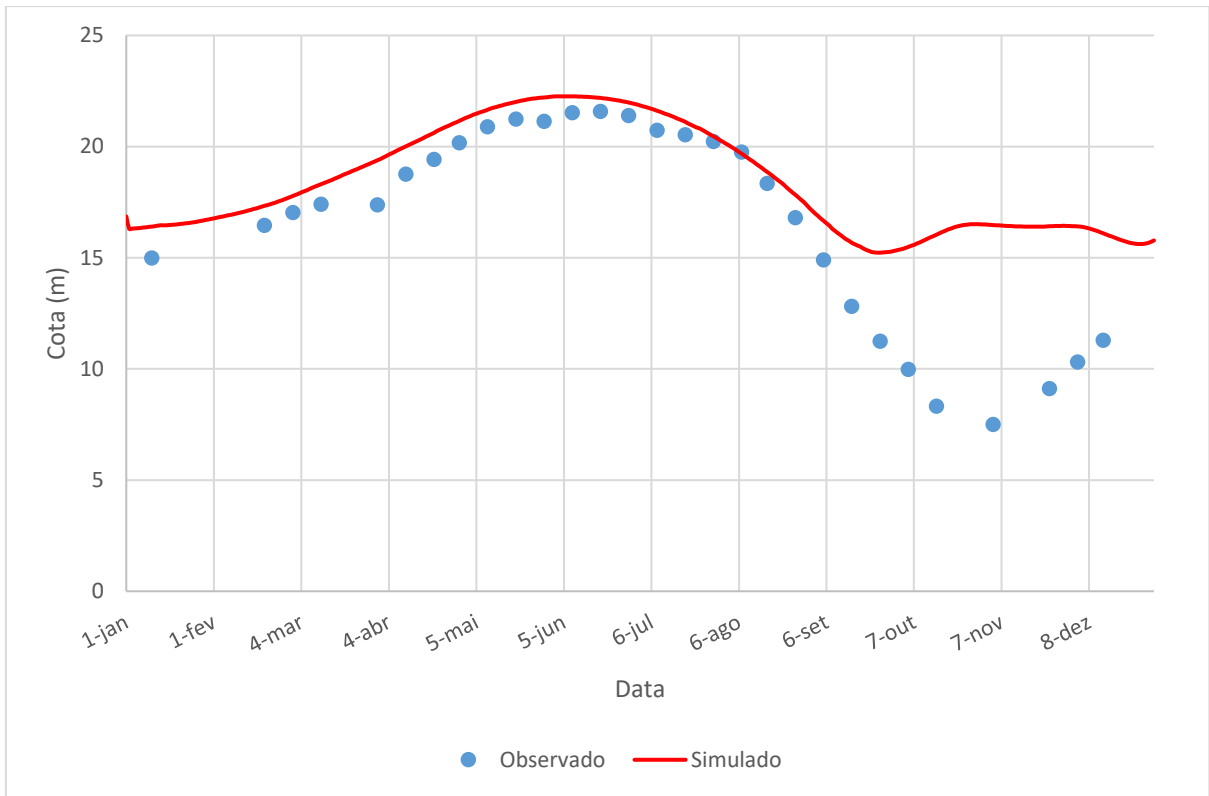


Figura 5.5 - Estação virtual amz_sol_jas_0063_01

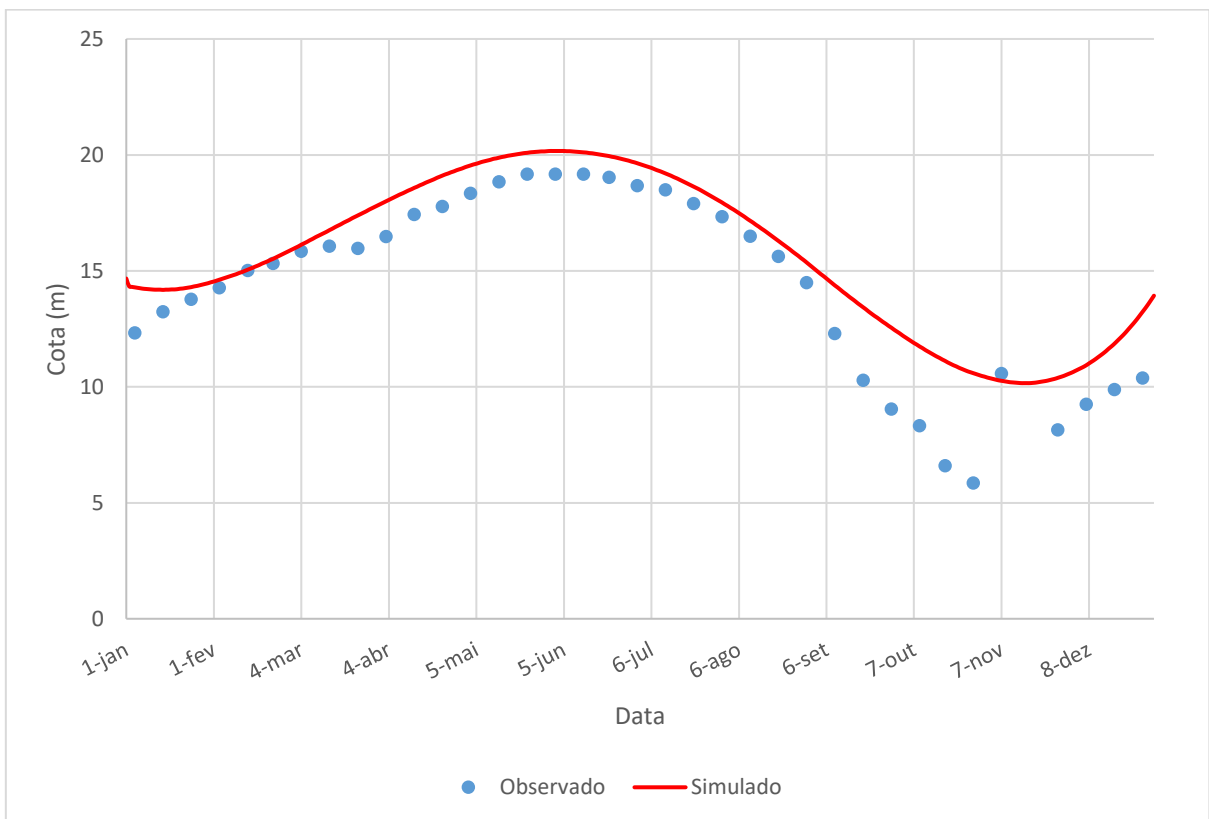


Figura 5.6 - Estação virtual JA2152Eva

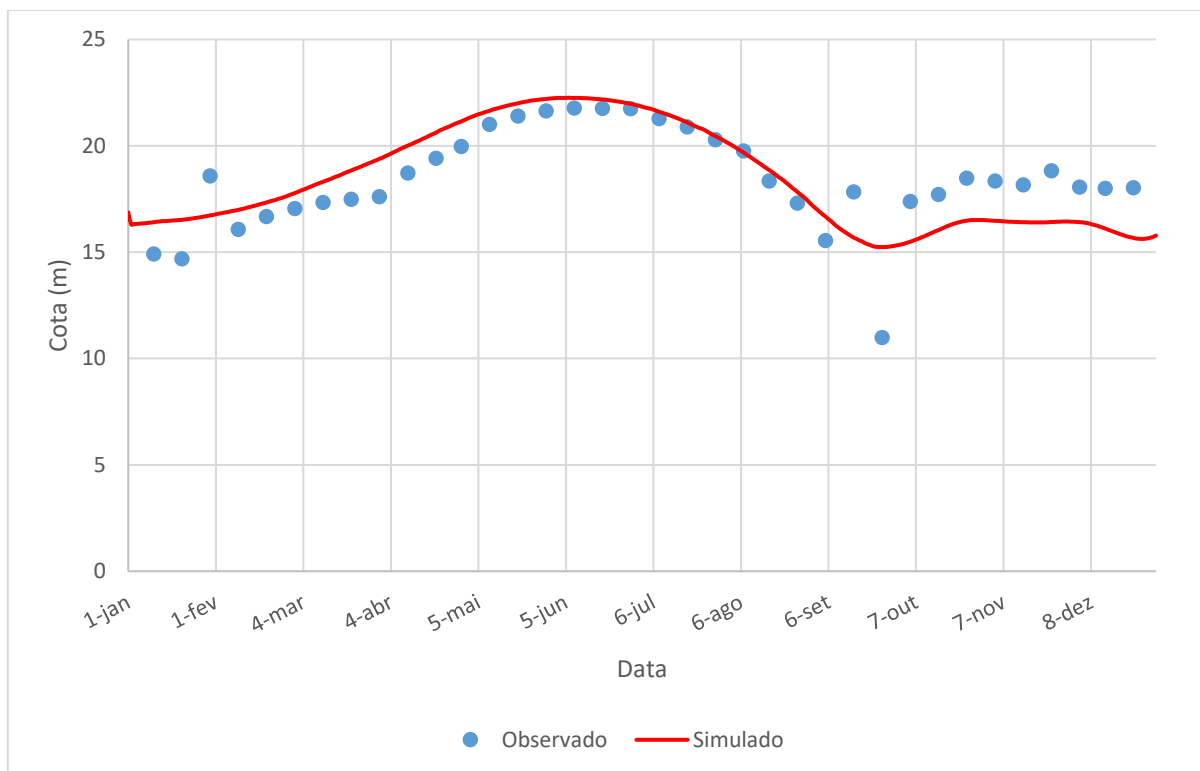


Figura 5.7 - Estação virtual JA2063Encont

A partir do modelo calibrado, foram observados os resultados nas estações Manaus, Jatuarana e Careiro, pela maior quantidade de dados medidos, e na seção transversal mais a jusante, que coincide com a estação fluviométrica de Iracema. De maneira geral, o modelo superestimou os valores dos níveis e apresentou maior aderência ao observado no mês de julho, tal resultado assemelha-se ao do trabalho de Strasser (2005), que apresentou melhores resultados de calibração do Manning em período de subida do nível d'água do que de descida. O modelo apresentou menor aderência no mês de outubro, coincidindo com a época em que a condição de contorno adotada a jusante apresentou maior variação dos dados utilizados para interpolação, cerca de 7 m de diferença entre o valor mais alto e o valor mais baixo do mês no período observado. A dispersão dos dados no período é a principal justificativa para a aderência do modelo ter sido tão baixa. Tal resultado pode indicar também a necessidade de um período de simulação prévio, para diminuição da interferência das condições iniciais do modelo.

5.2 RESULTADOS ESTAÇÕES MANAUS, JATUARANA E CAREIRO

Afim de demonstração do resultado da variação da aderência do modelo aos dados medidos, nesta seção estão apresentadas as seções transversais dos modelos no mês de maior e menor aderência do modelo no geral nas Figura 5.8 (Manaus), Figura 5.9 (Jatuarana) e Figura 5.10 (Careiro). Os resultados mensais obtidos pelo modelo ao decorrer

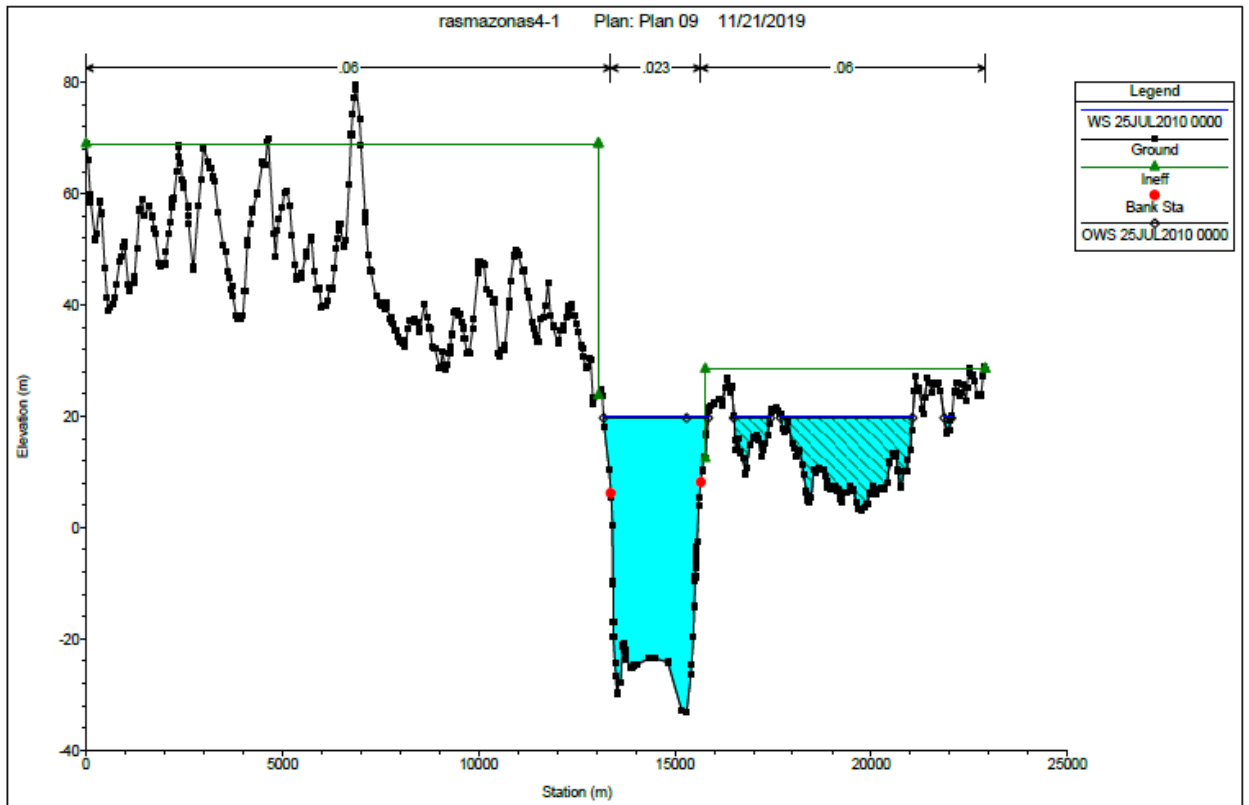
do ano estão apresentados no apêndice. Na Tabela 5.4 estão apresentadas as diferenças entre o nível medido e o simulado em cada estação, nas situações de maior e menor aderência do modelo ao observado.

Tabela 5.4 - Diferença entre nível simulado e o medido na estação fluviométrica (em metros)

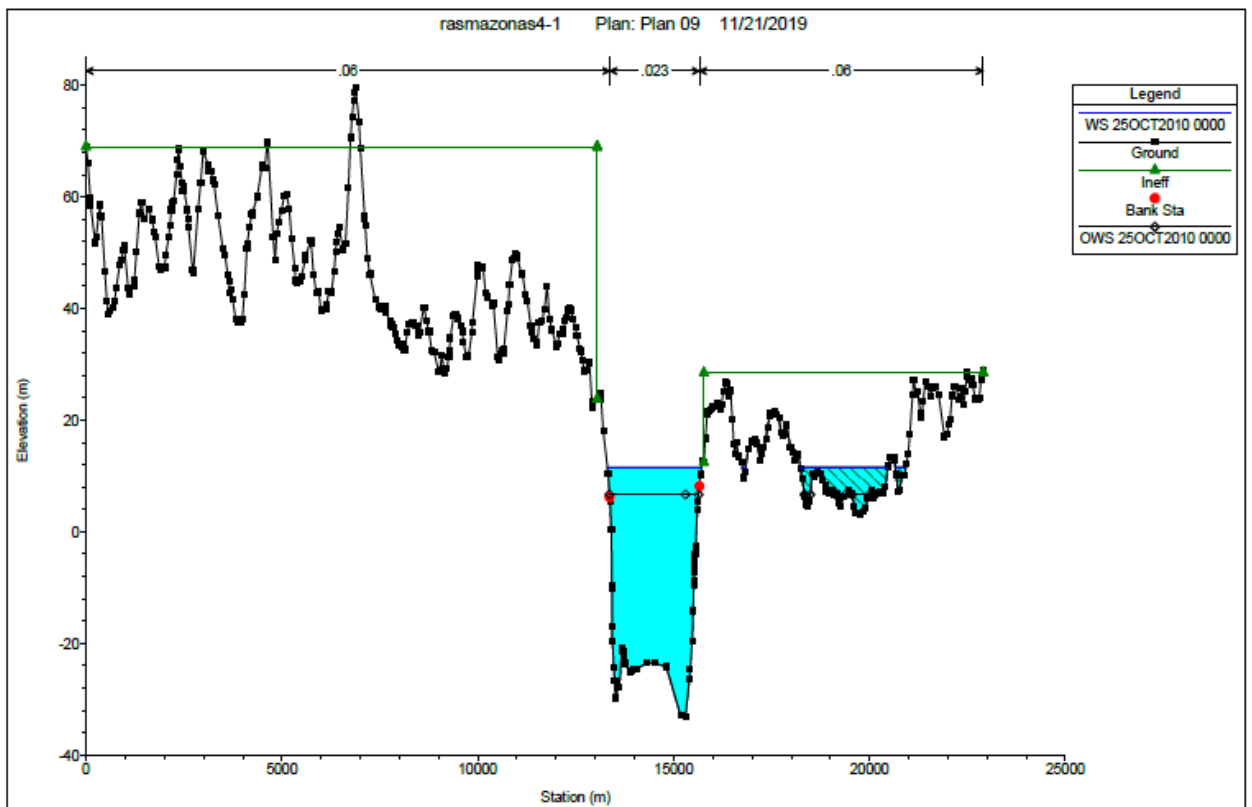
Estação	25/07/2010	25/10/2010
Manaus	0,18	4,85
Jatuarana	0,42	3,89
Careiro	0,75	5,5

Nas estações Jatuarana e Careiro, os dados obtidos de vazão pelo modelo foram comparados aos medidos pela estação calculando-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe, que apresentou valores de, respectivamente, 0,87 e 0,40. Nas Figura 5.11 e Figura 5.12 é possível observar o resultado da comparação entre os dados medidos e simulados nas estações. Ambos os dados observados foram disponibilizados pelo Hidroweb e obtidos a partir da curva de descarga de cada seção.

A diferença da qualidade obtida na descrição da vazão pelos valores calculados nestas duas estações pode estar na simplificação dimensional do escoamento que, nas simulações feitas no presente trabalho, foi considerado unidimensional. Tal simplificação dificulta a obtenção de valores mais precisos no caso em que o fluxo passa por uma bipartição, como, por exemplo, no caso apresentado.

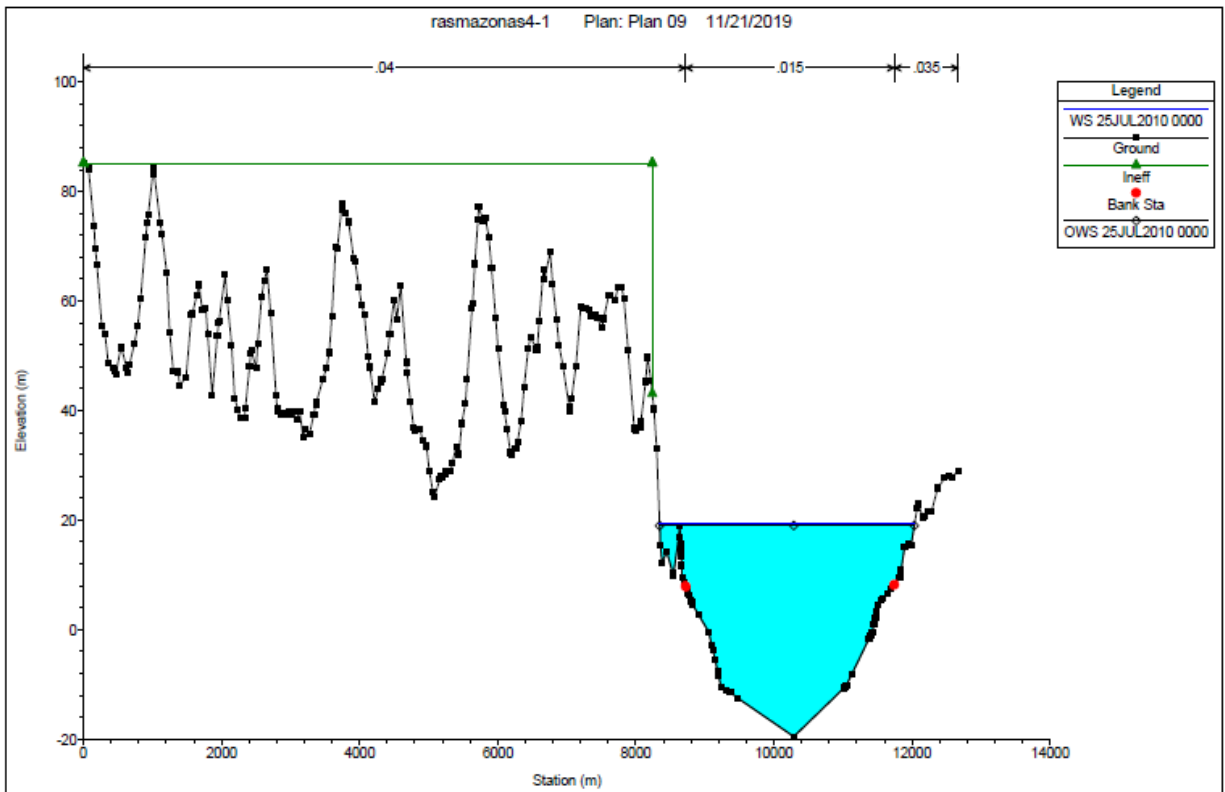


(a)

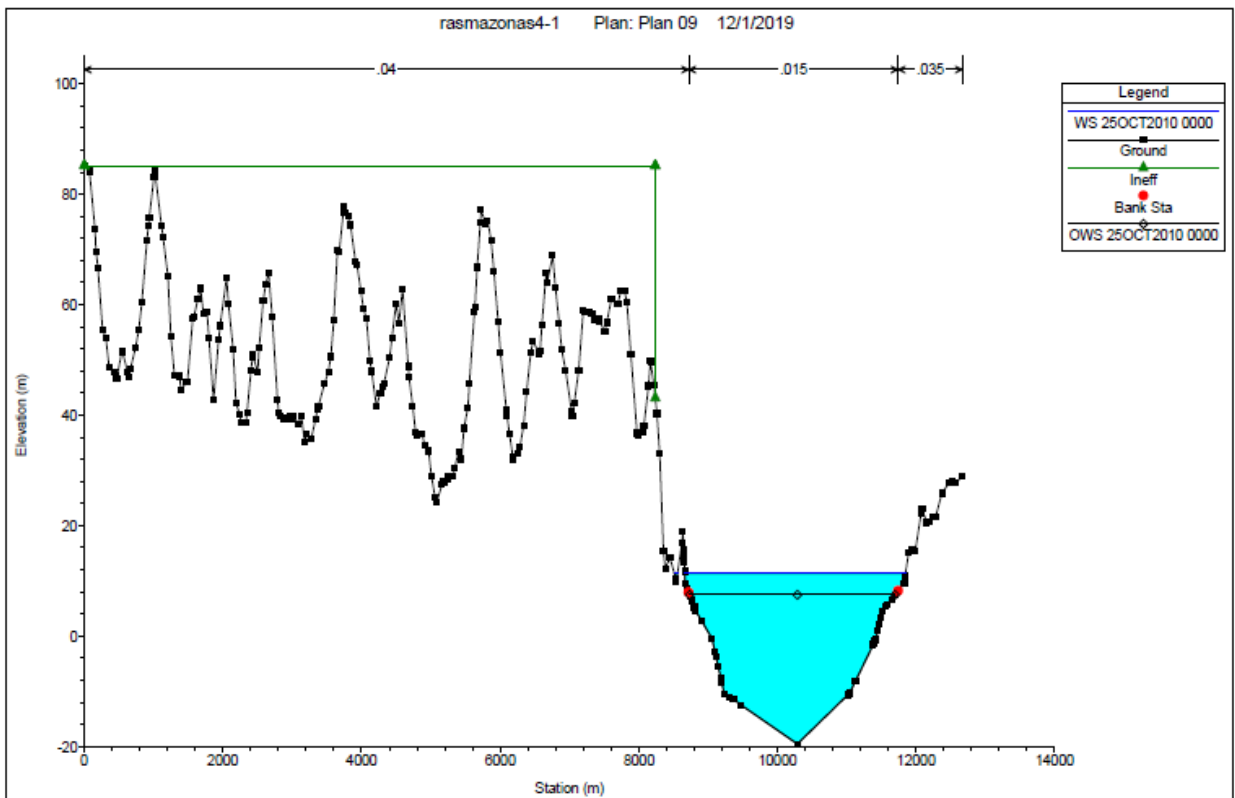


(b)

Figura 5.8 - Seção Transversal da Estação Manaus em Julho (a) e em Outubro (b)

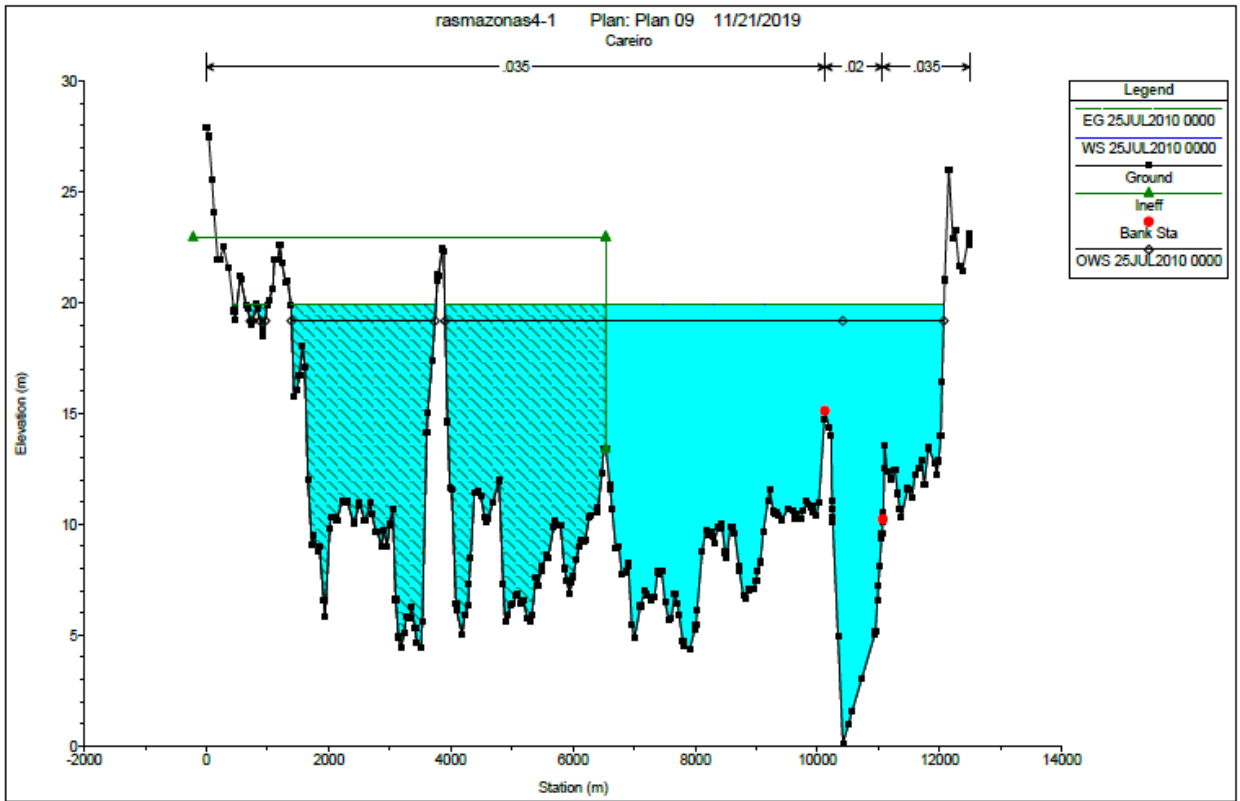


(a)

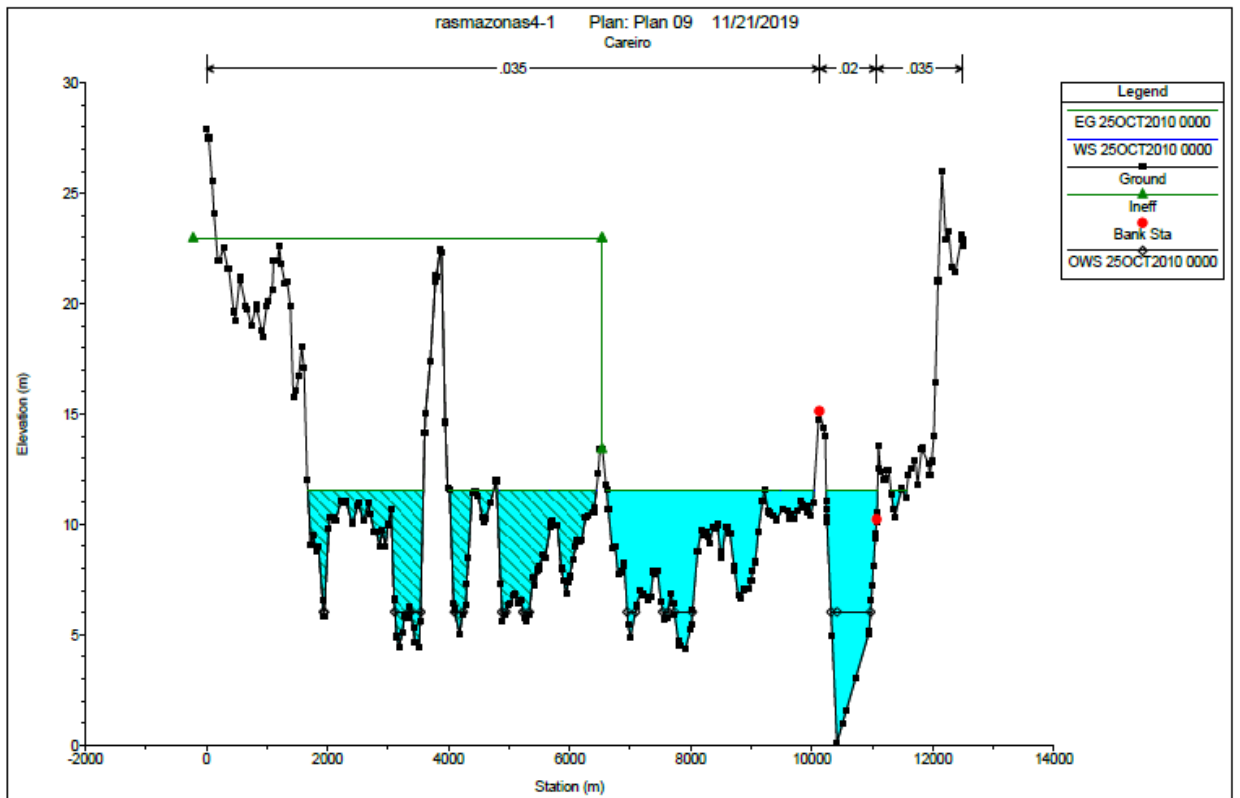


(b)

Figura 5.9 - Seção Transversal da Estação Jatuarana em Julho (a) e em Outubro (b)



(a)



(b)

Figura 5.10 - Seção Transversal da Estação Careiro em Julho (a) e em Outubro (b)

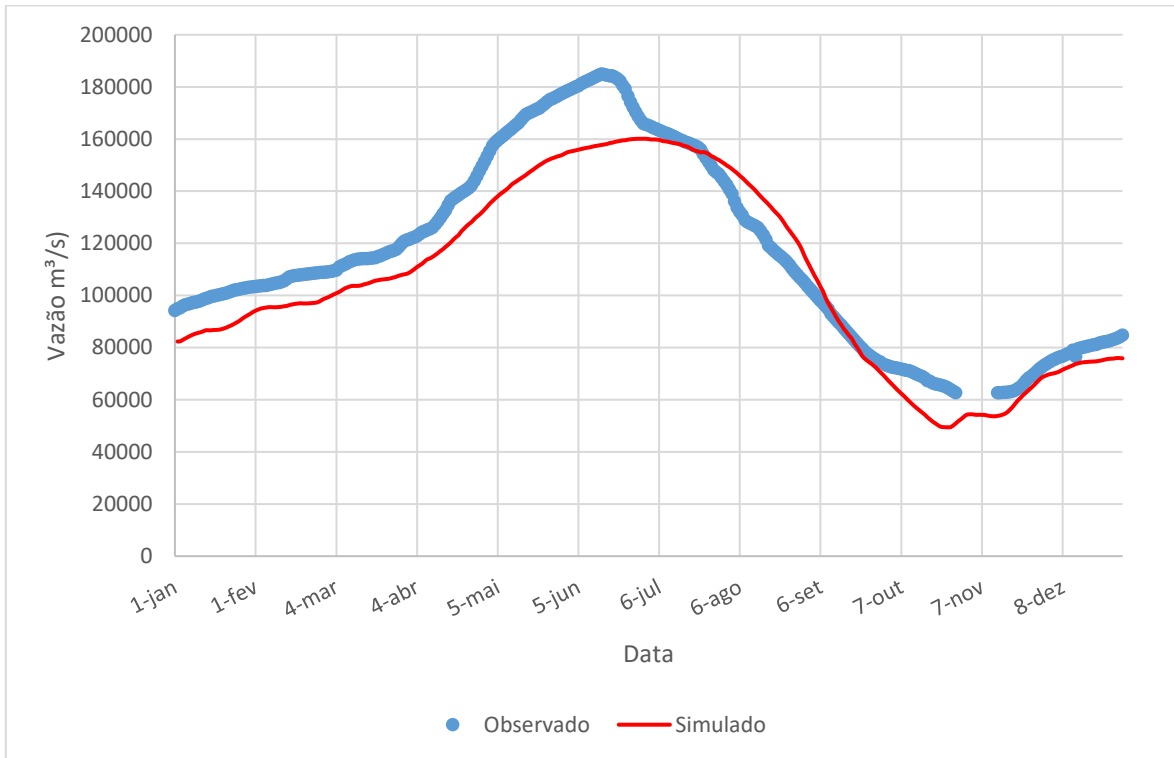


Figura 5.11 - Vazão obtida pelo modelo na Seção da estação fluviométrica Jatuarana

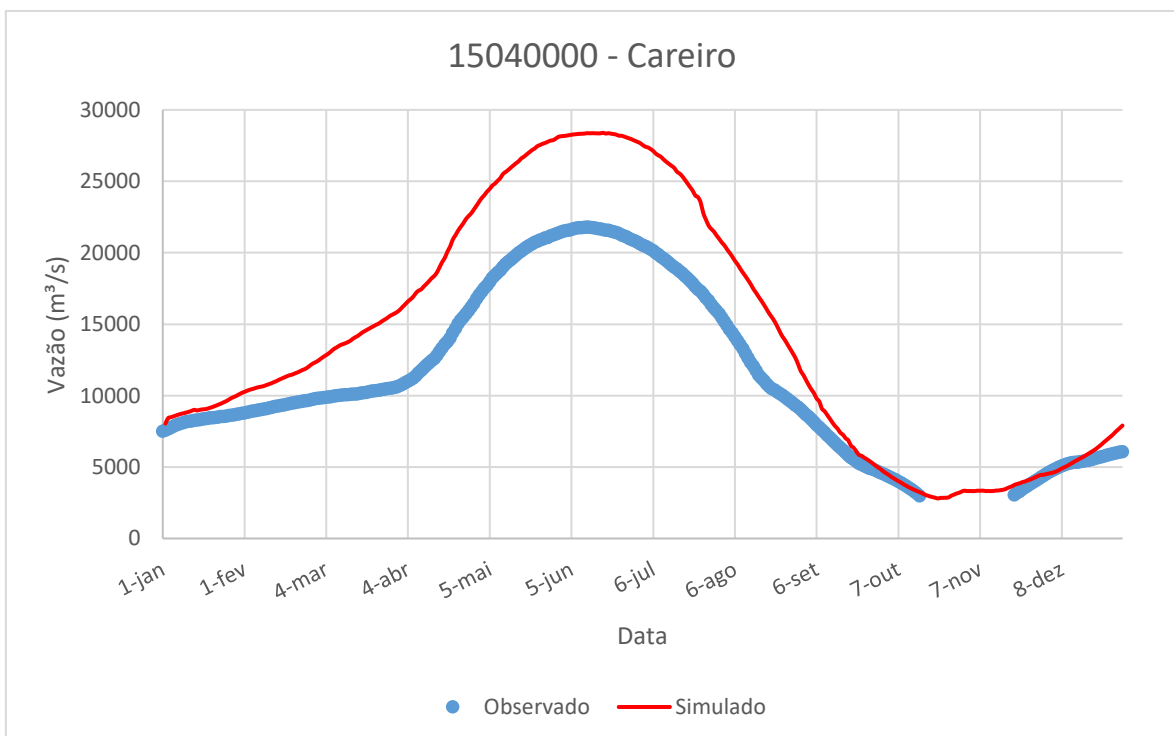


Figura 5.12 - Vazão obtida pelo modelo na Seção da estação fluviométrica Careiro

Nas Figura 5.11 e Figura 5.12 é possível observar que o modelo superestimou a vazão no trecho do Careiro e, conseqüentemente, subestimou a vazão para o rio Amazonas. Esse

resultado indica que a simulação não representou adequadamente a bipartição do escoamento, podendo ser uma das limitações do modelo unidimensional ao representar cursos hídricos com larguras de, em alguns pontos, até 3 km, como é o caso da área de estudo.

5.3 RESULTADOS ESTAÇÃO IRACEMA

A estação fluviométrica Iracema está localizada na seção transversal mais a jusante do modelo utilizado no presente trabalho. Por não possuir dados referentes ao ano de 2010 a estação foi utilizada apenas para referenciar a seção. A Figura 5.14 apresentam a seção transversal nos meses de Julho e Outubro.

Os dados para condição de contorno a jusante foram os de níveis próximos os da seção referente a estação de Iracema obtidos por regressão polinomial dos dados das estações virtuais. Plotando-se os dados observados em 2010, e os simulados na seção no modelo, (Figura 5.13) foi possível perceber que as últimas informações medidas (no mês de setembro) indicavam valores consideravelmente inferiores a regressão (3,28 m de diferença no caso da última medição). Estes resultados indicam que a má aderência na época de seca do modelo é causada pela incerteza da condição de contorno a jusante.

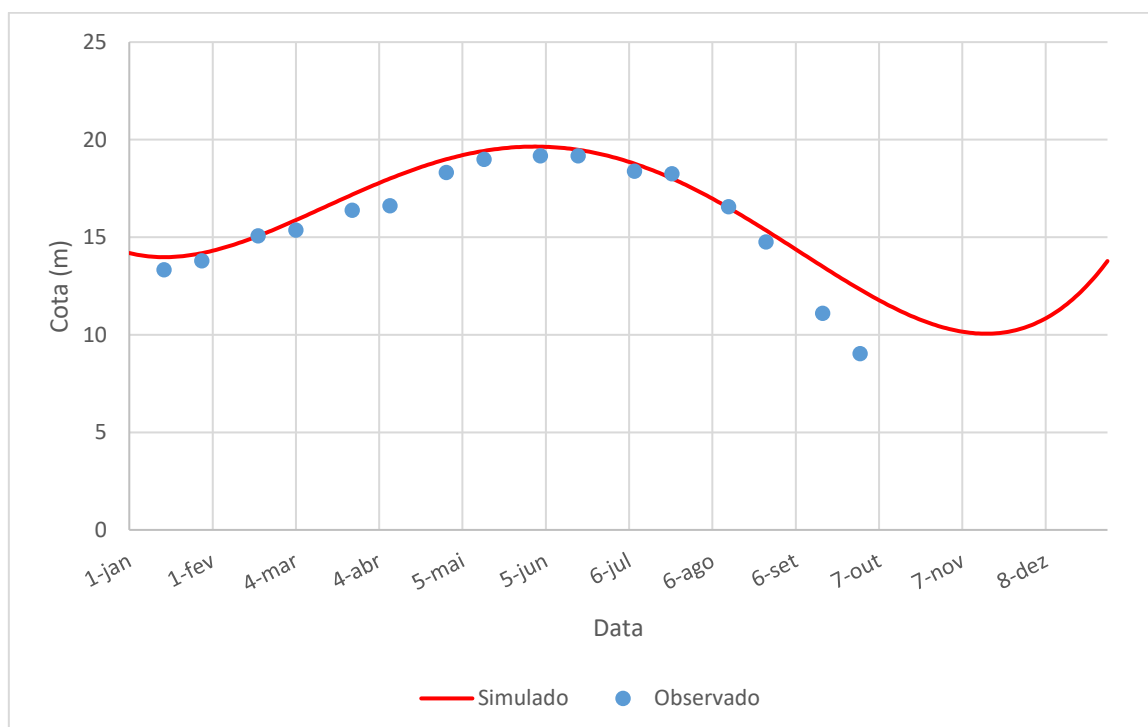
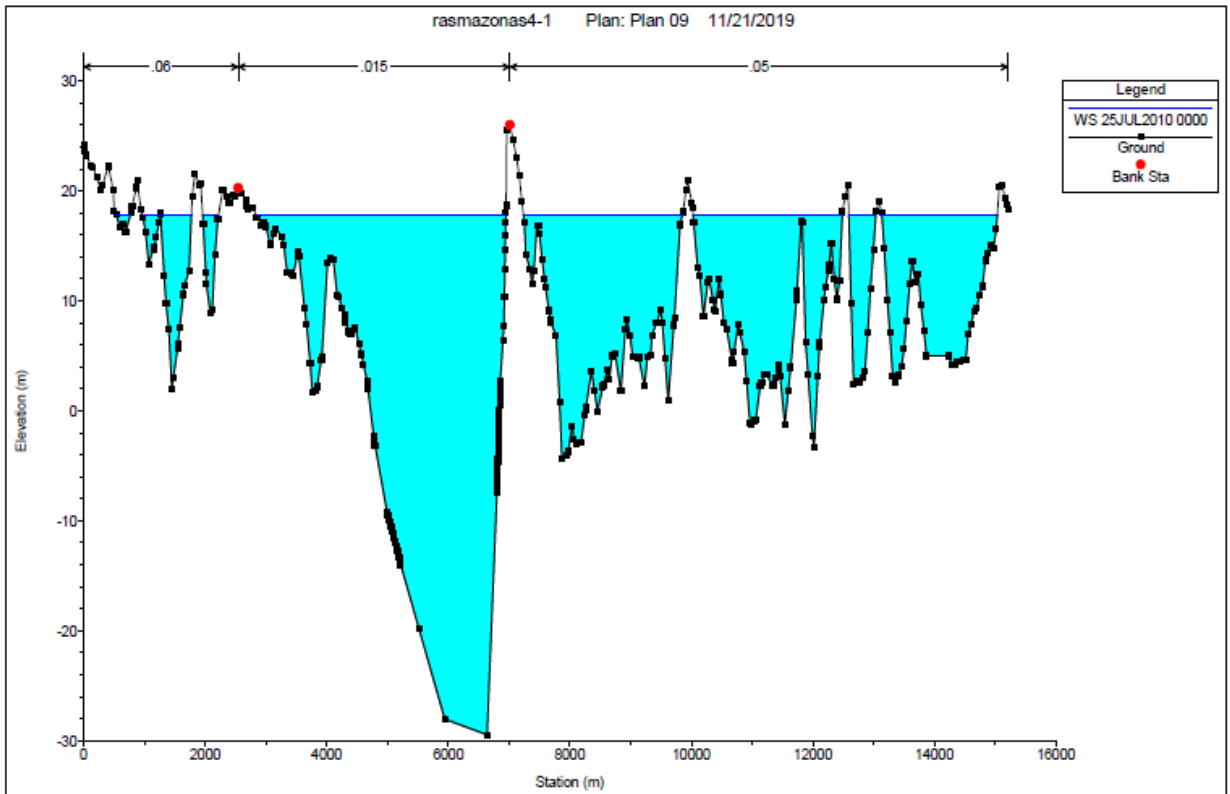
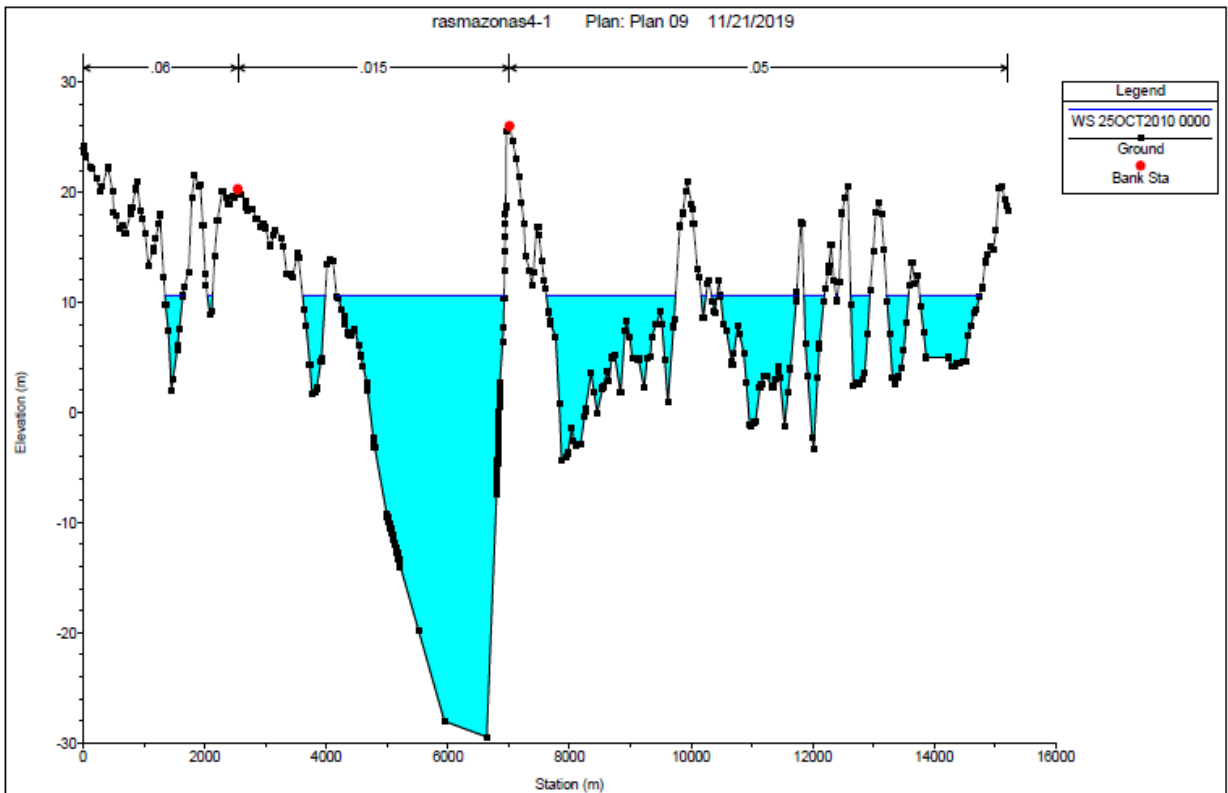


Figura 5.13 - Dados de níveis da seção transversal de Iracema



(a)



(b)

Figura 5.14 - Seção Transversal da Estação Iracema em Julho (a) e em Outubro (b)

5.4 HISTERESE

Com os dados obtidos pelo modelo de cota e vazão nas seções observadas, foi feita então a observação do fenômeno de histerese. O fenômeno de histerese em sistemas hidráulicos fluviais, como descrito anteriormente, é o atraso entre o nível d'água e a vazão medida numa certa seção em relação ao tempo. Esse fenômeno se expressa no gráfico de Cota vs vazão em forma de laço.

Nas seções de estudo é possível perceber o laço nos gráficos de cota vs vazão, (Figura 5.16, Figura 5.18, Figura 5.20 e Figura 5.22), junto das estações Careiro e Jatuarana também foram plotados os dados obtidos pelo hidroweb e na Estação de Iracema a curva-chave obtida do estudo de Ferreira (2018). O fenômeno físico esperado é o atraso da cota em relação a vazão, tendo em vista que o fenômeno está comumente associado a uma onda de cheia que acelera sua frente antes da chegada do pico de altura, entretanto o modelo apresentou o inverso (Figura 5.15, Figura 5.17, Figura 5.19, Figura 5.21 e Tabela 5.5).

Além da onda de cheia poder gerar histerese, essa curva pode ser gerada por outros processos como Remanso variável e Rugosidade variável (Mansanarez et al., 2016). Uma hipótese para a inversão do fenômeno no presente trabalho é dada pelos dados utilizados na condição de contorno a montante, no rio Solimões, e a jusante.

No rio Solimões, os dados de entrada de vazão para a simulação do modelo, vieram de uma curva de descarga disponibilizada na estação de Manacapuru. Como este tipo de obtenção considera o escoamento como permanente, o pico de vazão ocorre juntamente ao pico de cota. Esta consideração traz maiores incertezas aos resultados de vazão, devido ao possível atraso em relação ao real pico de ocorrência da variável.

A regressão polinomial utilizada para preenchimento de falhas com os dados das estações virtuais da seção mais a jusante gerou um adiantamento do pico de nível em relação ao ano de 2010. Para a confirmação da hipótese foi comparado o pico de nível das estações de Manacapuru, Careiro, Manaus, Jatuarana e as virtuais referentes a seção de Iracema (amz_amz_env_0063_01 e amz_amz_env_0478_02) com o pico da regressão polinomial (Figura 5.23).

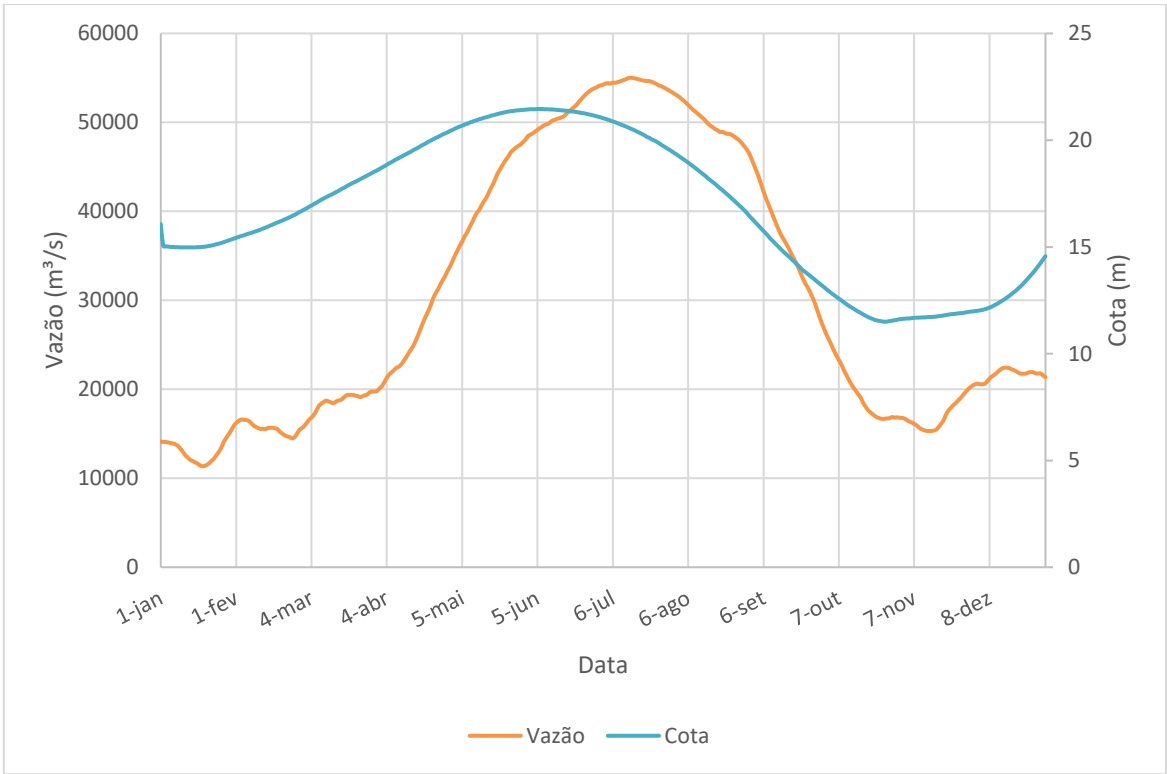


Figura 5.15 - Vazão e Cota obtidas pelo modelo na estação Manaus

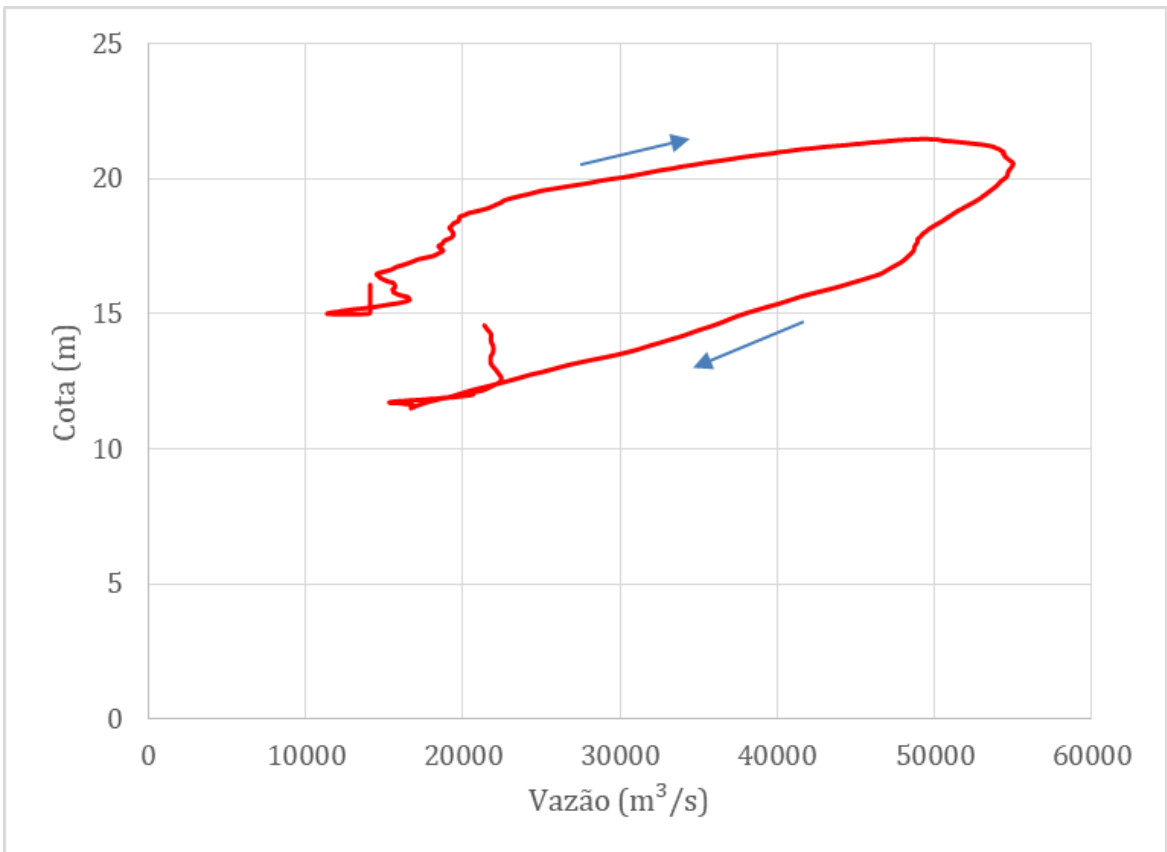


Figura 5.16 - Cota vs vazão na estação Manaus

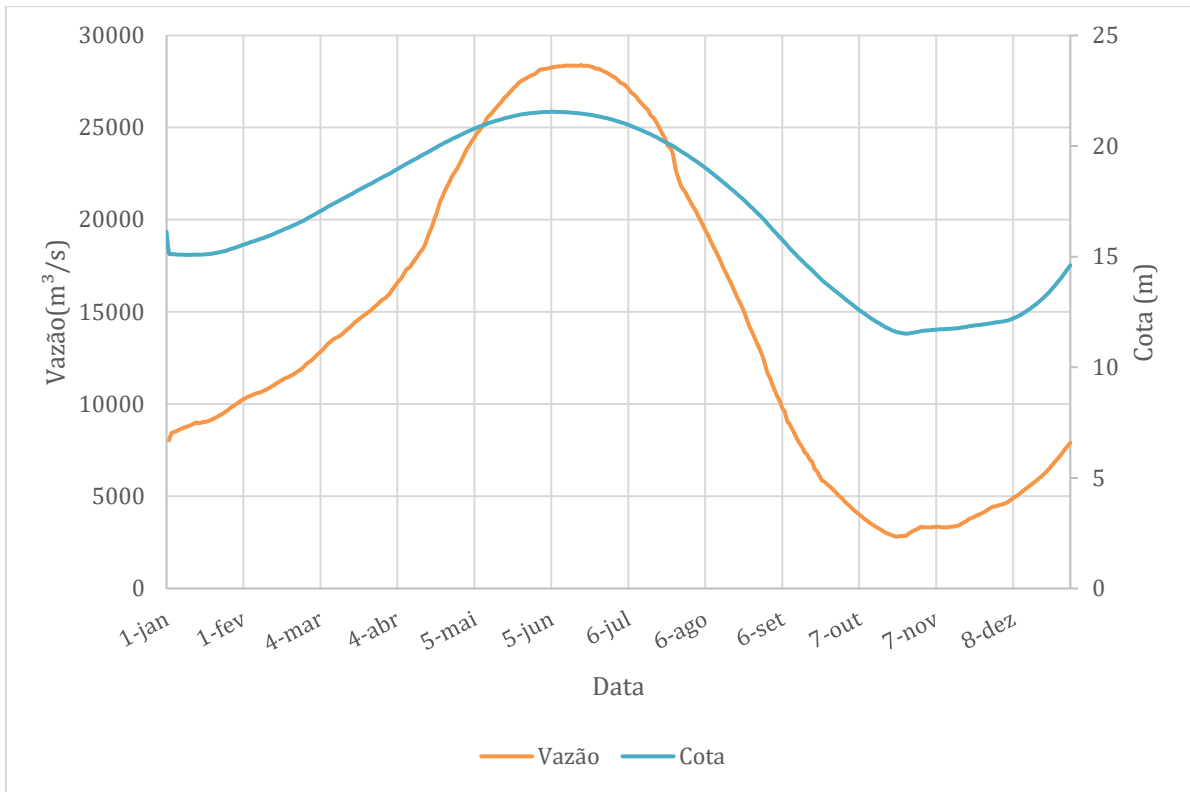


Figura 5.17 - Vazão e Cota obtidas pelo modelo na estação Careiro

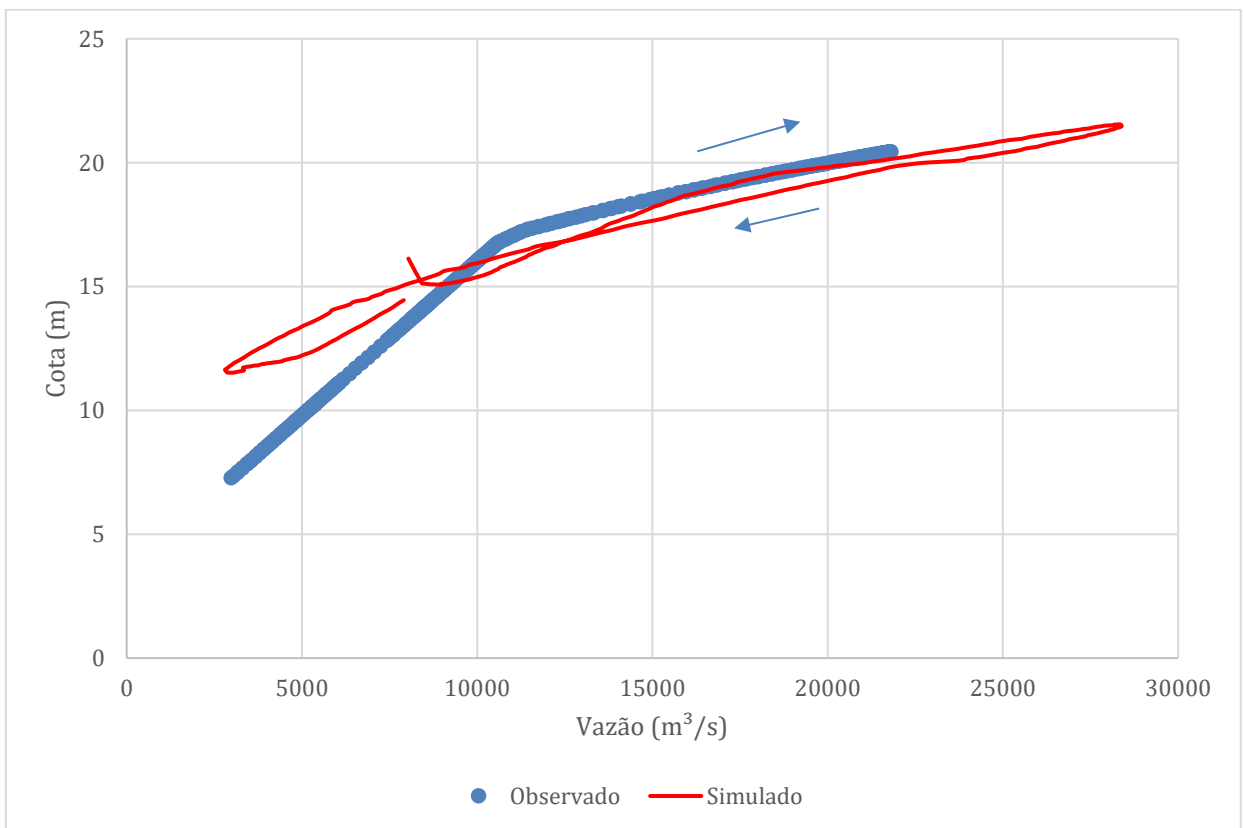


Figura 5.18 - Cota vs vazão na estação Careiro

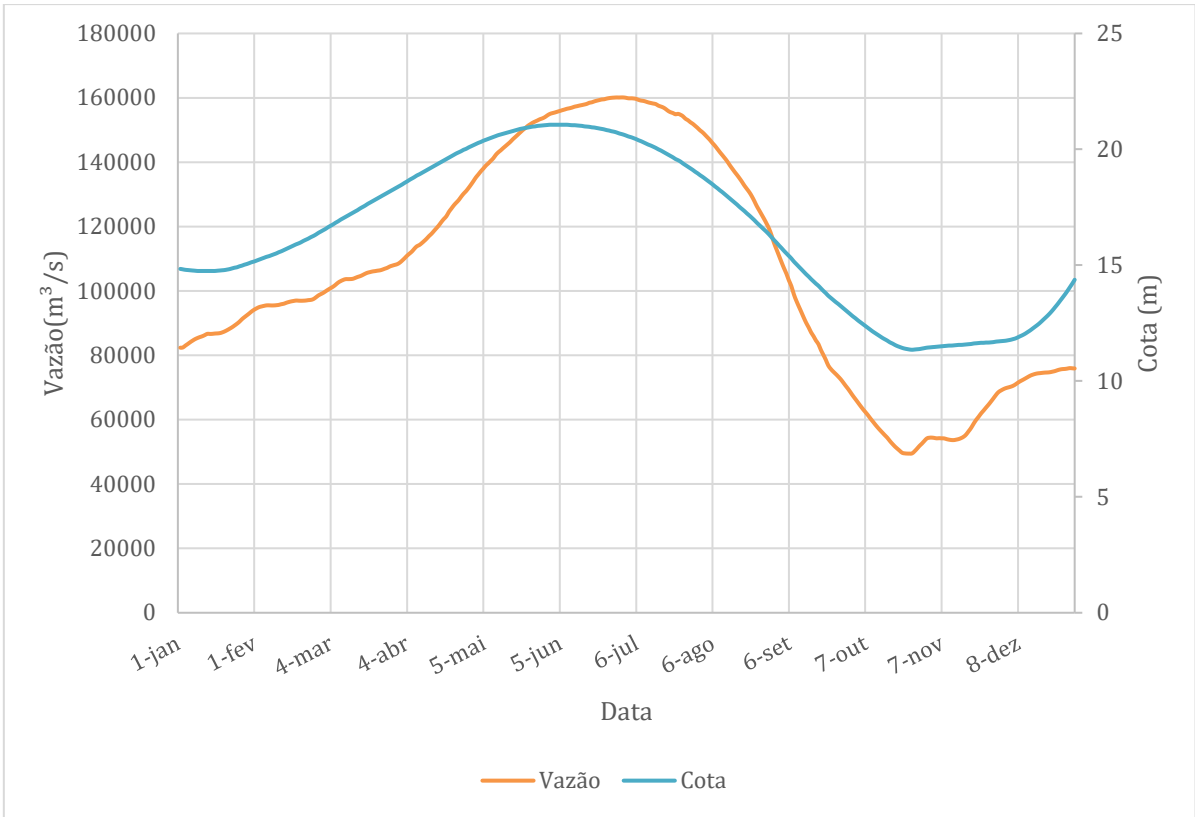


Figura 5.19 - Vazão e Cota obtidas pelo modelo na estação Jatuarana

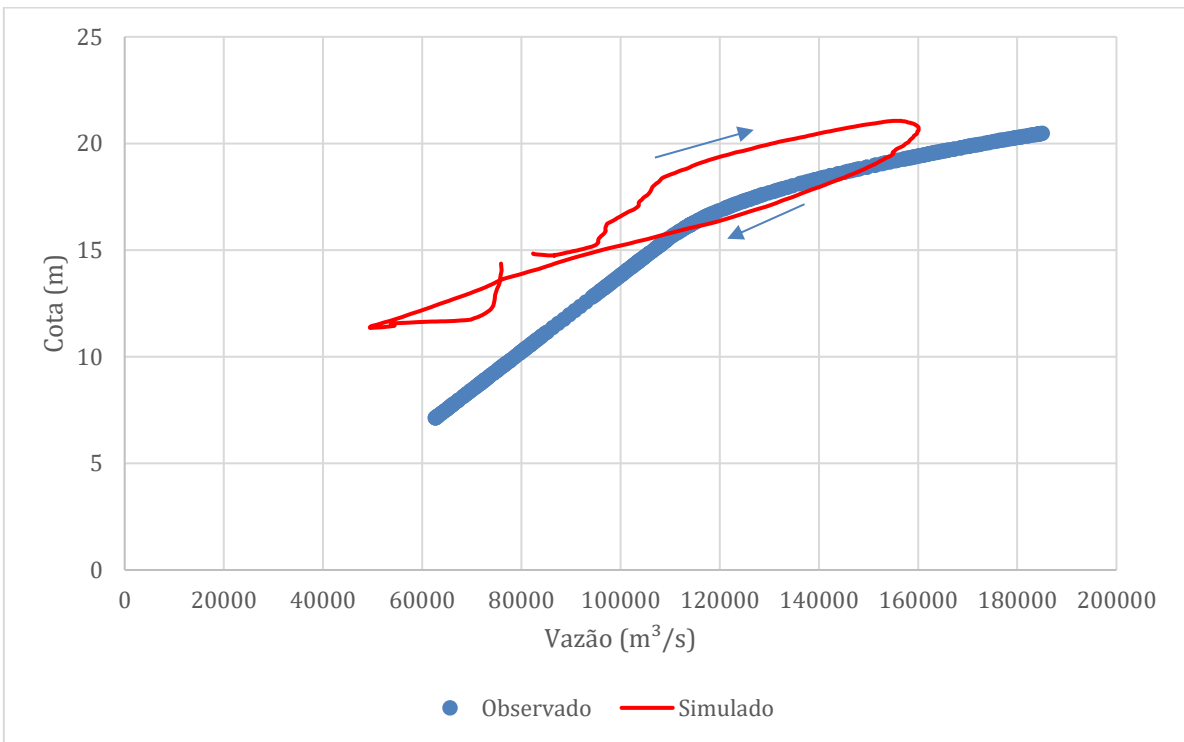


Figura 5.20 - Cota vs vazão na estação Jatuarana

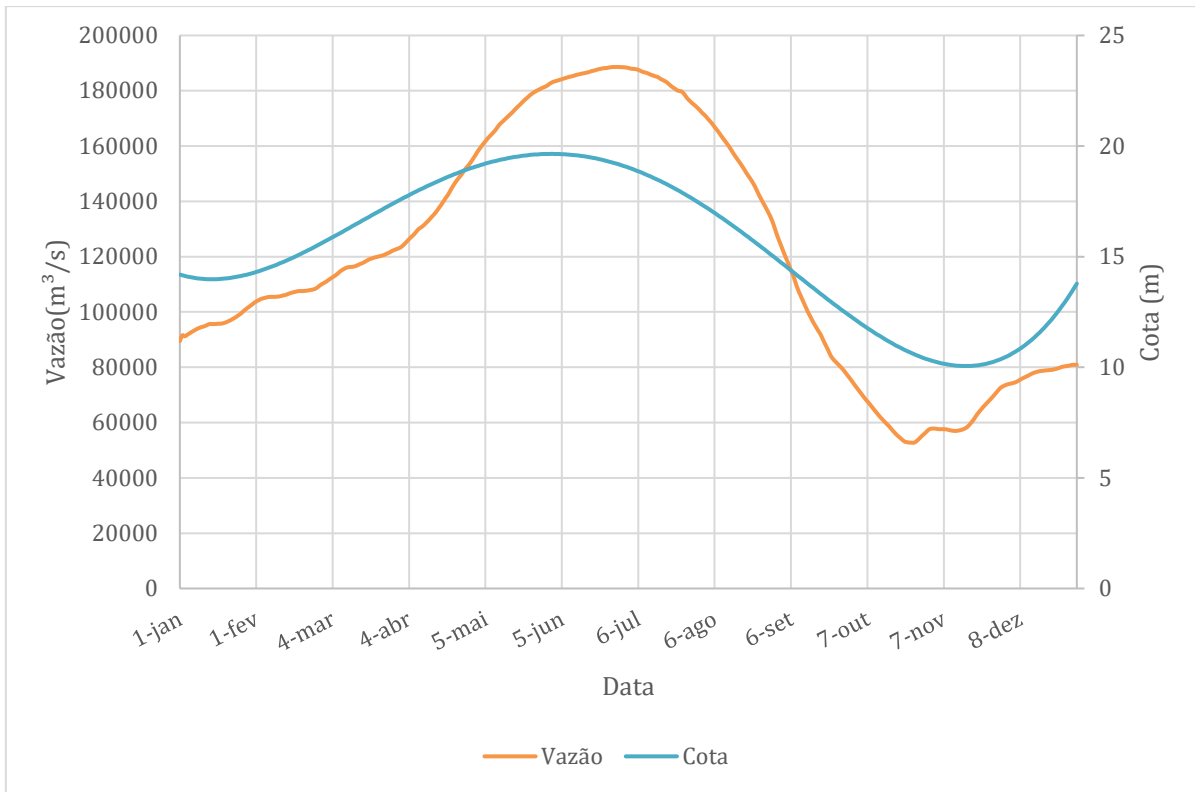


Figura 5.21 - Vazão e Cota obtidas pelo modelo na estação Iracema

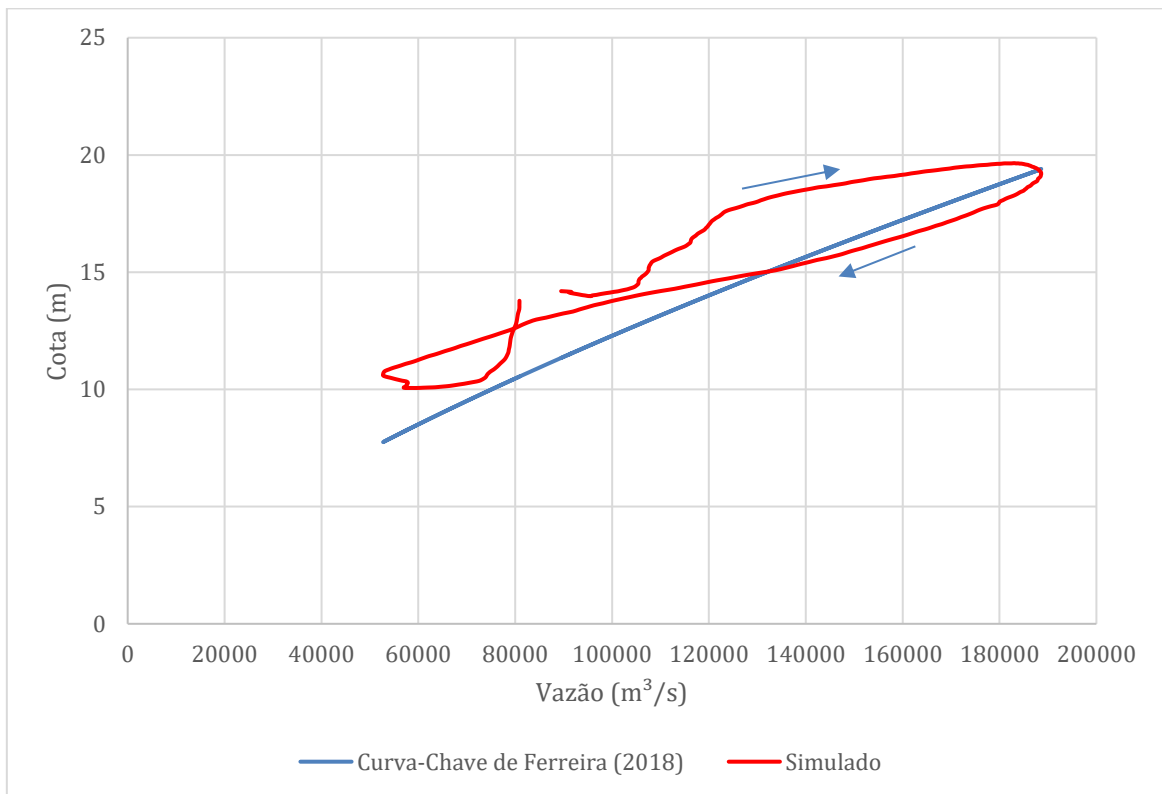
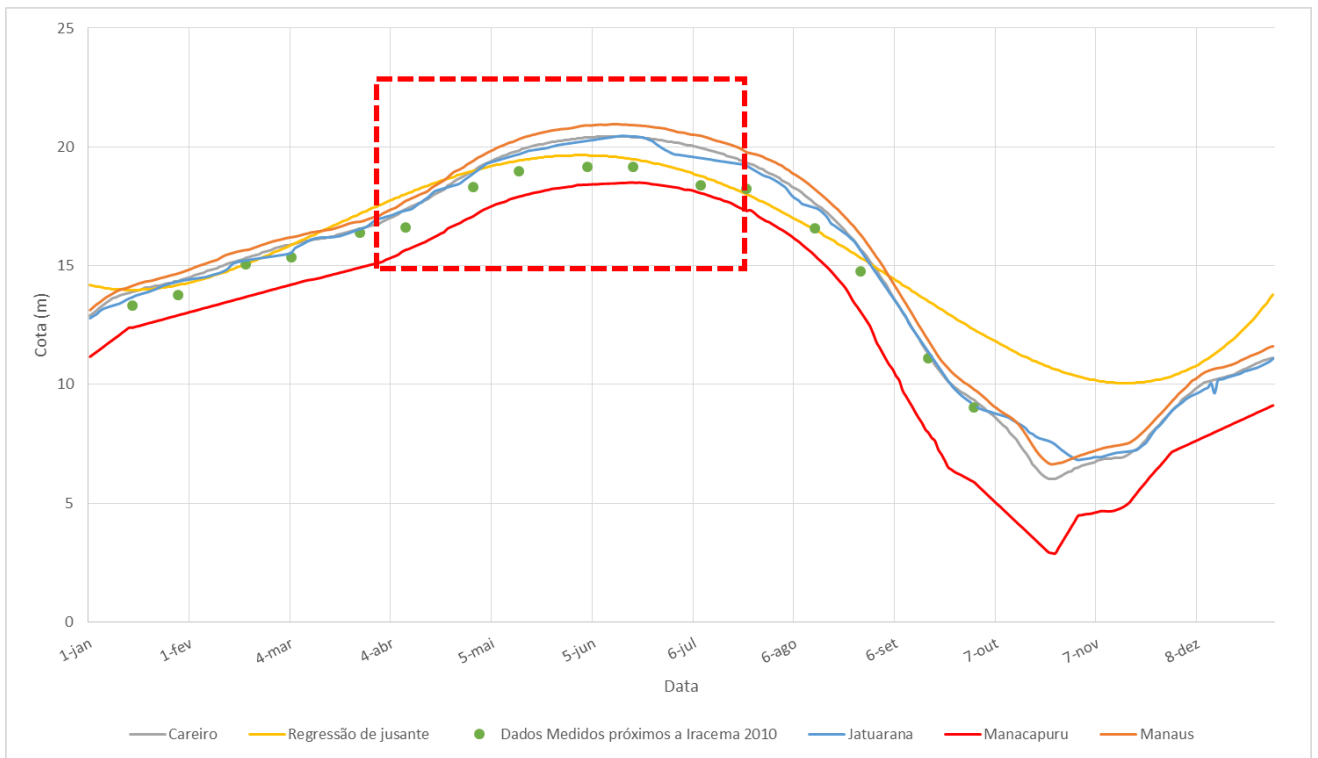
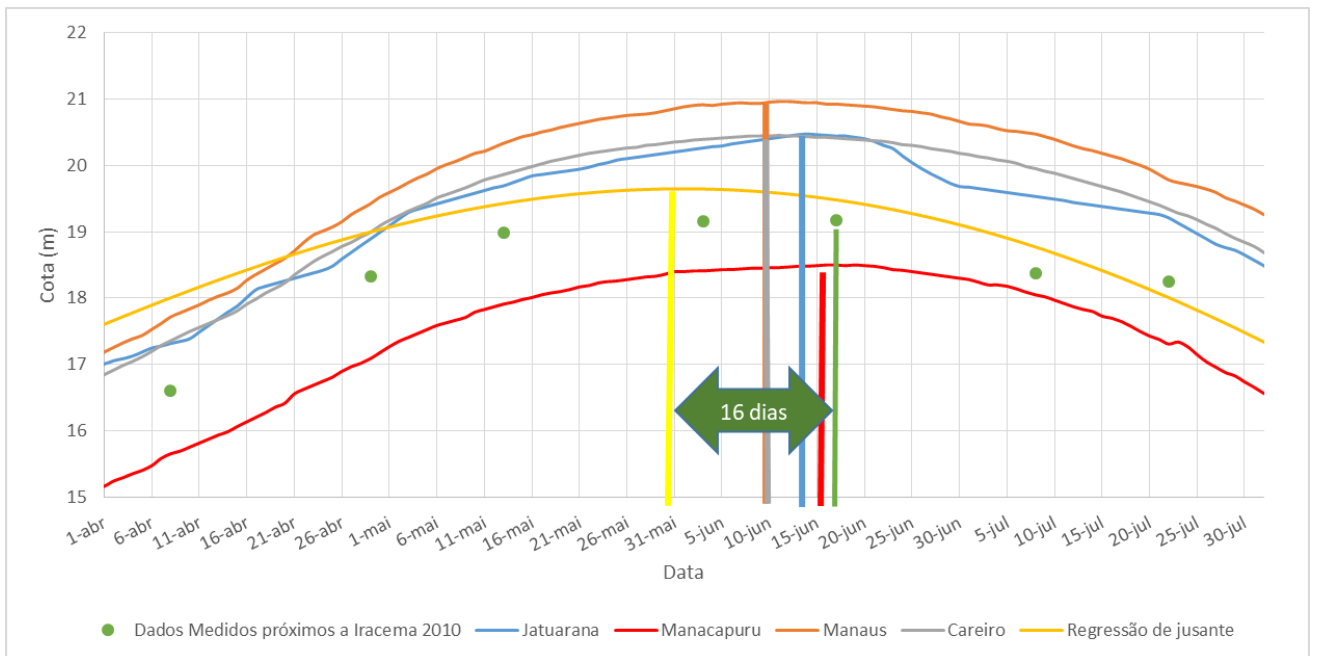


Figura 5.22 - Cota vs vazão na estação Iracema



(a)



(b)

Figura 5.23 - Níveis medidos com destaque no período de pico (a) e área destacada (b)

Tabela 5.5 - Defasagem entre cota e vazão nas estações

Estação	Pico de cota	Pico de vazão	Diferença (dias)
Manaus	07/06	13/07	36
Careiro	06/06	17/06	11
Jatuarana	08/06	30/06	22
Iracema	01/06	28/06	27

O maior valor medido na seção transversal de Iracema está 16 dias atrasado em relação ao valor mais alto obtido na regressão polinomial. Apesar do grande espaçamento entre os dados medidos, a proximidade com os dias de pico das outras estações (indicadas pelas linhas verticais na Figura 5.23) indica que o valor obtido pela regressão, realmente apresentou adiantamento dos valores.

5.5 ÁREAS INEFETIVAS

Com as melhores combinações obtidas para o modelo no primeiro grupo de simulações, no qual foi alterado apenas o coeficiente de Manning do canal, foi feita a comparação dos resultados retirando-se as áreas inefetivas a fim de observar a sensibilidade ao modelo. A variação pode ser visualizada na Figura 5.24.

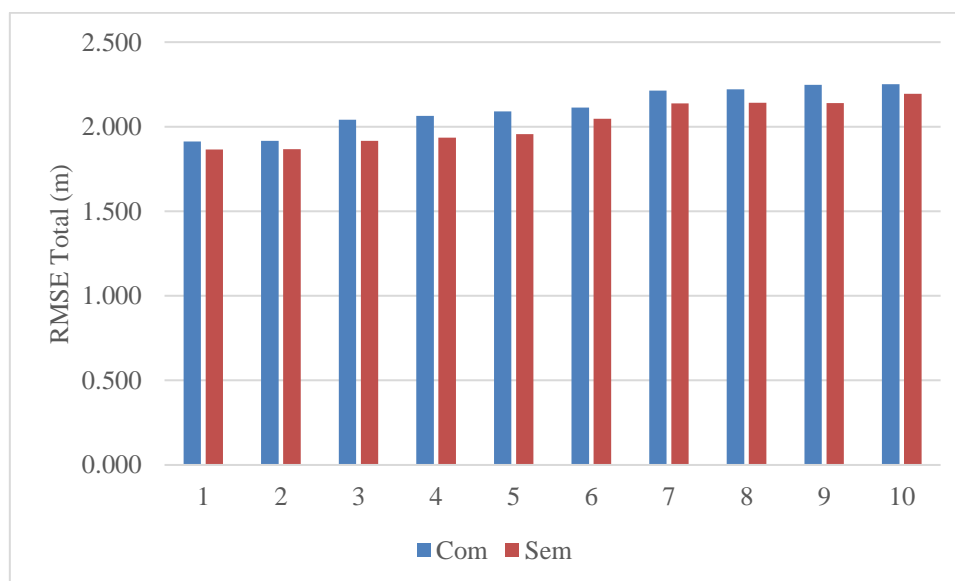


Figura 5.24 - Comparação dos resultados de calibração com e sem áreas de escoamento inefetivo

A diferença média entre os resultados do RMSE foi de 0,087 m, diferença percentual média de 4% ao comparar-se com a simulação com as áreas de escoamento inefetivo, tendo em vista que elas representam 41% da ocupação da área de estudo, isto indica baixa sensibilidade para calibração do modelo em relação ao nível.

6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A utilização de modelos hidrodinâmicos mostrou grande potencial para a melhor compreensão de escoamentos em cursos hídricos de grande porte. A simulação em escoamento transiente apresentou melhoras significativas nos resultados em comparação a considerações de escoamento permanente, como o trabalho de Ferreira (2018), por exemplo. Mesmo com simplificações em relação a realidade (rugosidade invariável tanto para grandes trechos, quanto em relação ao tempo e escoamento unidimensional, por exemplo) o modelo apresentou resultados condizentes aos dados observados para o comportamento do nível na época de cheia na área estudada. Apesar de em épocas de níveis mais baixos o modelo não apresentar resultados muito representativos em comparação ao observado, o fato dele atingir resultados mais próximos ao real nas épocas de cheia indica a possibilidade de uma boa ferramenta para a previsão para eventos extremos como inundações na cidade de Manaus, por exemplo.

A vazão apresentou bons resultados na estação de Jatuarana, no rio Amazonas, entretanto os valores na estação Careiro não foram satisfatórios. O trecho estudado apresenta larguras com mais de 3 km em algumas seções, portanto o fato do modelo considerar o escoamento unidimensional, justifica este resultado devido a limitação na obtenção de resultados mais precisos em momentos de divisão de vazão em junções, como o caso do ponto na confluência em que o escoamento se divide entre estes dois trechos. A compreensão de como ocorre esta divisão de fluxos é de extrema importância, por exemplo, para o entendimento para o transporte de sedimentos, tópico significativo na análise de navegabilidade de canais. Recomenda-se, para uma melhor compreensão da variação do escoamento em cada seção e análise da divisão de vazão, simulações em modelo bidimensional, também disponíveis na versão do HEC-RAS (5.0) utilizada no presente trabalho.

Strasser *et al.* (2005) afirmam que o coeficiente de Manning mostrou-se, historicamente, o mais complexo parâmetro para ser estudado e avaliado em modelagem hidráulica. Os valores obtidos no presente estudo apresentam incertezas devido ao trecho estudado apresentar grande variação temporal nas informações referentes ao fundo do canal, tendo em vista que o fluxo do na região de confluência causa significativas variações do relevo do leito do rio durante o tempo, e grande influência das planícies de inundação. Os valores baixos do coeficiente no trecho do rio Amazonas justificam-se devido ao canal principal bem definido, assim como Lara (2017) aponta como influência para tais valores.

Além da relação do coeficiente com a batimetria do canal, a variação também ocorre em relação ao nível d'água numa relação inversamente proporcional. No presente trabalho essa variação não foi considerada devido a simplificações feitas por causa da calibração ter sido feita de maneira manual. Recomenda-se para próximos trabalhos, a consideração da variação do coeficiente de Manning em função do nível d'água, em busca de um melhor ajuste na época de vazante.

O modelo mostrou-se uma possível ferramenta para o estudo da histerese em cursos hídricos com baixa declividade. A histerese observada pelo modelo do presente trabalho, apresentou resultados não encontrados na literatura. A justificativa deste resultado está nos dados de entrada utilizados como condição de contorno. A montante, os dados de vazão obtidos por meio de curva-chave, no rio Solimões, em um modelo de simulação em regime transiente agregam a incerteza trazida pelo atraso do pico de vazão em relação ao real. A jusante, a regressão polinomial utilizada para obtenção de dados diários de nível a partir de dados de um intervalo de 9 anos, causou o adiantamento do pico de nível utilizado como condição de contorno. Estas situações indicam as razões pelo comportamento inverso ao esperado da histerese na relação de cota-vazão. A velocidade de propagação da onda de nível para montante é influenciada pelo número de Courant, portanto, sugere-se para os próximos trabalhos, a variação deste número para a observação da sensibilidade do modelo a esse valor.

A obtenção de dados representativos e temporalmente coincidentes são de extrema importância para a elaboração de um bom modelo de escoamento e para atingir resultados representativos. A obtenção de dados de vazão medidos de maneira direta por equipamentos (ADCP ou molinete) em diferentes situações do escoamento podem ser fontes de dados que diminuam a incerteza dos resultados. Dados batimétricos atualizados também aumentam a representatividade dos valores de rugosidade do canal.

As estações virtuais apresentam diferenças de valores de nível numa mesma seção em relação às estações fluviométricas. Essas diferenças, juntamente com o uso de dados de modelos como entrada, acarretam em incertezas no momento da calibração, portanto recomenda-se, para próximos trabalhos, a escolha de um período para simulação com maior quantidade de dados disponíveis em estações fluviométricas, para que estes sejam utilizados tanto como dados de entrada como de calibração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAN, A. O. (2006), Open channel hydraulics. Elsevier. Amsterdam, Holanda, 360p.
- ALVES, L.G.S., SILVA D.D., PRUSKI F.F. E FILIZOLA N. (2017) Estimativa do coeficiente de Manning para cálculo de vazão em regime sob efeito de remanso hidráulico na bacia amazônica. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, Brasil.
- ANTAQ, Agência Nacional de Transportes Aquaviários. Relatório Executivo: Bacia Amazônica. Plano Nacional de Integração Hidroviária [PNIH]. Fev. 2013.
- ARMANINI, A. (2017). Principles of River Hydraulics. 2. ed. Springer, Trento, Italy, 216p.
- BEVEN, K. Rainfall-runoff modelling: the primer. 2ª ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2012. 457 p.
- BRUNNER, G.W. (2016). USACE – U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS, River Analysis System, Hydraulic Reference Manual (CPD-69). Davis, CA: Hydrologic Engineering Center. 547p.
- BRUNNER, G.W. (2016). USACE – U.S. Army Corps of Engineers. HEC-RAS, River Analysis System User's Manual (CPD-68), Davis, CA: Hydrologic Engineering Center. 960p.
- CAMPOS, J.N. Lições em modelos e simulação hidrológica. 1. ed. Fortaleza, CE: ASTEF/Expressão Gráfica, 2009. v. 1. 166p
- CABRAL, S.L., CAMPOS, J.N.B., SILVEIRA, C.S., TEXEIRA, F.A.A., (2016). “Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do rio Granjeiro-CE”, Geociências, UNESP, São Paulo, 35(1) 90-101.
- ÇENGEL, Y.A. E CIMBALA J.M., (2012) Mecânica dos Fluidos. AMGH Editora Ltda, Porto Alegre. 820p.
- CHRISTOFOLETTI, A. (1999) Modelagem de Sistemas Ambientais. Ed. Edgard Blucher, São Paulo.
- COUTINHO, M. M. (2015) Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos

Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 245p.

- DIAS, L. E. B. e MACIEL, J.S.C. (2018). “Diagnóstico da logística e infraestrutura do transporte Hidroviário de cargas no Amazonas”, 8º Congresso Luso-Brasileiro para o planejamento urbano, integrado e sustentável, Coimbra, Portugal.
- FAN, F. M., PONTES, P.R.M., PAIVA R.C.D., (2014). “Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant.” Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 19 (4), 137-147.
- FASSONI-ANDRADE A.C, RUDORFF C. M. E PAIVA R. C. D., Modelagem da velocidade de escoamento na planície de inundação do baixo rio Amazonas. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, Brasil.
- 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.
- FILHO, G.M.M., ANDRADE, R. S., JUNIOR, J.C.Z., FILHO, L.N.L.M., (2012). “Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades”. Revista de Ciências Ambientais, 6(2), 35-47.
- FOLHA DE SÃO PAULO. Em Manaus, famílias vivem dois meses por ano em casas inundadas de água suja, 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>>
- FRANZINELLI, E., (2011). “Características morfológicas da confluência dos Rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil)”, Revista Brasileira de Geociências, 41(4), 587-596.
- FREITAS, L.G., SILVA, J.S., CALMANT, S., SEYLER, F. (2013), “Aplicações da altimetria espacial para monitoramento hidrológico da bacia do rio Purus”. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Paraná.
- GUALTIERI, C. IANNIRUBERTO, M., FILIZOLA, N., SANTOS, R., ENDRENY, T. (2017). “Hydraulic complexity at a large river confluence in the Amazon basin”, Ecohydrology, 10(7), 1-12.
- HIDROWEB - Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>>. Acesso em: 1 jun. 2019.

- 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. 2019.
- KENNEDY, E.J. “Discharge Rating at Gaging Stations”, Capítulo 10 de “Techniques of Water- Resources Investigations of the United States Geological Survey”, USGovernment Printing Office, Washington, 1984.
- LARA, P.G, (2017). “Análise da variabilidade do coeficiente de Manning no rio Tapajós” XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis, Brasil.
- MALDONADO, L. H.; GAMARO, P.(2013) “Métodos de correção de vazões em tramos superiores de curvas-chaves e para o caso de histerese.” Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves. Porto Alegre: ABRH, 2013. p. 1-8.
- MANAUS. Lei n. 1666, de 25 de Abril de 2012
- MANSANAREZ, V., LE COZ, J.,RENARD, B., LANG, M., VAUCHEL, P. (2016). Bayesian Analysis of stage fall discharge rating curves and their uncertainties. Water Resources Research, 52, doi:10.1002/2016WR018916
- MARTINS M.V.L.(1997), Modelação do escoamento não permanente nos cursos d’água litorâneos. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Campinas, SP, 111p.
- MARTONI, A. M.; LESSA, R. C. (1999), “Modelagem hidrodinâmica do canal do rio Paraná, trecho Porto São José – Porto 18. Parte II: Calibragem do modelo.” Acta Scientiarum, v.21, n.4, p.961-970.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; MAGNAGO, P. F. (2011) “Análise qualitativa e quantitativa da histerese entre vazão e concentração de sedimentos durante eventos hidrológicos.” Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 12, p. 1306-1313.
- MOREIRA, D. M. Godésia Aplicada ao Monitoramento Hidrológico da Bacia Amazônica. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, set. 2016.
- MUNIZ, L. A. R. (1995) Método dos volumes finitos aplicados a problemas de escoamentos bidimensionais na região de entrada de dutos cilíndricos. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. 103p. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/267367>>. Acesso em: 1 jul. 2019.

- NEGRÃO, A. C. (2015) Modelagem hidrodinâmica unidimensional da passagem de onda de cheia em um córrego urbano considerando escoamento transcrito. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 176p.
- OLIVEIRA F. A., PEREIRA T. S. R., SOARES A.K. e FORMIGA K.T.M.(2016). “Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível”, Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 21(4), 707-718.
- OSORIO, A. L. N. A. (2017). Modelo Bayesiano Completo para análise de frequência de cheias com incorporação do conhecimento hidráulico na modelagem das incertezas na curva-chave. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-196/17, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 161 p.
- PAPPENBERGER, F.; MATGEN, P.; BEVEN, K.; HENRY, J-B.; PFISTER, L.; FRAIPONT DE, P. (2006). “Influence of uncertain boundary conditions and model structure on flood inundation predictions”. Water Resources. Vol. 29, pp. 1430 – 1449.
- PORTO, R. DE M. (2006). Hidráulica Básica. EESC-USP, São Carlos, 540p.
- QUIROGA V.M, KURE, S., UDO, K, MANO, A. (2016). “Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS version 5”, RIBAGUA – Revista Iberoamericana del Agua, 3(1), 25-33.
- RIBEIRO NETO, A. (2001) “Modelagem Hidrodinâmica da Bacia do rio Amazona”. Dissertação de Mestrado., Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- ROSA, D. W. B., NASCIMENTO, N.O., MOURA, P.M., (2017). “Obtenção indireta de curvas-chave por meio de modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS e SWMM”. Anais do XI Encontro Nacional de Águas Urbanas, Belo Horizonte, Brasil.
- SANTOS, A. G. (2016). Acoplamento do modelo atmosférico WRF ao modelo hidrológico SCS/HMS para a previsão de cheias na Bacia do Paraíba do Meio em Alagoas. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, CE, 132p.
- SILVA, R. C. V. da; MASCARENHAS, F. C. B.; MIGUEZ, M. G. (2003) Hidráulica Fluvial. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 306p.
- SOUSA, M.M. (2010), Comparação entre ferramentas de modelagem unidimensional e quasi-bidimensional, permanente e não-permanente, em planejamento e projetos de

- engenharia hidráulica. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 160p.
- SOUZA, C.F., COLLISCHONN, W., TUCCI, C.E.M. (2007). “Simulação hidrodinâmica via aquisição remota de dados” Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo.
- THEIA - LAND DATA CENTRE. Disponível em: <<http://www.theia-land.fr/>>. Acesso em: 1 jun. 2019.
- TURQUETTI, G. N.; IANNIRUBERTO, M. (2017). “Análise comparativa das características acústicas e físico-químicas das águas dos rios Negro e Solimões no Encontro das águas – Manaus (AM)”. Anais do XV International Congress of the Brazilian Geophysocal Society. n. February, p. 668–673.
- VANELLI, F.M., MONTEIRO L.R. e FAN, F.M. (2018). “Curva-chave obtida por simulação hidrodinâmica”. XXVIII Congresso Latinoamericano De Hidráulica Buenos Aires, Argentina.
- VELASCO, D.W., COOK, M.J. (2011). “Medição De Velocidade Do Escoamento Em Rios E Sua Aplicação Em Sistemas De Alerta”. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Alagoas.
- WARMINK, J.J., BOOIJ, M.J., KLIS, H., HULSCHER, S.J.M.H., (2007) Uncertainty in water level predictions due to various calibrations. 1st International Conference on Adaptive & Integrated Water Management, Vol. 1 Basel, Suíça.
- WONGCHUIG, S.C., PAIVA, R. C. D., SIQUEIRA, V., COLLISCHONN, W. (2019) “Hydrological reanalysis across the 20th century: A case study of the Amazon Basin”. *Journal of Hydrology*, 570, 755-773.

APÊNDICES

APÊNDICE A – VALORES DOS COEFICIENTES DE MANNINGS USADOS NA CALIBRAÇÃO

Tabela 1 - Combinações do Manning do canal principal considerando os valores das planícies de inundação do trabalho de Ferreira (2018)

Amazonas - conflu-monoc	Amazonas - monoc-irac	Careiro-Varzea	Negro manaus-conflu	Solimoes irand-care	Solimões care-conflu	RMSE total
0.015	0.015	0.02	0.023	0.021	0.02	1.912
0.015	0.015	0.025	0.023	0.021	0.02	1.916
0.023	0.015	0.025	0.023	0.021	0.02	2.042
0.023	0.015	0.025	0.023	0.023	0.023	2.065
0.023	0.015	0.025	0.023	0.025	0.025	2.090
0.015	0.015	0.02	0.035	0.035	0.035	2.114
0.015	0.015	0.02	0.035	0.04	0.04	2.213
0.015	0.015	0.025	0.035	0.04	0.04	2.220
0.02	0.02	0.025	0.023	0.025	0.025	2.247
0.021	0.022	0.01	0.023	0.022	0.02	2.251
0.021	0.022	0.01	0.023	0.021	0.02	2.251
0.021	0.022	0.012	0.023	0.021	0.02	2.252
0.022	0.022	0.01	0.023	0.021	0.02	2.255
0.02	0.022	0.01	0.023	0.022	0.02	2.259
0.022	0.022	0.01	0.023	0.022	0.02	2.266
0.021	0.022	0.015	0.023	0.021	0.02	2.267
0.021	0.022	0.011	0.023	0.021	0.02	2.269
0.02	0.022	0.015	0.021	0.022	0.02	2.278
0.02	0.022	0.015	0.023	0.022	0.02	2.283
0.022	0.02	0.025	0.023	0.025	0.025	2.288
0.02	0.022	0.017	0.023	0.022	0.02	2.289
0.02	0.022	0.018	0.023	0.022	0.02	2.293
0.021	0.023	0.011	0.023	0.021	0.02	2.295
0.022	0.022	0.015	0.023	0.022	0.02	2.295
0.021	0.023	0.012	0.023	0.021	0.02	2.301
0.021	0.022	0.018	0.023	0.023	0.023	2.303
0.02	0.022	0.018	0.023	0.023	0.02	2.305
0.025	0.022	0.01	0.023	0.022	0.02	2.306
0.02	0.022	0.018	0.023	0.023	0.023	2.306
0.022	0.022	0.015	0.021	0.022	0.02	2.313
0.021	0.022	0.011	0.023	0.022	0.02	2.313
0.021	0.022	0.018	0.023	0.025	0.025	2.329
0.021	0.022	0.018	0.023	0.03	0.03	2.405
0.021	0.022	0.018	0.023	0.03	0.031	2.406
0.021	0.022	0.02	0.023	0.03	0.031	2.413
0.021	0.022	0.022	0.023	0.03	0.031	2.420

Tabela 2 - Combinações do Manning do canal principal considerando os valores das planícies de inundação do trabalho de Ferreira (2018) (Cont.)

0.021	0.022	0.025	0.023	0.03	0.031	2.429
0.021	0.022	0.028	0.023	0.03	0.031	2.446
0.021	0.022	0.028	0.023	0.031	0.031	2.453
0.021	0.022	0.028	0.032	0.031	0.031	2.456
0.021	0.022	0.032	0.023	0.031	0.031	2.462
0.021	0.022	0.028	0.032	0.032	0.032	2.474
0.021	0.022	0.028	0.032	0.033	0.033	2.492
0.021	0.023	0.032	0.023	0.03	0.031	2.497
0.02	0.02	0.025	0.035	0.04	0.04	2.519
0.021	0.022	0.028	0.032	0.035	0.035	2.529
0.021	0.022	0.028	0.032	0.036	0.035	2.547
0.021	0.022	0.028	0.032	0.036	0.036	2.549
0.021	0.022	0.028	0.032	0.036	0.039	2.552
0.022	0.022	0.028	0.032	0.036	0.036	2.570
0.022	0.022	0.028	0.033	0.036	0.036	2.584
0.022	0.022	0.028	0.032	0.037	0.037	2.590
0.022	0.022	0.028	0.035	0.037	0.037	2.591
0.022	0.022	0.028	0.03	0.037	0.037	2.602
0.022	0.022	0.028	0.035	0.038	0.038	2.611
0.025	0.025	0.023	0.023	0.04	0.04	2.624
0.022	0.022	0.028	0.035	0.039	0.039	2.631
0.022	0.022	0.028	0.033	0.039	0.039	2.644
0.022	0.022	0.028	0.033	0.04	0.04	2.665
0.023	0.023	0.028	0.033	0.039	0.039	2.713
0.023	0.023	0.02	0.035	0.04	0.04	2.724
0.023	0.023	0.025	0.035	0.04	0.04	2.744
0.023	0.025	0.023	0.023	0.04	0.035	2.816
0.023	0.023	0.023	0.023	0.035	0.035	2.864
0.03	0.03	0.02	0.04	0.025	0.025	3.083
0.023	0.03	0.028	0.036	0.04	0.04	3.222
0.023	0.023	0.029	0.036	0.04	0.04	3.224
0.03	0.03	0.028	0.04	0.039	0.039	3.347
0.03	0.03	0.03	0.04	0.039	0.039	3.357
0.03	0.03	0.028	0.033	0.039	0.039	3.358
0.03	0.03	0.029	0.036	0.04	0.04	3.369
0.03	0.03	0.029	0.038	0.04	0.04	3.370
0.03	0.03	0.029	0.039	0.04	0.04	3.371
0.03	0.03	0.029	0.04	0.04	0.04	3.379
0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	3.385
0.031	0.03	0.03	0.04	0.039	0.039	3.390
0.031	0.03	0.03	0.042	0.039	0.039	3.392
0.031	0.031	0.03	0.04	0.039	0.039	3.465

Tabela 3 - Combinações do Manning do canal principal considerando os valores das planícies de inundação do trabalho de Ferreira (2018) (Conclusão)

0.035	0.035	0.02	0.035	0.021	0.021	3.544
0.035	0.035	0.02	0.035	0.025	0.025	3.588
0.035	0.035	0.02	0.04	0.025	0.025	3.590
0.035	0.035	0.02	0.025	0.029	0.029	3.637
0.035	0.035	0.02	0.035	0.029	0.029	3.640
0.035	0.035	0.025	0.035	0.029	0.029	3.683
0.04	0.04	0.02	0.035	0.025	0.025	4.128
0.042	0.042	0.02	0.035	0.032	0.032	4.434
0.042	0.042	0.025	0.035	0.032	0.032	4.489
0.045	0.045	0.02	0.035	0.025	0.025	4.689
0.045	0.045	0.02	0.035	0.029	0.029	4.733
0.045	0.045	0.02	0.035	0.04	0.04	4.879
0.045	0.045	0.04	0.035	0.04	0.04	5.070

Tabela 4 - Combinações dos Mannings para a seção inteira

Amazonas - conflu-monoc	Amazonas - monoc-irac	Careiro-Varzea	Negro manaus-conflu	Solimoes irand-care	Solimões care-conflu	RMSE total
0.02	0.025	0.035	0.033	0.02	0.02	2.478
0.02	0.025	0.035	0.031	0.021	0.021	2.484
0.02	0.025	0.035	0.033	0.021	0.021	2.485
0.02	0.025	0.035	0.035	0.021	0.021	2.486
0.02	0.025	0.027	0.031	0.021	0.021	2.490
0.02	0.025	0.036	0.031	0.021	0.021	2.491
0.02	0.025	0.034	0.031	0.021	0.021	2.493
0.02	0.025	0.025	0.031	0.021	0.021	2.495
0.02	0.023	0.035	0.033	0.023	0.023	2.499
0.02	0.025	0.022	0.031	0.021	0.021	2.505
0.02	0.025	0.035	0.033	0.023	0.023	2.506
0.02	0.025	0.033	0.031	0.021	0.021	2.506
0.023	0.023	0.025	0.031	0.021	0.021	2.512
0.023	0.023	0.025	0.032	0.021	0.021	2.513
0.023	0.023	0.025	0.035	0.021	0.021	2.517
0.023	0.023	0.025	0.032	0.022	0.022	2.522
0.02	0.025	0.04	0.031	0.021	0.021	2.524
0.02	0.025	0.035	0.033	0.025	0.02	2.528
0.02	0.023	0.035	0.033	0.025	0.02	2.533
0.023	0.023	0.025	0.04	0.021	0.021	2.538
0.02	0.023	0.035	0.033	0.02	0.02	2.540
0.023	0.025	0.025	0.031	0.021	0.021	2.555
0.023	0.023	0.025	0.035	0.025	0.025	2.560

Tabela 5 - Combinações dos Mannings para a seção inteira (Cont.)

0.023	0.023	0.025	0.033	0.025	0.025	2.560
0.023	0.023	0.025	0.04	0.025	0.025	2.562
0.023	0.023	0.025	0.038	0.025	0.025	2.565
0.023	0.023	0.025	0.032	0.025	0.025	2.565
0.023	0.023	0.025	0.03	0.025	0.025	2.569
0.02	0.023	0.035	0.033	0.025	0.025	2.575
0.023	0.023	0.025	0.04	0.028	0.028	2.604
0.023	0.023	0.035	0.033	0.02	0.02	2.606
0.025	0.025	0.035	0.035	0.02	0.02	2.611
0.023	0.023	0.025	0.04	0.03	0.03	2.635
0.023	0.023	0.024	0.04	0.03	0.03	2.642
0.023	0.023	0.02	0.04	0.03	0.03	2.645
0.02	0.023	0.035	0.033	0.03	0.03	2.653
0.023	0.023	0.028	0.04	0.03	0.03	2.655
0.023	0.023	0.028	0.025	0.03	0.03	2.662
0.023	0.023	0.026	0.04	0.03	0.03	2.662
0.024	0.024	0.02	0.04	0.03	0.03	2.671
0.025	0.025	0.035	0.035	0.025	0.02	2.671
0.023	0.023	0.025	0.04	0.033	0.033	2.690
0.023	0.023	0.022	0.04	0.03	0.03	2.690
0.023	0.023	0.028	0.025	0.032	0.032	2.700
0.025	0.025	0.02	0.04	0.03	0.03	2.715
0.025	0.025	0.028	0.028	0.03	0.03	2.727
0.025	0.025	0.028	0.03	0.03	0.03	2.728
0.025	0.025	0.028	0.033	0.03	0.03	2.729
0.023	0.023	0.02	0.025	0.03	0.03	2.736
0.025	0.025	0.032	0.033	0.03	0.03	2.739
0.023	0.023	0.025	0.04	0.035	0.035	2.741
0.025	0.025	0.028	0.025	0.032	0.032	2.778
0.025	0.025	0.028	0.025	0.035	0.035	2.823
0.028	0.028	0.02	0.04	0.03	0.03	2.860
0.023	0.023	0.025	0.032	0.039	0.039	2.875
0.022	0.022	0.02	0.04	0.03	0.03	2.885
0.023	0.023	0.032	0.03	0.039	0.039	2.894
0.025	0.025	0.032	0.033	0.039	0.039	2.898
0.023	0.023	0.032	0.033	0.039	0.039	2.926
0.028	0.028	0.032	0.033	0.03	0.03	2.929
0.028	0.028	0.032	0.033	0.033	0.033	2.979
0.028	0.028	0.032	0.033	0.035	0.035	3.015
0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	3.075
0.028	0.028	0.032	0.033	0.039	0.039	3.091
0.03	0.03	0.032	0.033	0.039	0.039	3.246
0.04	0.04	0.02	0.04	0.03	0.03	3.966
0.04	0.04	0.032	0.033	0.039	0.039	4.239

Tabela 6 - Combinações dos Mannings para a seção inteira (Conclusão)

0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	4.329
0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	26.443
0.02	0.02	0.02	0.023	0.021	0.021	26.486
0.02	0.02	0.035	0.035	0.025	0.02	27.566
0.015	0.015	0.02	0.023	0.021	0.021	54.495

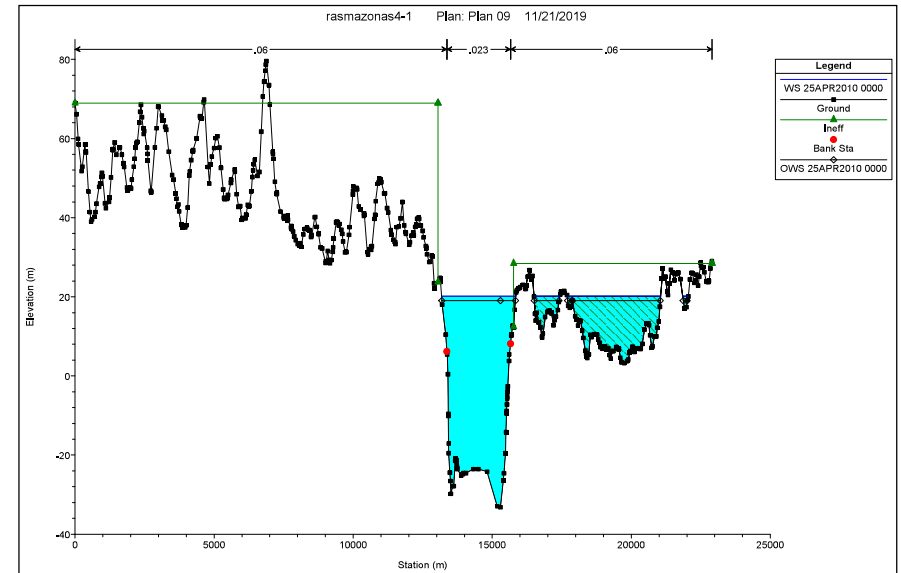
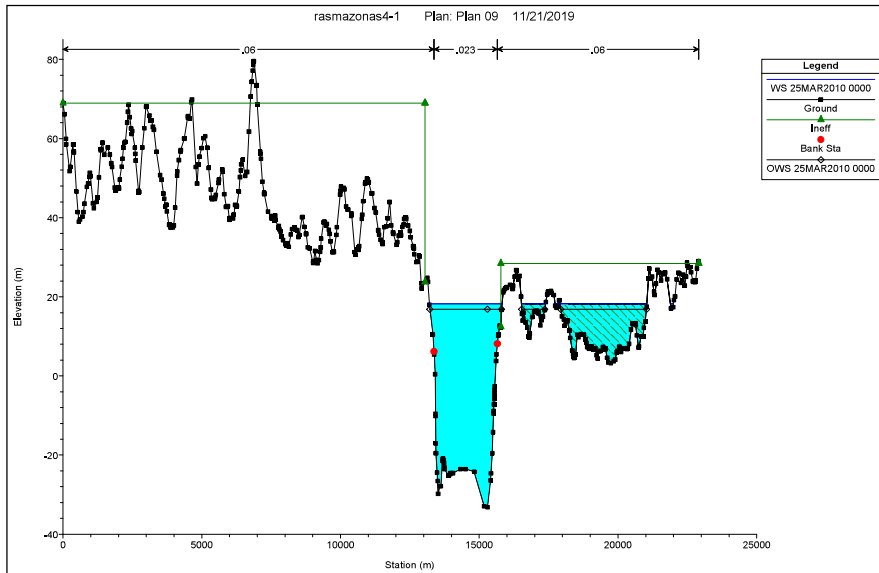
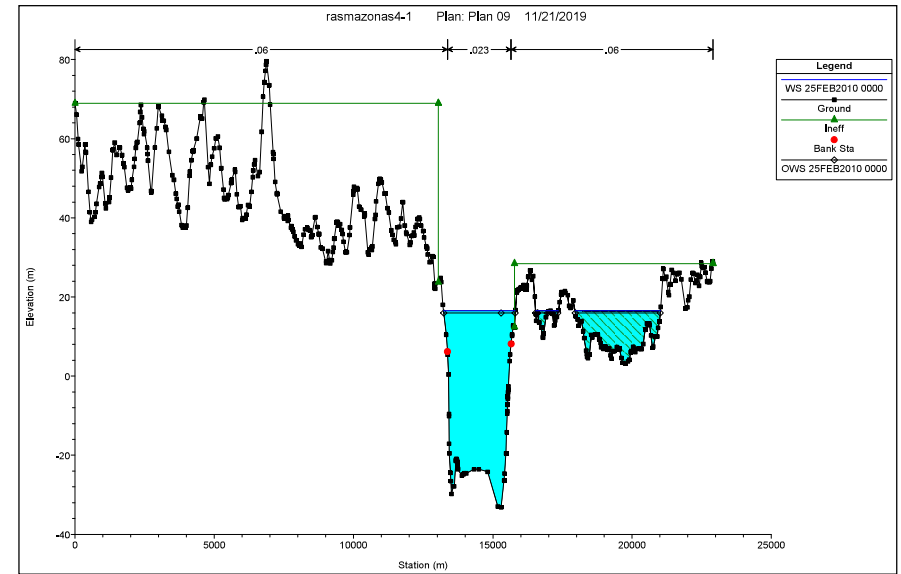
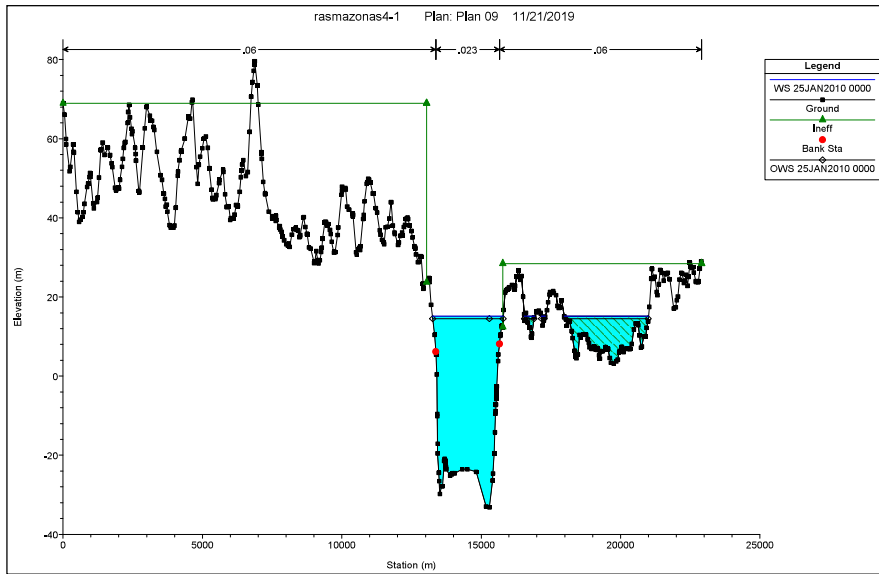
Tabela 7 - Combinações do Manning variando os valores na planície de inundação

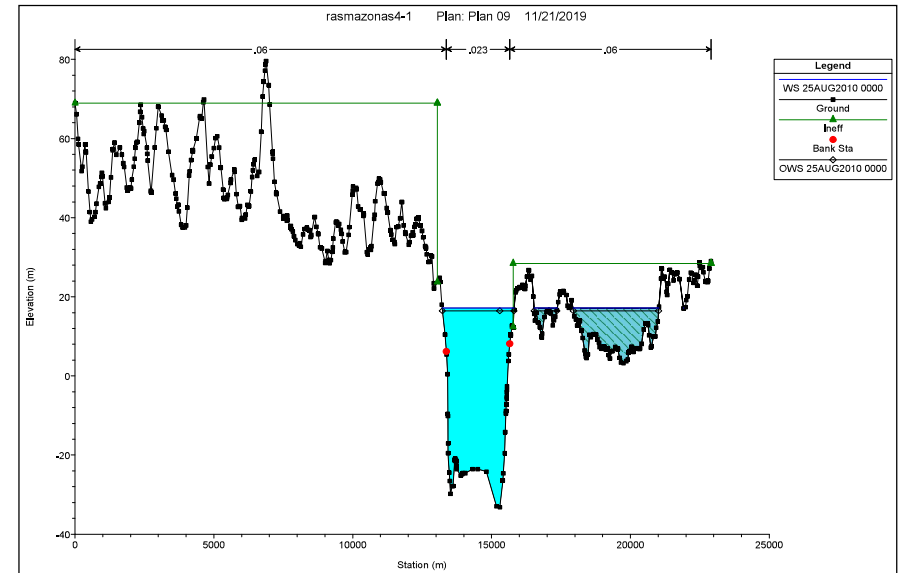
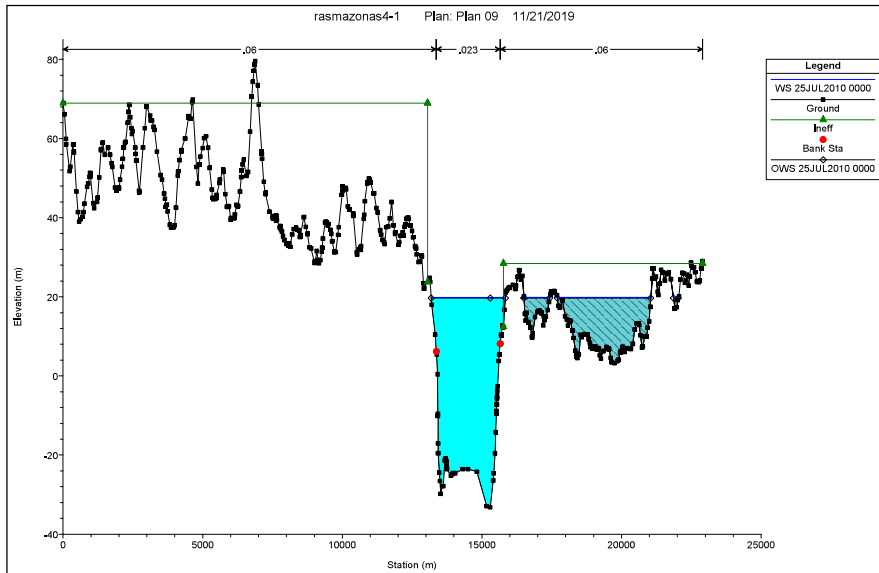
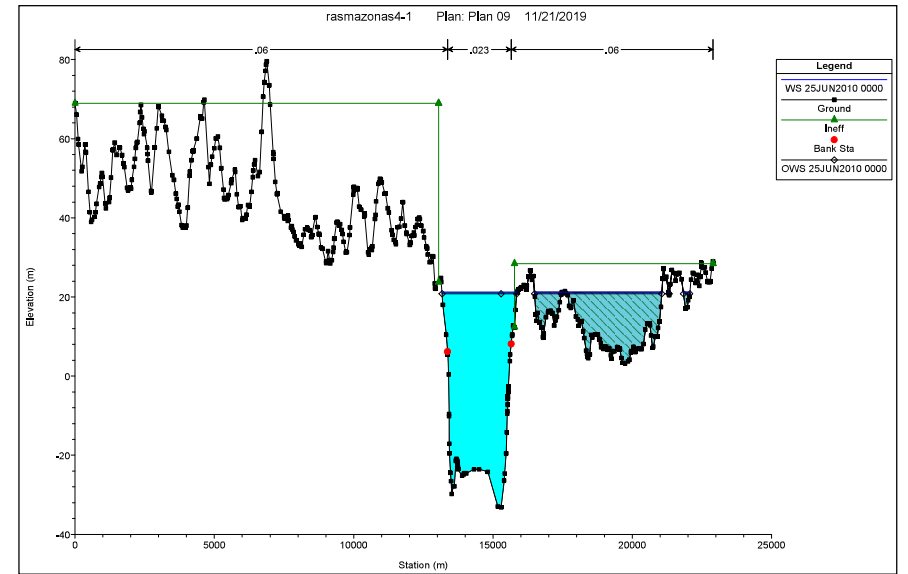
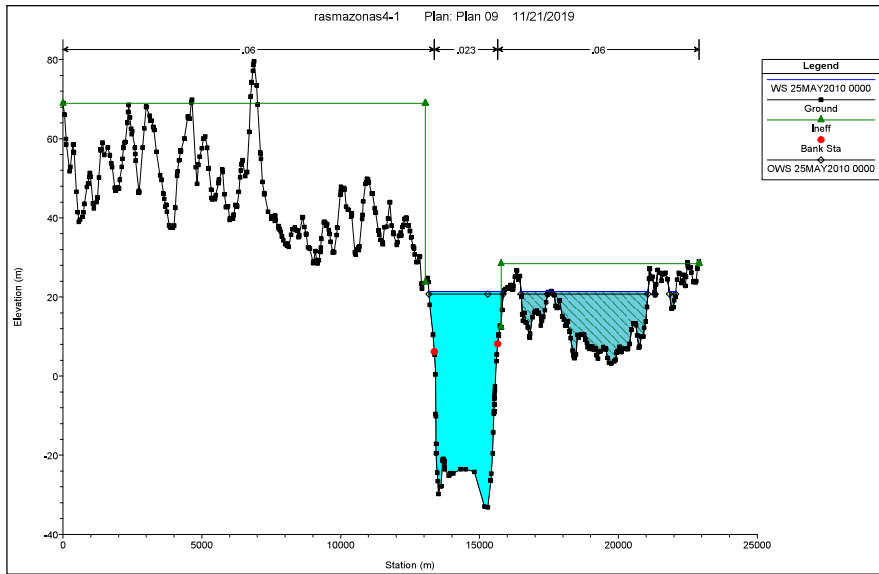
Amazonas – conflu-monoc			Amazonas - monoc-irac			Careiro-Varzea			Negro manaus-conflu			Solimoes irand-care			Solimões care-conflu			RMSE total
PE	CP	PD	PE	CP	PD	PE	CP	PD	PE	CP	PD	PE	CP	PD	PE	CP	PD	
0.04	0.015	0.035	0.07	0.015	0.06	0.035	0.02	0.035	0.06	0.023	0.06	0.06	0.021	0.06	-	0.02	0.039	1.889
0.04	0.015	0.035	0.06	0.015	0.05	0.035	0.02	0.035	0.06	0.023	0.06	0.06	0.021	0.06	-	0.02	0.039	1.889
0.04	0.015	0.035	0.05	0.015	0.04	0.035	0.02	0.035	0.06	0.023	0.06	0.06	0.021	0.06	-	0.02	0.039	1.893
0.04	0.015	0.035	0.05	0.02	0.04	0.035	0.02	0.035	0.06	0.023	0.06	0.06	0.021	0.06	-	0.02	0.039	2.065
0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	0.05	0.02	0.05	2.144
0.035	0.02	0.035	0.06	0.02	0.06	0.035	0.02	0.035	0.06	0.02	0.06	0.06	0.02	0.06	0.039	0.02	0.039	2.154
0.04	0.023	0.04	0.04	0.023	0.04	0.05	0.028	0.05	0.06	0.025	0.06	0.06	0.025	0.06	0.06	0.025	0.06	2.431
0.04	0.023	0.04	0.04	0.023	0.04	0.05	0.028	0.05	0.06	0.025	0.06	0.06	0.03	0.06	0.06	0.03	0.06	2.507
0.04	0.023	0.04	0.04	0.023	0.04	0.05	0.028	0.05	0.07	0.033	0.07	0.06	0.03	0.06	0.06	0.03	0.06	2.510
0.04	0.023	0.04	0.04	0.023	0.04	0.05	0.028	0.05	0.07	0.033	0.07	0.06	0.039	0.06	0.06	0.039	0.06	2.679
0.07	0.023	0.07	0.07	0.023	0.07	0.07	0.035	0.07	0.07	0.033	0.07	0.07	0.039	0.07	0.07	0.039	0.07	2.764
0.06	0.04	0.06	0.06	0.04	0.06	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.025	0.025	0.025	0.02	0.02	0.02	3.051
0.06	0.04	0.06	0.06	0.04	0.06	0.035	0.035	0.035	0.07	0.035	0.07	0.025	0.025	0.025	0.02	0.02	0.02	3.051
0.07	0.04	0.07	0.07	0.04	0.07	0.07	0.035	0.07	0.07	0.035	0.07	0.07	0.025	0.07	0.07	0.02	0.07	3.111
0.07	0.04	0.07	0.07	0.04	0.07	0.07	0.035	0.07	0.07	0.035	0.07	0.07	0.039	0.07	0.07	0.039	0.07	3.392

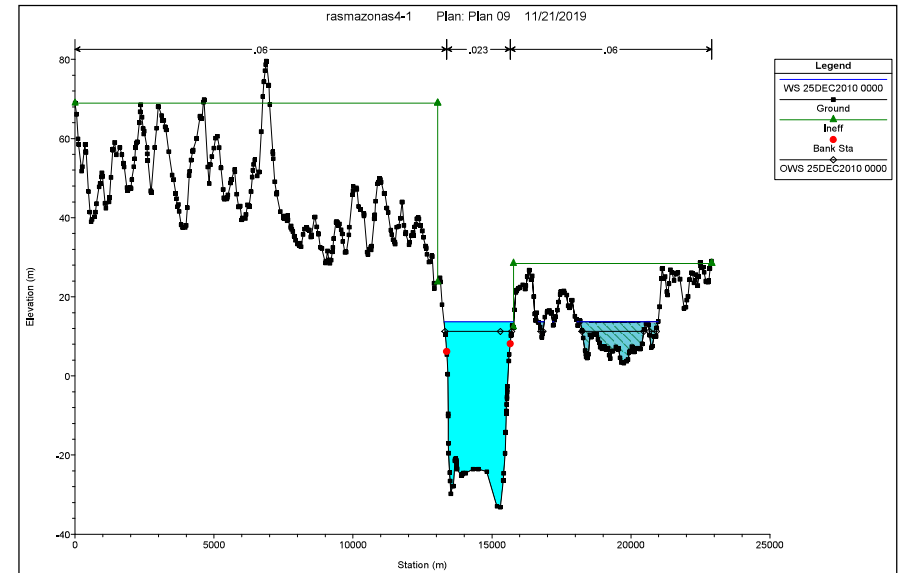
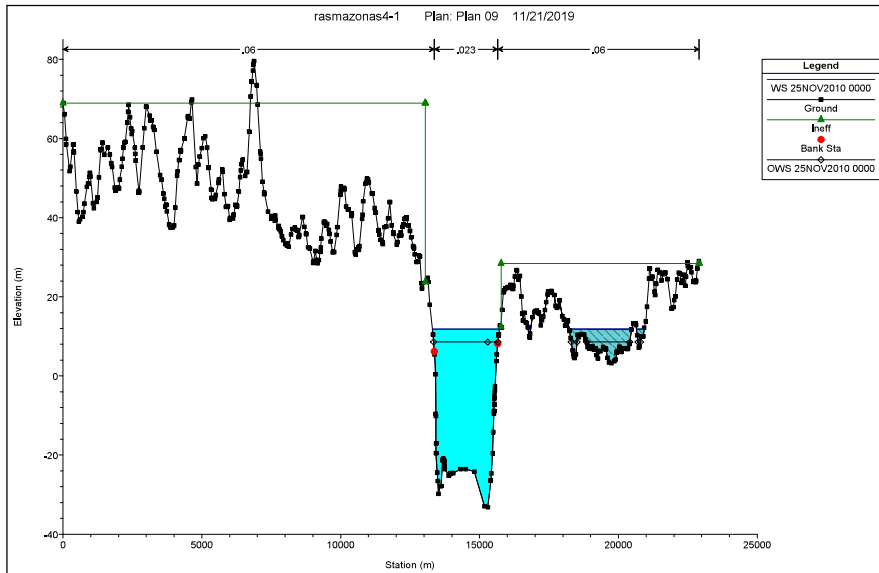
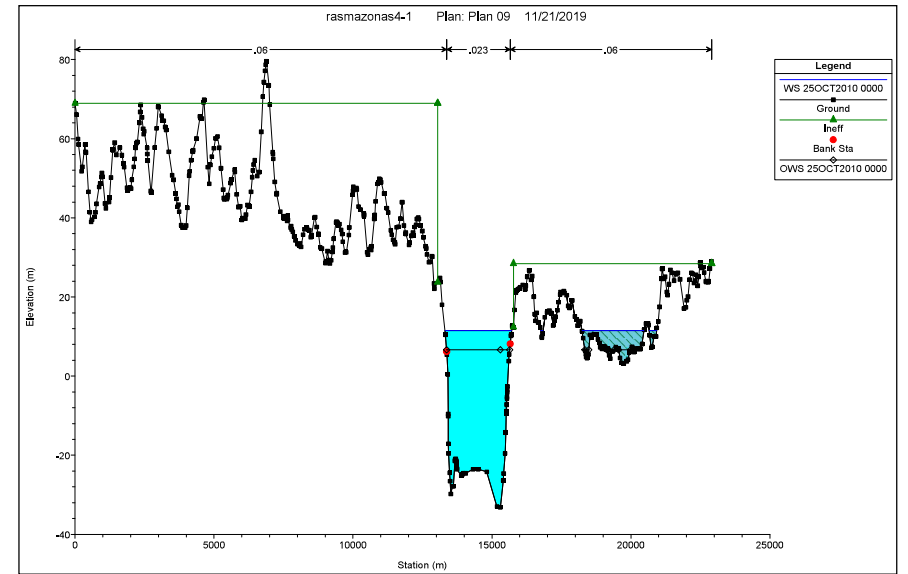
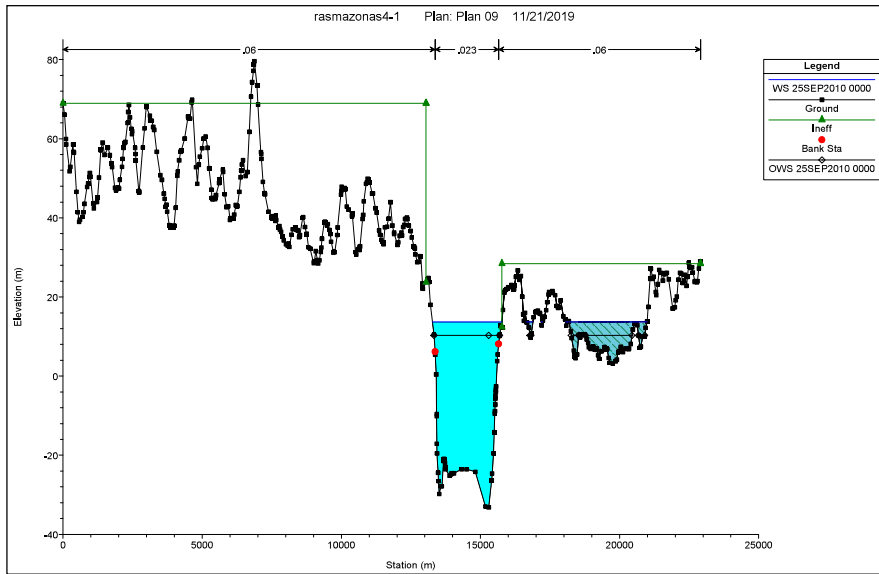
*PE=Planície de inundação esquerda; CP=Canal Principal; PD=Planície de Inundação Direita

**APÊNDICE B – RESULTADO DAS SEÇÕES TRANSVERSAIS DO
MODELO REFERENTES AS ESTAÇÕES DE MANAUS,
JATUARANA, CAREIRO**

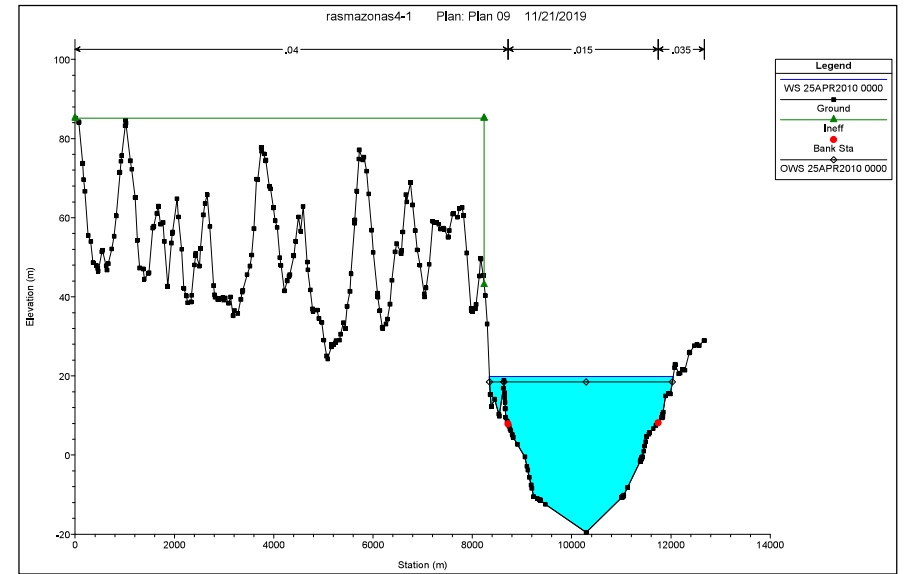
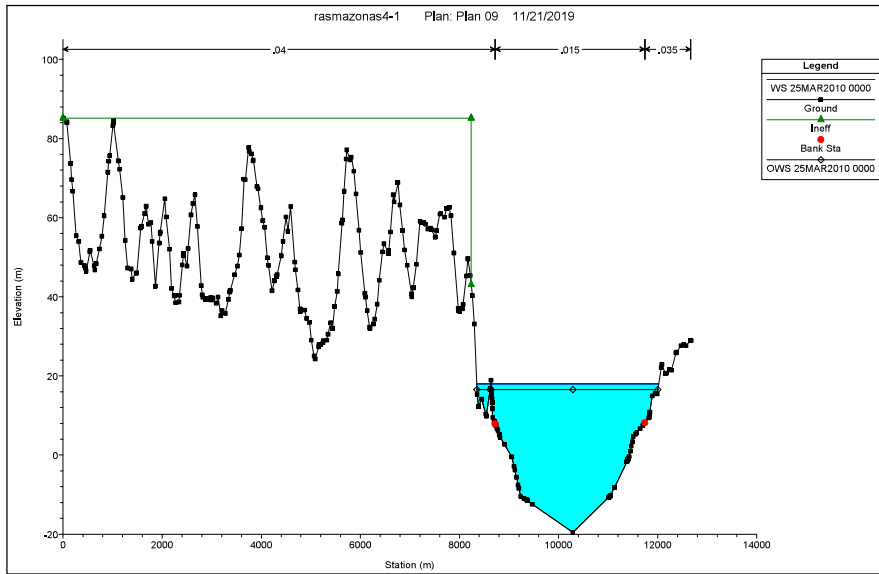
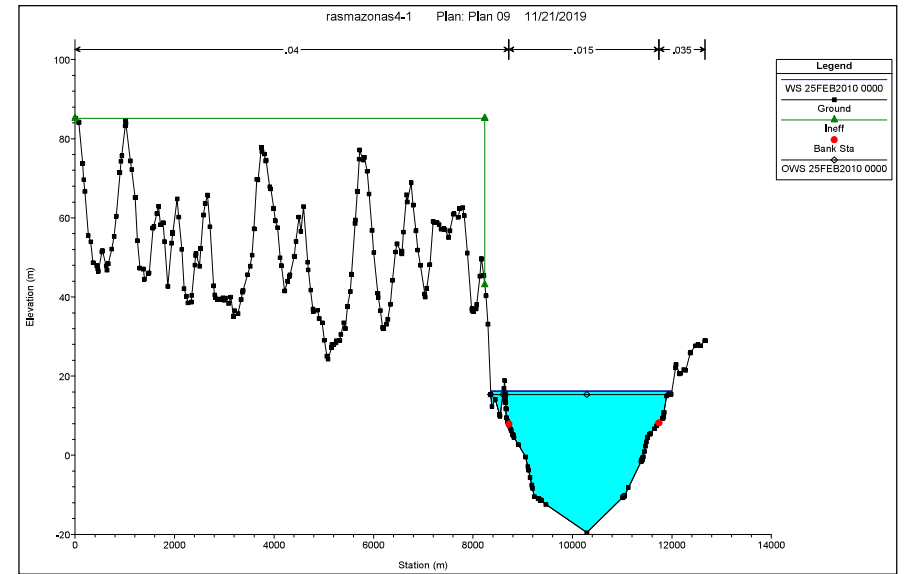
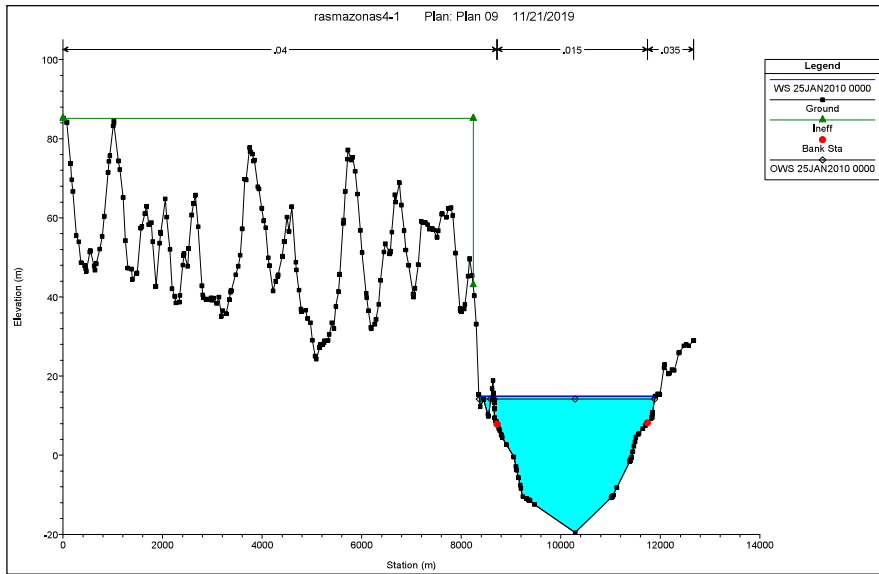
MANAUS

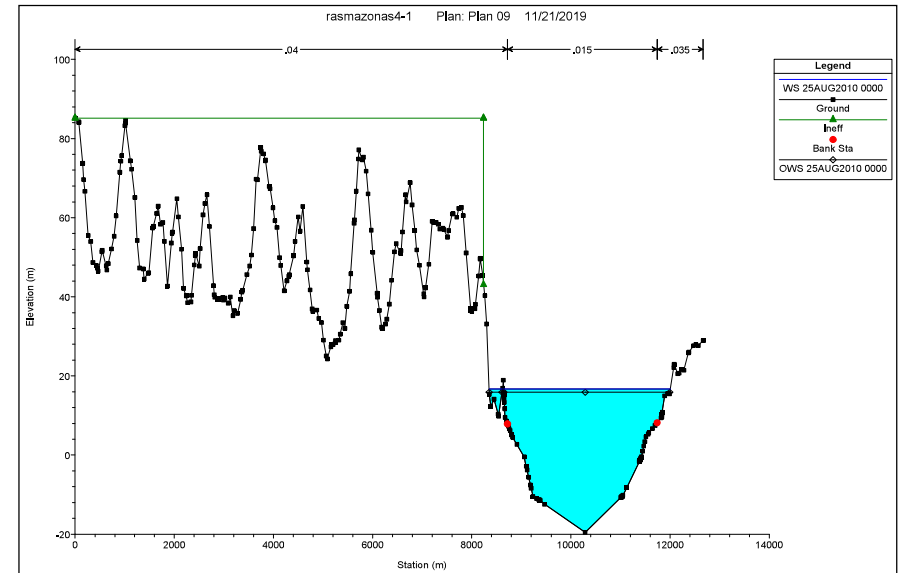
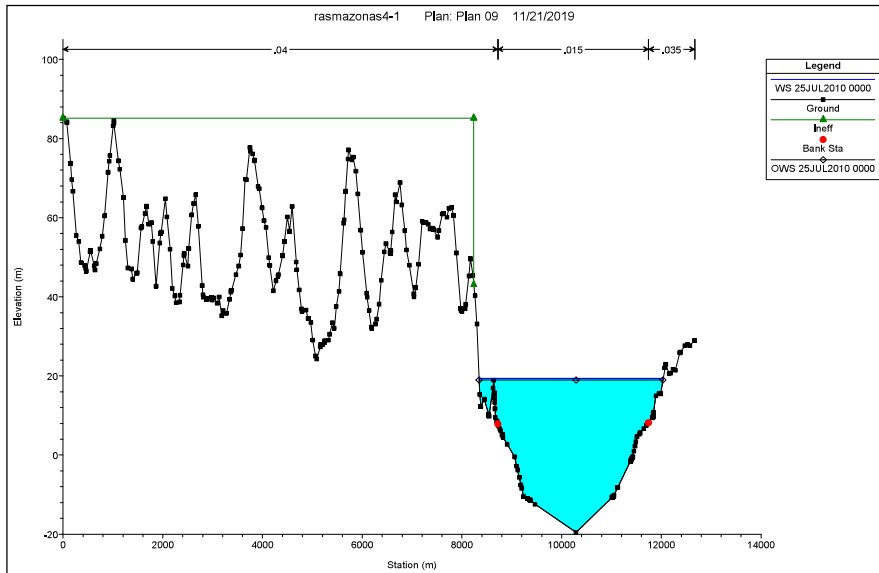
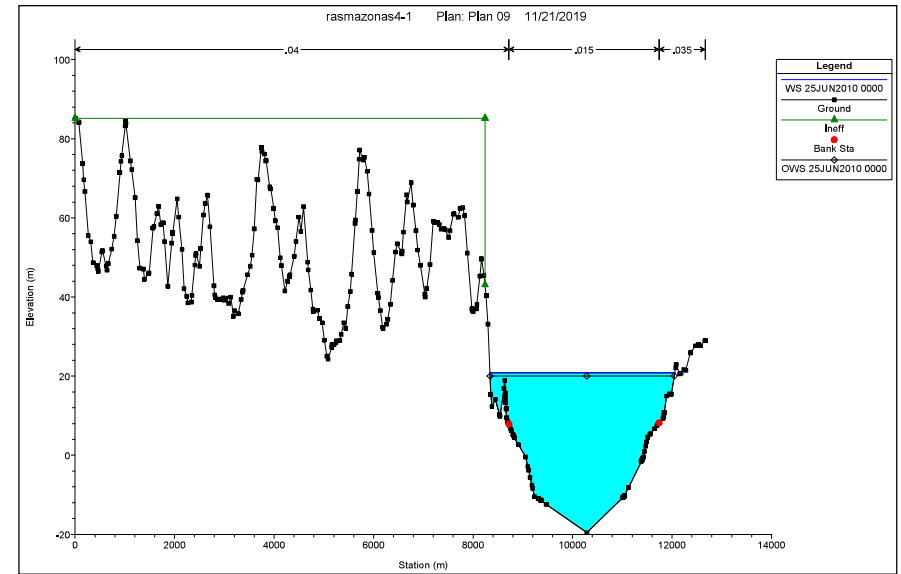
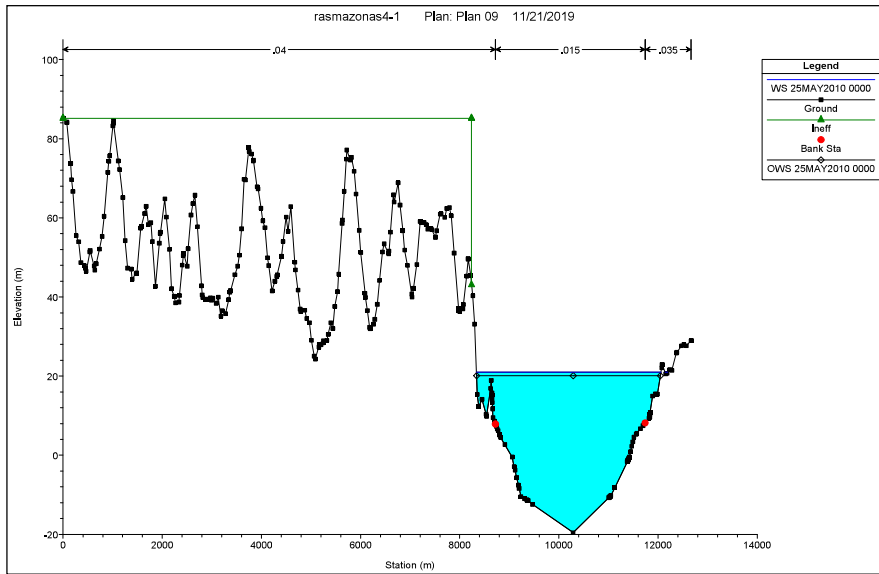


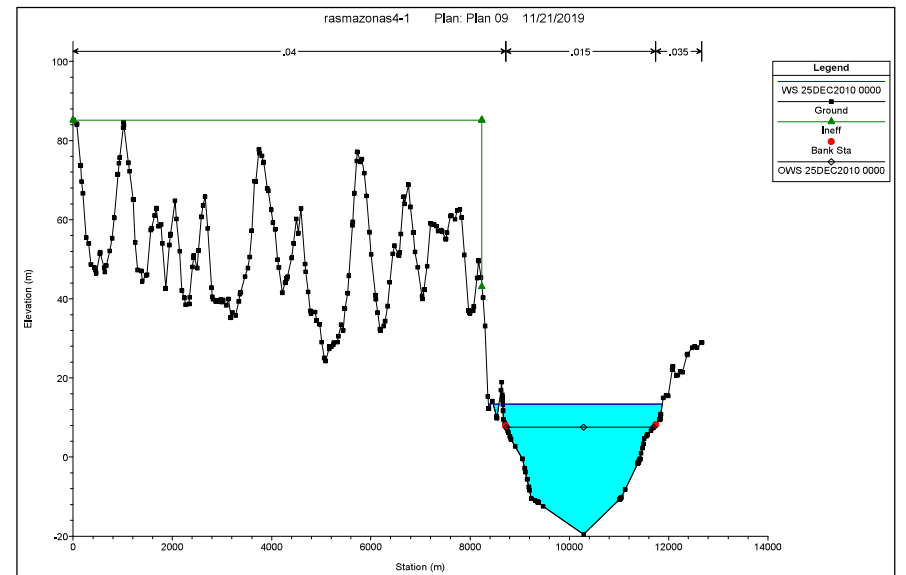
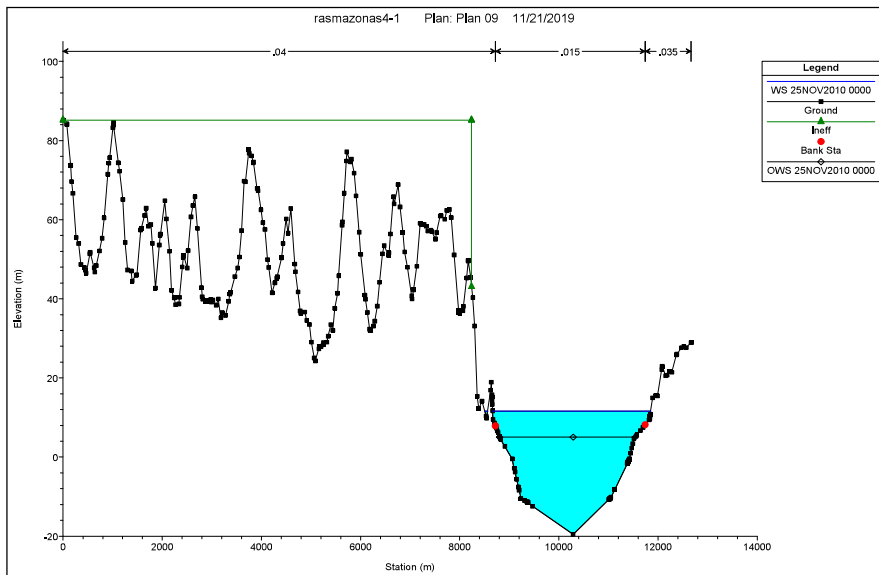
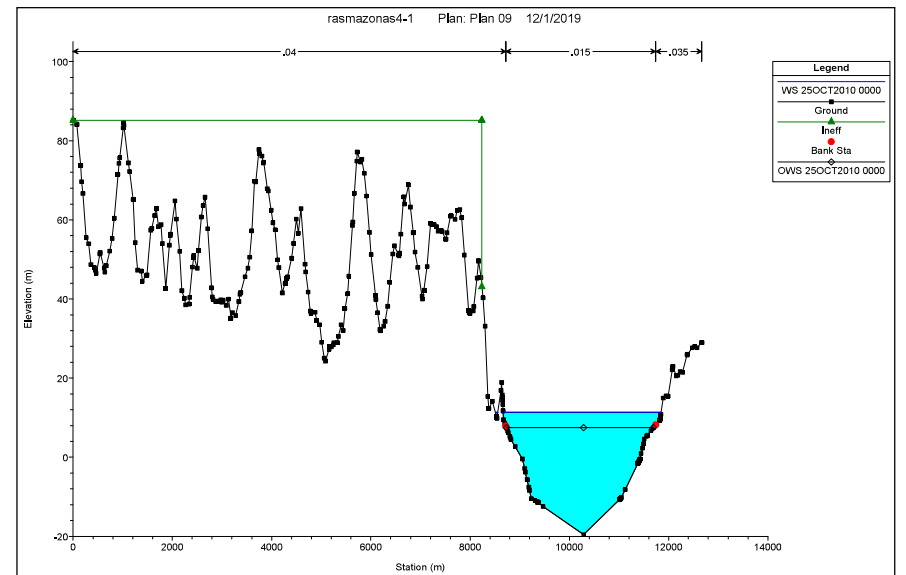
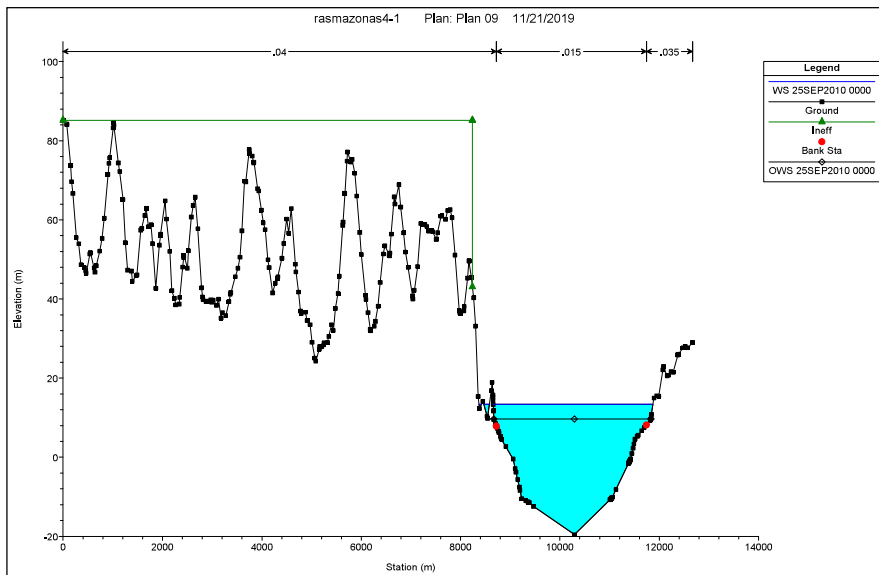




JATUARANA







CAREIRO

