

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

PEDRO HENRIQUE FREITAS PUPIM

**MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE VAZÃO APLICADOS AO RIO TOCANTINS -
COMPARAÇÃO ENTRE HEC-RAS E MUSKINGUM-CUNGE-TODINI**

Ilha Solteira

2018

PEDRO HENRIQUE FREITAS PUPIM

**MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE VAZÃO APLICADOS AO RIO TOCANTINS -
COMPARAÇÃO ENTRE HEC-RAS E MUSKINGUM-CUNGE-TODINI**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – Área de Conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais

Prof. Dr. JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA
Orientador

Ilha Solteira

2018

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Pupim, Pedro Henrique Freitas.
P984m Modelos de propagação de vazão aplicados ao Rio Tocantins - comparação entre hec-ras e muskingum-cunge-todini / Pedro Henrique Freitas Pupim. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
76 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia . Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais , 2017

Orientador: Jefferson Nascimento De Oliveira
Inclui bibliografia

1. Propagação de vazão. 2. Modelo hidrodinâmico. 3. Muskingum-Cunge-Todini.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE VAZÃO APLICADOS AO RIO TOCANTINS - COMPARAÇÃO ENTRE HEC-RAS E MUSKINGUM-CUNGE-TODINI

AUTOR: PEDRO HENRIQUE FREITAS PUPIM

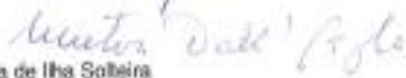
ORIENTADOR: JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA CIVIL, área: RECURSOS HIDRÍCOS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS pela Comissão Examinadora:

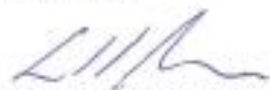
Prof. Dr. JEFFERSON NASCIMENTO DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. MILTON DALL AGLIO SOBRINHO
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ANDRÉ LUIZ LOPES DA SILVEIRA
IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas / Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS



Ilha Solteira, 24 de agosto de 2017

AGRADECIMENTOS

Foi um enorme prazer ter tido a oportunidade de ingressar no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UNESP de Ilha Solteira - SP. Agradeço ao corpo docente pelo conhecimento compartilhado, mas, em especial, aos professores Dr. Milton Dall’Aglío Sobrinho e Dr. Jefferson Nascimento de Oliveira por todo o apoio desprendido ao longo do curso, vocês foram fundamentais nesta conquista.

À EDP, Energias de Portugal – Empresa em que trabalho e que apoiou a todo momento minha participação no programa. Fica aqui meu agradecimento a todos os parceiros de trabalho que de alguma forma colaboraram na consolidação deste programa.

Sobretudo agradeço a minha família, meus pais, Eduardo e Selma, por tudo que já fizeram por mim, sem vocês isto não seria possível.

Agradeço as minhas irmãs Fernanda e Renata por sempre estarem do meu lado e por fim, agradeço a minha esposa Jamily, por todo o companheirismo, paciência e apoio.

A simplicidade é o último grau da sofisticação

Leonardo Da Vinci

RESUMO

O estudo do comportamento de corpos hídricos propicia a obtenção de informações relevantes à bacia hidrográfica e ao meio pertencente a ela, resultando em diversos benefícios, não só do ponto de vista econômico, onde através de operação otimizada de reservatórios de água pode-se obter um maior aproveitamento para geração de energia hidrelétrica, abastecimento, irrigação ou outros fins, mas também subsidia o planejamento e a tomada de decisões com a relação à mitigação de riscos hidrodinâmicos, como o mapeamento de zonas potencialmente inundáveis e a detecção de áreas sujeitas a maiores riscos relacionados às inundações. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo operacional simplificado para propagação de vazões, baseado no modelo Muskingum-Cunge-Todini, e realizado comparações dos resultados com o modelo hidrodinâmico completo HEC-RAS. Os modelos foram aplicados em trechos do rio Tocantins, entre os municípios de Peixe –TO e Bom Jesus do Tocantins–TO. Os resultados obtidos apresentaram similaridade entre o HEC-RAS e o modelo desenvolvido.

Palavras-chave: Propagação de vazão. Modelo hidrodinâmico. Muskingum-Cunge-Todini.

ABSTRACT

The study of the behavior of water bodies supports relevant information to the hydrographic basin and to the means belonging to it, resulting in several benefits. Not only from the economic point of view, where, through an optimized operation of water reservoirs, can be obtained greater use for hydroelectric power generation, water supply, irrigation, or other purposes, but subsidizes planning and decision-making about hydrodynamic risk mitigation, such as mapping potentially floodable areas and the detection of areas subjected to higher risks of floods. In this work a simplified operating model for flow propagation was developed, based on the Muskingum-Cunge-Todini model, and comparisons of the results with the complete hydrodynamic model HEC-RAS were performed. The models were applied in stretches of the Tocantins river, between the municipalities of Peixe – and Bom Jesus do Tocantins-TO. The results obtained showed similarity between HEC-RAS and the developed model.

Keywords: Wave propagation. Flood routing model. Muskingum-Cunge-Todini.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 Número mundial de fatalidades devido às inundações
- Figura 2 Comparativo entre os dados observados e modelos de previsão
- Figura 3 Esquema dos métodos hidráulico (distribuído) e hidrológico (concentrado)
- Figura 4 Representação gráfica do esquema considerado
- Figura 5 Fluxo de seção transversal
- Figura 6 Rochas presentes nas áreas do estudo englobando o município Peixe – TO
- Figura 7 Representação de trecho de estudo
- Figura 8 Rio Tocantins
- Figura 9 Levantamento de obras de arte
- Figura 10 Levantamento batimétrico no Rio Tocantins
- Figura 11 Determinação de Nível D'água
- Figura 12 Levantamento de RN - Referência de Nível
- Figura 13 Esquema numérico de aproximações dQ/dy usando valores tabelados da seção
- Figura 14 Hidrogramas dos modelos gerados para canal constante
- Figura 15 Imagem de Satélite utilizada para inserir a geometria
- Figura 16 Figura inserida no HEC-RAS com o traçado do rio
- Figura 17 Seção tipo
- Figura 18 Desenho da Seção de Jusante
- Figura 19 Rio com as seções interpoladas
- Figura 20 Dados das vazões registrada pela UHE Peixe Angical

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 Verificação do algoritmo com base em resultados de TODINI (2007) para canais prismáticos e características hidráulicas determinadas analiticamente
- Tabela 2 Verificação do cálculo com metodologia válida para seções generalizadas
- Tabela 3 Teste inicial da rotina de interpolação de seções (canais de seção constante)
- Tabela 4 Valores adotados para o trecho

LISTA DE SÍMBOLOS

$A [L^2]$	Área da seção transversal
$Q [L^3/T]$	Vazão de saída em uma seção
$t [T]$	Tempo
$x [L]$	Distância
$g [L/T^2]$	Aceleração da gravidade
$S_0 [L/L]$	Declividade da linha de fundo
$S_f [L/L]$	Declividade da linha de atrito
k e ε	Parâmetros do modelo Muskingun-Cunge
$C1$, $C2$ e $C3$	Parâmetros do modelo Muskingun-Cunge
ds/dt	Variáveis em função
$I [L^3/T]$	Vazão de entrada
$O [L^3/T]$	Vazão de saída
$c [L/T]$	Celeridade
$C:$	Número de Courant
$D:$	Difusão
$ql [m^2/s]$	Vazão da contribuição lateral
$S_0 [m/m]$	Declividade do fundo do rio
$S_f [m/m]$	Declividade da linha de energia
$h [m]$	Profundidade da linha d'água; a altura da seção molhada
ds/dt	Variáveis em função das vazões de entrada e saída
S	Volume armazenado no trecho

LISTA DE ABREVIATURAS

MC	Muskingum-Cunge
MCT	Muskingum-Cunge-Todini
HEC	Hydrologic Engineering Center (Centro Hidrológico de Engenharia)
USACE	U. S. Army Corps of Engineers (Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos)
NA	Nível d'água
RN	Referência de nível
RAS	River Analysis System (Sistema de Análise de Rios)
VBA	Visual Basic for Applications

SUMÁRIO

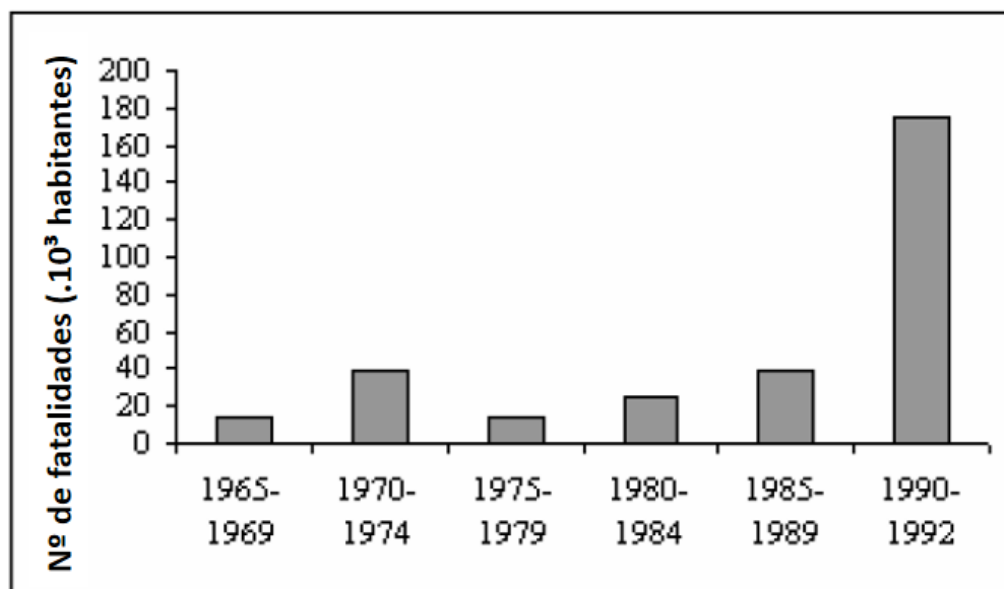
1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	20
2.1	OBJETIVO GERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1	PROPAGAÇÃO DE VAZÕES.....	21
3.1.1	Generalidades	21
3.1.2	Modelos hidrodinâmicos completos.....	24
3.1.2.1	<i>Modelo hidrodinâmico HEC-RAS</i>	25
3.1.3	Modelos simplificados	28
3.1.3.1	<i>Modelos muskingum-cunge</i>	29
3.1.3.2	<i>Modelos muskingum-cunge-todini</i>	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	ÁREA DE ESTUDO	36
4.1.1	Geologia regional	36
4.1.2	Geologia Local	37
4.1.2.1	<i>Complexo goiano</i>	37
4.1.2.2	<i>Geomorfologia</i>	38
4.2	LEVANTAMENTO DE CAMPO	39
4.3	APLICAÇÃO DO MODELO MUSKINGUM-CUNGE-TODINI.....	42
4.4	RESULTADOS	43
4.4.1	Testes de desenvolvimento do programa	43
5	MODELAGEM NO RIO TOCANTINS	48
5.1	APLICAÇÃO DO TRECHO AO HEC-RAS	48
5.2	DETERMINAÇÃO DE HIDROGRAMA	51
5.3	RESULTADOS	52
6	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS	54
7	ANEXOS	58
7.1	ROTINA DE CALCULO.....	58
7.2	HIDROGRAMA	78

1 INTRODUÇÃO

A alteração do estado natural de corpos hídricos através da implantação de barragens em cursos d'água, além de gerar a necessidade da implementação de uma série de procedimentos de operação, exige o desenvolvimento de estudos hidráulicos e hidrológicos complexos para a utilização adequada de reservatórios, estruturas consideradas de grande porte e alto risco devido ao armazenamento e operação de volumes elevados de água.

A vulnerabilidade das sociedades humanas face aos desastres naturais tem aumentado com o tempo. A razão principal para esse fato é certamente a crescente concentração de população e atividades humanas em áreas sujeitas a desastres naturais (NAGHETTINI et al., 2001). O impacto relacionado aos danos decorrentes de inundações vem se tornando um fator preocupante em todo mundo, considerando a tendência de evolução de perdas de vidas humanas devido a tal ocorrência, conforme apontado por Todini (2007) na Figura 1.

Figura 1 – Número mundial de fatalidades devido às inundações



Fonte: Todini (2007).

Dentre os diversos tipos de desastres naturais, as inundações constituem o fenômeno com maior potencial em causar danos, segundo o guia de organização das Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2002). Quando os efeitos das cheias naturais são atenuados ou ampliados em consequência da atuação antrópica, as enchentes são

denominadas naturais modificados. As cheias causadas por rupturas de estruturas de contenção, tais como barragens e diques, são chamadas cheias causadas por intervenção humana (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM, 2004).

Cabe salientar que, além das cheias naturais, as quais ocorrem independentemente da intervenção humana, a utilização de barragens gera o risco de eventuais inundações decorrentes da ruptura dessas estruturas, evento caracterizado como causado por intervenção humana. O comportamento hidrodinâmico gerado à jusante, em decorrência da eventual ruptura de uma barragem, é muito maior em comparação a uma cheia natural.

Através de estudos hidrodinâmicos, é possível realizar simulações de propagação de onda possibilitando levantar zonas potencialmente inundáveis à jusante de reservatórios, o que colabora na adoção de medidas mitigatórias e no planejamento de ações emergenciais.

Ao lidar com os riscos de inundações, tendo clara a percepção da impossibilidade óbvia do controle absoluto de enchentes por meio de estruturas hidráulicas, há muito os hidrólogos têm se dedicado ao desenvolvimento de técnicas e métodos que antecipem a dinâmica que rege o comportamento dos cursos d'água (SILVA, 2006).

Em termos de aplicação, as previsões de cheias podem ser feitas em curto ou longo prazo. Em curto prazo (tempo real), o objetivo é alertar a população ribeirinha, geralmente com antecedência de algumas horas (TUCCI, 2000). Os métodos de antecipação de um evento de cheia em curto prazo (Figura 2) podem ser baseados na propagação da onda de cheia (BOTH et al., 2008), na chuva observada (através de modelos hidrológicos chuva-vazão) (BLOSCHL et al., 2008; RAO et al., 2011; VIOLA et al., 2009) e na previsão da precipitação (modelos chuva-vazão associados a modelos de previsão de tempo) (BAO et al., 2011; HE et al., 2010; SCHAAKE et al., 2007).

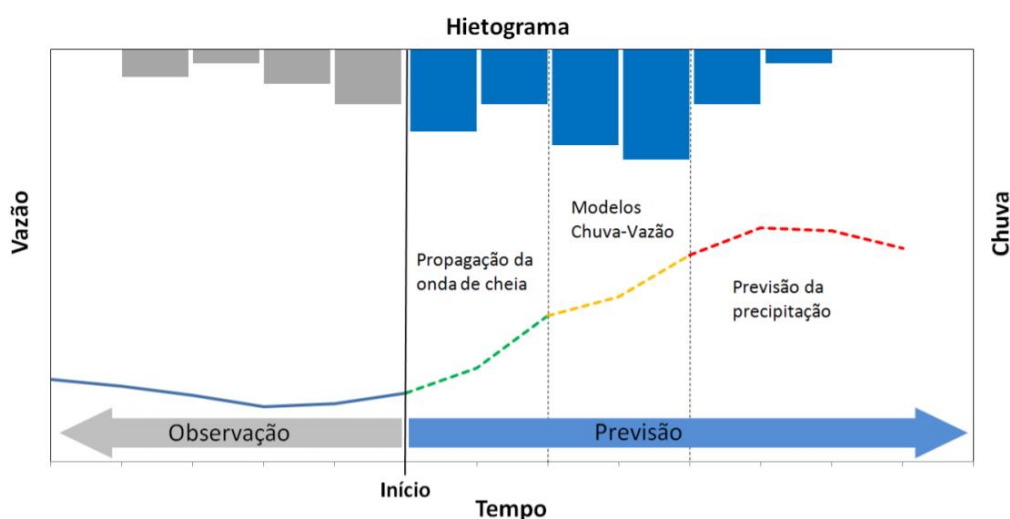
No longo prazo, os objetivos geralmente estão relacionados ao gerenciamento de recursos hídricos (COLLISCHONN et al., 2005) ou a avaliação de impactos das mudanças do clima (MOHOR et al., 2015; SIQUEIRA JÚNIOR et al., 2015). Também, estimativas de longo prazo, quando calculadas a partir de uma série de dados históricos, podem gerar mapas de risco baseados em um conjunto de períodos de retorno (GRACIOSA, 2010).

A escolha dos métodos depende de vários fatores, como: a disponibilidade de dados (dados de séries históricas, de radar, de previsões a partir de modelos numéricos), características físicas da bacia hidrográfica e o objetivo da previsão (previsão de curto

prazo, análise de risco, cenários de mudanças climáticas, mudanças do uso da terra, entre outros) na figura 2 e possível verificar o comportamento dos dados observados em contraponto as dados das previsões. (CASAGRANDE; HOSS, 2010).

Horizontes de previsão de cheias de diferentes métodos em relação a uma determinada data de início da previsão

Figura 2 – Comparativo entre os dados observados e modelos de previsão



Fonte: Casagrande e Hoss (2010).

Os métodos baseados na propagação da onda de cheia geralmente têm resultados mais precisos, porém com antecedência limitada ao tempo de viagem da propagação da onda de cheia no canal, ao passo que os modelos baseados na chuva observada (chuva – vazão), limitam-se ao tempo de resposta da bacia. A utilização da precipitação prevista é uma forma de estender a previsão dos modelos chuva – vazão para além do tempo de resposta da bacia. De forma geral, a previsão de cheias através de modelos chuva – vazão pode ser feita mediante sistemas que combinam modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para simular a propagação de inundações ao longo da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica. Dependendo da complexidade do modelo, estas ferramentas dependem de dados meteorológicos de precipitação, evaporação, temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento; os quais podem ser obtidos através de fontes de informação, tais como de: estações meteorológicas, estações pluviométricas, radares meteorológicos, e, também, a partir de resultados de simulações com modelos atmosféricos (CASAGRANDE, 2015).

Tucci (2005) cita que os modelos hidrológicos são ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica, possibilitando a previsão de condições diferentes das observadas, ou seja, o modelo por

si só não é um objetivo, mas uma ferramenta para atingir um objetivo. A utilização de métodos simplificados, aliados a modelos de chuva-vazão, permitem a realização de previsões hidrológicas de reservatórios, garantindo uma maior eficácia no gerenciamento desse tipo de estrutura, seja para um maior aproveitamento hídrico para a geração de energia elétrica, controle de cheias à jusante, armazenamento de água para consumo humano, industrial ou até mesmo para atividades recreativas.

Este estudo desenvolveu um protótipo baseado no modelo simplificado Muskingum-Cunge-Todini que possibilita a realização de simulações contínuas que apresentam resultados compatíveis com o modelo hidrodinâmico HEC-HAS.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo operacional simplificado para previsão de vazões aplicado ao Rio Tocantins que apresente resultados similares ao modelo HEC-RAS.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um protótipo para aplicação do modelo MCT baseado no algoritmo proposto por Todini;
- Comparar os resultados obtidos no modelo MCT com o modelo hidrodinâmico do software HEC-HAS;
- Verificar a eficiência do modelo quando aplicado às características especiais dos sub trechos do rio Tocantins.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROPAGAÇÃO DE VAZÕES

3.1.1 Generalidades

A análise do comportamento hidrodinâmico de vazões induzidas em cursos d'água é realizada através da aplicação de modelos hidráulicos-hidrológicos utilizando critérios físicos, matemáticos ou empíricos.

O gerenciamento do risco de inundações é um processo fundamentalmente decisório, que requer ferramentas adequadas à tomada de decisões. Uma das principais ferramentas de que os gestores dispõem é a simulação do processo de formação de cheias da bacia hidrográfica e nos canais da macrodrenagem. Isto é feito pro meio de modelos que representam os processos hidrológicos e hidráulicos pelos quais ocorre a formação de cheias (GRACIOSA, 2010).

Ponce (1989) cita que as metodologias de propagação de vazões podem ser classificadas como hidráulicas ou hidrológicas. Os modelos hidráulicos são baseados nos princípios da conservação da massa e da quantidade de movimento e são descritos pelas equações de Saint-Venant. Os modelos hidrológicos, por sua vez, baseiam-se apenas no princípio de conservação da massa. Estes associam à equação da continuidade uma segunda equação, denominada função de armazenamento, que relaciona o armazenamento do trecho de interesse às vazões de sua entrada e saída (CHOW et al., 1988).

O movimento da água pode ser representado matematicamente considerando uma, duas ou três dimensões espaciais. Para a representação do escoamento em rios, cuja dimensão predominante é a longitudinal, a utilização de equações unidimensionais permite descrever grande parte dos sistemas a serem modelados (CHOW, 1988; DA SILVA et al., 2003).

Os modelos hidráulico-hidrológicos, constituídos de abordagens físicas de processos hidrológicos, utilizam-se das equações da conservação da massa e da equação da quantidade de movimento em sua forma completa ou simplificada. Apesar do alto custo para o seu desenvolvimento, os modelos com embasamento físico são considerados mais precisos para a interpretação e análise de particularidades de determinadas regiões, devido ao fato dos dados topográficos e parâmetros hidráulicos serem mais aferidos. Tucci (1998) define modelo hidrológico como uma ferramenta utilizada para representar

os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências. Cadier et al. (1987) cita que modelo hidrológico é a representação de algum objeto ou sistema numa forma ou linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas.

Um aspecto importante em relação ao uso de modelos hidráulicos-hidrológicos é o alcance da modelagem do processo hidrológico. Enquanto os modelos hidrológicos visam fundamentalmente a obtenção do hidrograma de cheia na saída do exutório de uma bacia, os modelos hidráulicos-hidrológicos buscam a compreensão dos processos hidráulicos e hidrológicos que ocorrem no interior da bacia, possibilitando a quantificação de variáveis de importância para a análise e a tomada de decisão (SANTOS, 2009).

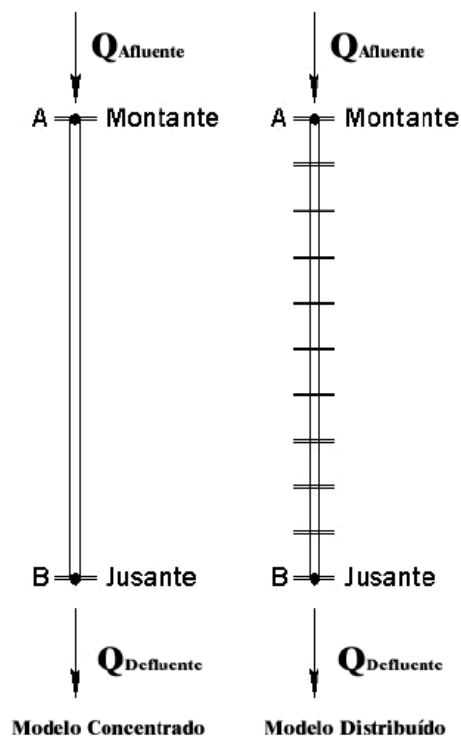
Através da utilização de modelos hidráulico-hidrológicos é possível a realização de simulações de propagação de vazões induzidas para mapeamento de áreas potencialmente inundáveis.

Um método de propagação de vazões é um processo matemático que visa prever a vazão, a velocidade e a altura de uma onda de cheia como função do tempo em um ou mais pontos de um curso d'água (BENTURA, 1996).

Em situações reais, é comum que as condições de escoamento variem com relação ao tempo e ao espaço. As hipóteses matemáticas utilizadas para modelagem do escoamento em rios são formalizadas por meio das equações que tratam do escoamento não-permanente e variado. Essas equações são modelos simplificados de um fenômeno extremamente complexo e procuram incorporar apenas os principais efeitos envolvidos (CUNGE et al., 1980).

Através de estudos hidrológicos é possível a realização de cálculos da vazão em função do tempo em apenas uma posição no espaço, ou seja, no final do trecho analisado. Com a hidráulica, no entanto, é possível a realização de cálculo de diversos subtrechos, aproximados pelas seções de interesse ao longo do curso d'água como função do tempo. Baseado nessa consideração, os métodos hidráulicos são comumente associados na literatura como modelos distribuídos e os hidrológicos como modelos concentrados. A Figura 3 representa graficamente a diferença entre os dois modelos.

Figura 3 – Esquema dos métodos hidráulico (distribuído) e hidrológico (concentrado)



Fonte: Fread (1992).

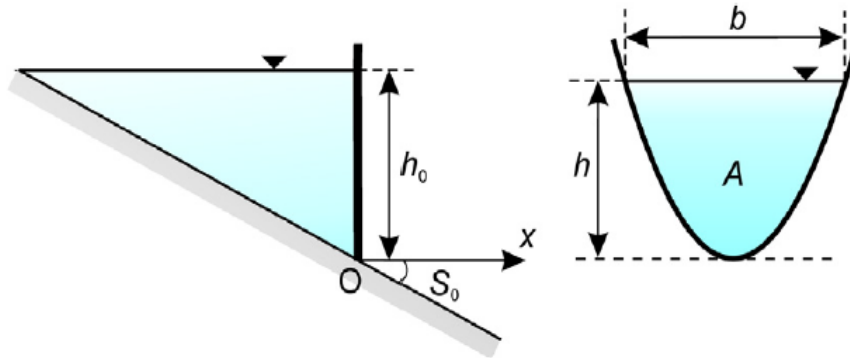
De acordo com Pontes (2011), a propagação de vazão em rios e canais pode ser classificada em duas classes mais importantes: permanente gradualmente variado e não permanente gradualmente variado. No escoamento permanente gradualmente variado, grandezas como velocidade e nível variam entre as seções, mas permanecem invariantes no tempo em uma determinada seção, já através da propagação de vazão não permanente gradualmente variada, as grandezas variam no espaço e no tempo.

Pontes (2011) cita ainda que as situações mais comuns na natureza correspondem ao escoamento não-permanente gradualmente variado e que, neste caso, o escoamento pode ser representado pelo conjunto de equações de Saint-Venant (equação da continuidade e da quantidade de movimento) na forma completa e simplificada.

Modelos hidrodinâmicos completos representam, além da vazão à montante e à jusante, variáveis como o nível d'água e as áreas alagadas. Modelos simplificados são capazes de representar apenas o hidrograma na seção considerada e características como amortecimento e translação (KOUSSIS, 2009).

O método simplificado semianalítico utiliza conceitos da equação de Saint Venant adaptados para seções genéricas. Ele considera um canal prismático e sem atrito ($S_f=0$), conforme figura 4.

Figura 4 – Representação gráfica do esquema considerado



Fonte: Aureli (2014).

Serão apresentados, a seguir, alguns modelos hidrodinâmicos utilizados para a realização de propagação de ondas de inundações tendo como foco o modelo simplificado proposto por Todini.

3.1.2 Modelos hidrodinâmicos completos

A característica de modelos hidrodinâmicos completos unidimensionais é a utilização da equação de Saint-Venant, que consiste na combinação das equações de conservação da massa e da quantidade de movimento para representação de escoamento em rios.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad 3.1$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \cdot A \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = g \cdot A \cdot (S_0 - S_f) \quad 3.2$$

Sendo: $A [m^2]$ a área molhada; $Q [m^3/s]$ a vazão; $t [s]$ o tempo; $x [m]$ a ordenada ao longo do eixo do canal; $ql [m^2/s]$ a vazão da contribuição lateral; $g [m/s^2]$ a aceleração da gravidade; $S_0 [m/m]$ a declividade do fundo do rio; $S_f [m/m]$ a declividade da linha de energia e $h [m]$ a profundidade da linha d'água, dada pela equação abaixo:

$$S_f = \frac{|Q| \cdot Q \cdot n^2}{A^2 \cdot R^{4/3}} \quad 3.3$$

As equações acima são expressas em função da vazão e da profundidade, mas podem também ser expressas em função da velocidade e da profundidade.

As seguintes hipóteses foram consideradas para o desenvolvimento das equações de Saint-Venant (CHOW et al., 1994):

- As variáveis devem ser representadas por funções contínuas;
- Fluido incompressível e homogêneo;
- O escoamento é unidimensional, a velocidade é uniforme e igual à média e o nível de água é horizontal na seção transversal;
- A pressão é hidrostática, ou seja, depende apenas da profundidade;
- É possível utilizar equação para perda de carga, semelhante às usadas em escoamento permanente, como a equação de Manning;
- A declividade do canal é baixa.

É importante citar que, como o conjunto de equações na forma completa é formado por um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, do tipo hiperbólico, não existe uma solução analítica. Sendo assim, é necessária a utilização de técnicas numéricas para a resolução das equações (FAN et al., 2006).

A técnica numérica mais utilizada é o método de diferenças finitas, o qual aproxima as derivadas parciais analíticas para derivadas numéricas.

O programa HEC-RAS foi desenvolvido a partir da resolução desses métodos de resolução de equações diferenciais.

3.1.2.1 *Modelo hidrodinâmico HEC-RAS*

Desenvolvido em 1964 pelo Hydrologic Engineering Center (HEC), área de engenharia do exército norte-americano U. S. Army Corps of Engineers (USACE), o HEC-RAS, software de domínio público, consiste em um modelo hidráulico que possibilita a simulação de propagação de fluxos em canais e rios. Esse modelo permite o desenvolvimento de cálculos de escoamentos não permanentes, utilizando técnicas numéricas baseadas em soluções de equações unidimensionais de Saint Venant.

As diretrizes para a aplicação do modelo são as equações de Saint Venant, especifica o Hydrologic Engineering Center. Operando sobre modelos unidimensionais,

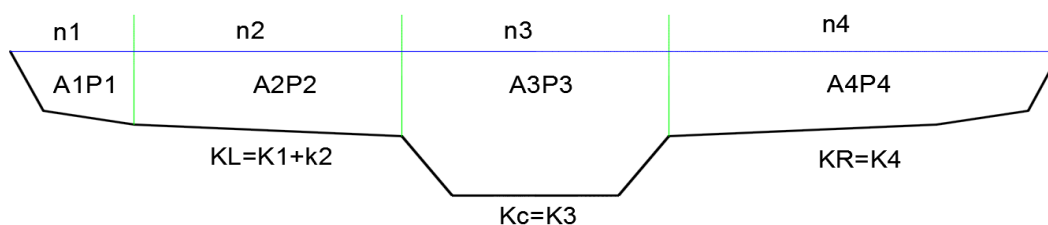
de fundo fixo, sendo capaz de efetuar os cálculos dos perfis de superfície da água em escoamento permanente e não permanente, em canais com superfície livre. Esses perfis podem ser calculados em regimes subcrítico, supercrítico e misto, devendo ocorrer mudanças dos regimes supercríticos para subcrítico reciprocamente (CARNEIRO NETO, 2009).

Carneiro Neto (2009) comenta que o HEC-RAS é um dos softwares mais difundidos atualmente, principalmente pela facilidade de uso com relação aos aspectos interativos e sua entrada de dados otimizada. Ele ainda relaciona as possíveis aplicações para o programa:

- Estudos para determinação da área de inundação dos rios e de proteção contra as enchentes;
- Efeitos dos diversos obstáculos hidráulicos como pontes, bueiros, vertedouros de barragens, diques e outras estruturas hidráulicas;
- Análise das alterações nos perfis da superfície d'água devido às modificações da geometria do canal;
- Múltiplos perfis de superfície d'água (modelagem de cenários para diferentes condições hidráulicas e hidrológicas), erosão em pontes e operação de barragens em sequência.

O modelo emprega valores de entrada para verificação hidráulica da geometria do canal e escoamento d'água. Através desses valores se estabelece uma sequência de seções transversais ao longo do trecho, sendo que para cada seção são identificados e levantados os dados de vazões, subdivididas entre área esquerda, canal principal e área direita como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Fluxo de seção transversal



Fonte: Hec (2010).

Oliveira (2005) relaciona as informações básicas para a aplicação do modelo de simulação hidráulica HEC-RAS:

- Diagramas esquemáticos dos cursos d'água: definem como os diversos cursos de água se conectam, onde cada trecho do rio possui sua identificação. No software a seção transversal é caracterizada por três parâmetros: “River” (rio), “Reach” (trecho) e “River Station” (estação ou posto do rio). As confluências dos rios são consideradas junções;
- Seções transversais – o contorno geométrico para a análise do escoamento em rios naturais é especificado em termos dos perfis transversais das seções e das distâncias medidas entre essas seções. As seções são localizadas em intervalos ao longo do rio para caracterizar sua capacidade de escoamento do rio e suas planícies de inundação adjacentes. Samuels (1989) definiu um espaçamento mínimo entre as seções transversais, em regime não permanente, baseado na profundidade de inundação e no desnível médio:

$$\Delta x \leq \frac{0,15 D}{S} \quad 3.4$$

Onde: Δx é o espaçamento mínimo adotado entre as seções transversais (m); D é o espaçamento entre margens no ponto de maior profundidade do canal (m); S é a declividade do trecho (m/m).

- Comprimento dos trechos dos rios – as distâncias medidas entre as seções transversais se referem aos comprimentos dos trechos dos rios;
- Coeficientes de perda de energia – diferentes tipos de coeficientes são utilizados pelo modelo para avaliar as perdas de energia: coeficiente de Manning para avaliar a perda de atrito; coeficientes de contração e expansão;
- Informações sobre as confluências dos cursos d'água – as confluências de cursos d'água são definidas nos locais onde dois ou mais escoamentos se juntam ou se separam. Os dados das junções consistem de comprimentos dos trechos nas junções e ângulos entre os tributários, quando a equação do momento for selecionada;
- Regime de escoamento – permanente ou não permanente;
- Condições de contorno especificadas nos extremos da bacia hidrográfica – seções situadas mais à montante ou jusante do sistema, para que o modelo dê início aos

cálculos da superfície da linha d'água. O HEC-RAS permite a utilização de quatro tipos de condições de contorno: elevação da superfície da água, profundidade crítica, profundidade normal (neste caso deverá ser informada a declividade média do talvegue no local onde se iniciarão os cálculos) e curva Vazão Total x Elevação da Superfície da Água (Curva-Chave);

- Vazões - as informações sobre vazões são fornecidas ao modelo de montante para jusante, em cada segmento do sistema, para cada perfil que se pretende calcular.

Para cada seção os parâmetros a serem utilizados devem ser definidos de maneira a se obter o formato, relevo e posição relativa ao longo do trecho de escoamento estudado.

As informações de entrada correspondem a:

- Número de seções do trecho estudado;
- Coordenadas de cada ponto da seção, da esquerda para a direita;
- Coordenadas laterais e de elevação dos pontos do terreno que definem o início das áreas secas ou planícies alagáveis;
- Comprimentos entre seções pela planície esquerda, canal central e planície direita de cada seção transversal adjacente (Representação do caminho de vazão média por segmento entre duas seções transversais);
- Coeficientes de rugosidade (Manning);
- Coeficientes de contração e expansão do canal;
- Descrição geométrica de todas estruturas hidráulicas ao longo do trecho em estudo, tais como pontes, canais e açudes.

3.1.3 Modelos simplificados

Os modelos simplificados podem ser classificados em modelos do tipo onda cinemática, difusão e armazenamento.

O modelo de onda cinemática utiliza a equação da continuidade e a equação da quantidade de movimento, sendo desprezados nesta última, os termos de inércia e pressão. Neste modelo os termos de gravidade e de atrito são definidos como iguais, ou seja, a declividade da linha d'água e a declividade do fundo do rio são semelhantes. Ressalta-se que neste modelo não são considerados os efeitos de jusante, tal como oscilações de nível d'água e efeito de remanso, sendo considerado apenas a translação da onda cheia, com o amortecimento definido de forma artificial através de um erro numérico. Os modelos LISFLOOD, TOPKAPI e HEC-1 utilizam este equacionamento.

Modelos do tipo armazenamento utilizam apenas a equação da continuidade, ou seja, é considerada somente a relação entre armazenamento e vazão de saída e entrada do trecho em estudo. O modelo Muskingum e semianalítico se enquadram nessas características.

Modelos de difusão são determinados desconsiderando apenas o termo inércia da equação de quantidade de movimento. Este modelo é considerado mais adequado quando comparado ao de onda cinemática por considerar os efeitos de jusante em rios.

No método Muskingum-Cunge há um termo de difusão numérica que é capaz de representar ou descrever a difusão física ou real. O critério de aplicabilidade do método de Muskingum-Cunge é apresentado por Tucci (2005), que também apresenta formulações lineares e não lineares com planície de inundação para este método (PONTES, 2011).

Uma abordagem alternativa aos conceitos de modelos hidráulicos e hidrológicos pode ser considerada. O modelo denominado Muskingum-Cunge utiliza em sua estrutura conceitos similares aos dos modelos hidrológicos e, no entanto, fornece repostas em diferentes posições no espaço, como um modelo distribuído. Ponce (1989) classifica essa abordagem como modelo híbrido.

3.1.3.1 *Modelos muskingum-cunge*

Desenvolvido por McCarthy em 1939 e aplicado ao Rio Muskingum, o modelo denominado Muskingum é um dos métodos mais utilizados para a simulação de escoamento em rios, conforme citado por Tucci (1986). Este método baseia-se nas equações da continuidade e do armazenamento, e se desenvolve replicando o efeito de vazões de entrada e saída aliado às características geomorfológicas de determinado trecho. Tal modelo é caracterizado como concentrado no espaço.

O modelo original de Muskingum baseia-se na combinação da equação da continuidade (3.5), com uma equação que relaciona o armazenamento em um determinado trecho do rio com as vazões de entrada e saída (3.6)

$$\frac{ds}{dt} = I - O \quad 3.5$$

$$S = k\varepsilon I + k(1 - \varepsilon)O \quad 3.6$$

Sendo: ds/dt as variáveis em função das vazões de entrada e saída; S o volume armazenado no trecho [L^3]; I a vazão de entrada [L^3/T]; O a vazão de saída [L^3/T]; k e ε são parâmetros do modelo.

Por fim, derivando a equação (3.4) em relação ao tempo, substituindo na equação (3.5) e considerando que os parâmetros k e ε são constantes no tempo, obtém-se a equação originalmente proposta por Muskingum:

$$O_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 O_t \quad 3.7$$

Os coeficientes C_1 , C_2 e C_3 são obtidos através das fórmulas:

$$C_1 = \frac{-2 k \varepsilon + \Delta_t}{2 k (1-\varepsilon) + \Delta_t} \quad 3.8$$

$$C_2 = \frac{2 k \varepsilon + \Delta_t}{2 k (1-\varepsilon) + \Delta_t} \quad 3.9$$

$$C_3 = \frac{2 k \varepsilon - \Delta_t}{2 k (1-\varepsilon) + \Delta_t} \quad 3.10$$

Sendo $C_1 + C_2 + C_3 = 1$

Portanto a equação 3.6 com seus parâmetros C_1 , C_2 e C_3 representa o método Muskingum.

Em 1969, Cunge demonstrou que o modelo Muskingum equivalia à solução da onda cinemática associado a um modelo numérico de diferenças finitas, e que a difusão de ondas de cheia resultante da aplicação do modelo é, na realidade, a solução de um erro numérico dependente dos intervalos de discretização utilizado nas derivadas de tempo e espaço. A partir desta verificação, foi proposto por Cunge uma maneira de estimar os valores para os parâmetros k e ε do modelo Muskingum para que a difusão causada pelo erro numérico fosse igualada à difusão da onda cheia. Desta forma, o modelo passou então

a ser conhecido como Muskingum-Cunge linear e se tornou muito utilizado para propagação de vazões quando se dispunha das características físicas do rio.

A utilização deste método é vantajosa, porque possibilita a obtenção de parâmetros para o modelo utilizando poucas informações sobre o rio em estudo.

Ainda em 1969, Cunge concluiu que o método de Muskingum é uma solução da equação hiperbólica da onda cinemática e que a atenuação da onda de cheia que acontece na propagação utilizando esse método ocorre devido a uma difusão numérica relacionada ao esquema de cálculo.

Consideram-se os parâmetros k e ε variáveis no tempo e espaço, de acordo com a vazão propagada, com isso o modelo passou a ser conhecido por Muskingum-Cunge não linear. Ressalta-se que sua utilização se tornou bastante difundida, uma vez que se possuísem as características físicas de determinado rio ou canal em estudo. O esquema numérico baseia-se em diferenças finitas e utiliza malha de quatro pontos (esquema implícito de Preissman). Com as modificações propostas, os parâmetros ficaram conforme a equação abaixo:

$$C1 = \frac{-1+C+D}{1+C+D}; C2 = \frac{1+C-D}{1+C+D}; C3 = \frac{1-C+D}{1+C+D} \quad 3.11$$

Com C e D são expressos por:

$$C = \frac{c\Delta t}{\Delta x}; \quad 3.12$$

$$D = \frac{Q}{B S_0 c \Delta x} \quad 3.13$$

Sendo: C o número de Courant, D a difusão; Δx [L] o comprimento do trecho estudado; Δt [T] a variação do tempo; B a largura da superfície; S_0 a declividade do rio; Q [L³/T] a vazão de referência; e c a celeridade.

Comparando as duas equações propostas para os valores de C1, C2 e C3 finalmente é possível obter as equações para os parâmetros variáveis k e ε de Muskingum:

$$k = \frac{\Delta t}{c} \quad 3.14$$

$$\varepsilon = \frac{1-D}{2} \quad 3.15$$

A utilização deste modelo com os dois parâmetros estimados para cada seção de cálculo Δx , relacionado a cada variação de tempo Δt , é conhecido como modelo MC – Muskingum-Cunge linear.

3.1.3.2 *Modelos muskingum-cunge-todini*

Apesar do modelo MC ter se tornado um dos mais utilizados para realização de propagação de ondas através de métodos simplificados, foi observado por diversos autores que o modelo não preservava integralmente o balanço de massas adotado como conceito inicial para o método, especialmente quando aplicado a declividades suaves.

Foi demonstrado que o modelo Muskingum-Cunge apresentava inconsistências com relação ao equilíbrio de massas, apresentado um erro de 8% a 10% conforme comentado por Todini (2007). Esses erros de conservação de volume podem ser irrelevantes quando se analisa apenas o problema de propagação de uma cheia em um rio, de forma isolada, entretanto podem ser importantes quando o modelo de propagação é parte de um modelo hidrológico mais complexo, que está sendo utilizado para avaliação de impactos de mudanças climáticas ou de uso e ocupação do solo.

Nestes tipos de problemas é desejável que o modelo hidrológico como um todo respeite a conservação de massa, para não prejudicar as conclusões sobre alterações de vazão (PONTES et al., 2011). Além disso, observou-se que os parâmetros estimados por meio da abordagem de Cunge violavam as equações da continuidade e do armazenamento originalmente propostas por Muskingum.

Ao longo dos últimos 20 anos, o problema da conservação de volume do modelo foi analisado por diversos autores, que procuraram resolver a questão de diversas formas (PERUMAL, 1994; CAPPELAERE, 1997; TODINI, 2007; PRICE, 2009). Uma das propostas mais simples e, ao mesmo tempo, mais promissoras, foi desenvolvida por Todini (2007). Este autor percebeu uma inconsistência na forma como eram obtidas as equações para aplicação do modelo Muskingum-Cunge e, a partir destas equações, desenvolveu um novo método com um passo iterativo, que passou a ser chamado método de Muskingum-Cunge-Todini (MCT).

Todini (2007) realizou testes em canais prismáticos com várias formas e características de declividade e demonstrou que o novo método não apresenta erros de conservação de volume e que apresenta resultados semelhantes a um modelo hidrodinâmico completo para uma ampla faixa de condições (PONTES et al., 2011).

Todini realizou a modificação do método estabelecido por Cunge, propondo um algoritmo que preservasse o balanço de massas, respeitando o modelo original Muskingum.

Todini (2007) comenta que (I) a perda do equilíbrio de massa de MC é causada pela utilização de parâmetros variáveis no tempo que violam os parâmetros originalmente propostos no modelo original de Muskingum e que (II) os parâmetros propostos por Cunge violam as duas equações básicas de formulação do modelo, continuidade e armazenamento.

Com isso, Todini realizou as modificações necessárias permitindo que o MC preservasse totalmente o balanço de massa e, ao mesmo tempo, cumprisse com a formulação original do modelo em termos de armazenamento de água.

As propriedades do algoritmo proposto foram avaliadas através da variação da seção transversal, declividade, rugosidade e espaço e compreendem a seguinte a sequência:

- Inicialmente deve-se estimar $\hat{O}_{t+\Delta t}$ para a vazão de saída $O_{t+\Delta t}$ no tempo $t+\Delta t$, calculado como:

$$\hat{O}_{t+\Delta t} = O_t + (I_{t+\Delta t} - I_t) \quad 3.16$$

- Em seguida, calcula-se a vazão de referência nos tempos t e $t+\Delta t$ como:

$$Q_t = \frac{I_t + O_t}{2} \quad 3.17$$

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{I_{t+\Delta t} + \hat{O}_{t+\Delta t}}{2} \quad 3.18$$

- Calculam-se os níveis de água de referência:

O método utilizado para o cálculo dos níveis de referência pode ser derivado por meio de uma abordagem de Newton-Raphson a partir das seguintes equações implícitas:

$$Y_t = Y \{Q_t, n, S_0\} \quad 3.19$$

$$Y_{t+\Delta t} = Y \{Q_{t+\Delta t}, n, S_0\} \quad 3.20$$

- Calcula-se a celeridade:

$$C_t = C \{Q_t, Y_t, n, S_0\}$$

3.21

$$C_{t+\Delta t} = C \{Q_{t+\Delta t}, Y_{t+\Delta t}, n, S_0\} \quad 3.22$$

No cálculo da celeridade para uma seção retangular é utilizado a equação:

$$C = \frac{5}{3} \frac{\sqrt{S_0} A(y)^{2/3}}{n P(y)^{2/3}} \left(1 - \frac{4}{5} \frac{A(y)}{B(y)P(y)S_0} \right) \quad 3.23$$

onde: $A = B_0 y$; $P = B_0 + 2y$

- Calcula-se o fator de correção β :

$$\beta_t = \frac{C_t A_t}{Q_t} \quad 3.24$$

$$\beta_{t+\Delta t} = \frac{C_{t+\Delta t} A_{t+\Delta t}}{Q_{t+\Delta t}} \quad 3.25$$

- Calcula-se o número de Courant corrigido:

$$C_t^* = \frac{C_t \Delta t}{\beta_t \Delta x} \quad 3.26$$

$$C_{t+\Delta t}^* = \frac{C_{t+\Delta t} \Delta t}{\beta_{t+\Delta t} \Delta x} \quad 3.27$$

- Calcula-se o número de Reynolds da célula:

$$D_t^* = \frac{Q_t}{\beta_t B S_0 C_t \Delta x} \quad 3.28$$

$$D_{t+\Delta t}^* = \frac{Q_{t+\Delta t}}{\beta_{t+\Delta t} B S_0 C_{t+\Delta t} \Delta x} \quad 3.29$$

- Finalmente os parâmetros MCT são expressos como:

$$C_1 = \frac{-1 + C_t^* + D_t^*}{1 + C_{t+\Delta t}^* D_{t+\Delta t}^*} \quad 3.30$$

$$C_2 = \frac{1 + C_t^* - D_t^*}{1 + C_{t+\Delta t}^* + D_{t+\Delta t}^*} \cdot \frac{C_{t+\Delta t}^*}{C_{t+\Delta t}^*} \quad 3.31$$

$$C_3 = \frac{1 - C_t^* + D_t^*}{1 + C_{t+\Delta t}^* + D_{t+\Delta t}^*} \cdot \frac{C_{t+\Delta t}^*}{C_t^*} \quad 3.32$$

- Com os valores obtidos determina-se a vazão para o trecho $t + \Delta t$ através da fórmula:

$$\hat{O}_{t+\Delta t} = C_1 I_{t+\Delta t} + C_2 I_t + C_3 O_t \quad 3.33$$

Repete-se o procedimento duas vezes de maneira a eliminar a influência da estimativa inicial $\hat{O}_{t+\Delta t}$.

Consideradas as modificações realizadas acima, o modelo passa a ser chamado Muskingum-Cunge-Todini.

O desenvolvimento do modelo aplicado aplicação do algoritmo proposto por Todini para e realizado trechos do rio Tocantins e seus resultados comparados com o modelo hidrodinâmico HEC-HAS.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

Os locais de estudo escolhidos foram trechos do rio Tocantins situados à jusante das usinas UHE Peixe Angical, localizada no município de Peixe-TO e da UHE Luís Eduardo Magalhães, localizada entre os municípios de Miracema do Tocantins-TO e Lajeado-TO. A escolha desta área de estudo, além de servir para verificação da eficiência do modelo, tem por objetivo fornecer subsídios para auxílio na análise do comportamento hidrodinâmico e previsão de vazões à jusante destas duas usinas. Os dados históricos disponíveis dos empreendimentos serão adaptados e utilizados para a entrada de dados nos modelos.

A Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia, bacia na qual o rio Tocantins situa-se, possui uma área de 918.822 km² (11% do território nacional) e abrange os estados de Goiás (21%), Tocantins (30%), Pará (30%), Maranhão (4%), Mato Grosso (15%) e o Distrito Federal (0,1%). Sua configuração é alinhada, com sentido Sul-Norte, seguindo a direção predominante dos cursos d'água principais, os rios Tocantins e Araguaia, que se unem na parte setentrional da região, a partir de onde é denominado rio Tocantins, que segue até desaguar na Baía da Ilha de Marajó.

O rio Tocantins é formado a partir dos rios das Almas, Maranhão e Tocantinzinho, percorre uma extensão de 2.400 km até desaguar na baía de Marajó, próxima a Belém do Pará, drenando uma área de 421.250 km². Seus principais afluentes dentro do território goiano são: rio das Almas, rio Cana Brava, rio dos Patos, rio Santa Clara, rio Tocantinzinho e rio Uru.

4.1.1 Geologia regional

A região onde o estudo está inserido é marcada pela presença de uma importante faixa de dobramentos proterozóicos, envolvendo um conjunto de unidades estratigráficas de evolução policíclica e assentadas sobre embasamento Arqueano/Paleoproterozóico, essencialmente granito-gnáissico, com sequências vulcano-sedimentares do tipo Grupo Araí associadas à metamorfitos de maior grau (tipo Grupo Serra da Mesa) (SCHOBENHAUS et al., 1984). Está inserida no contexto geotectônico da Província Estrutural do Tocantins, mais precisamente à Faixa de Dobramentos Brasília de idade Neoproterozóica.

Em síntese regional, a Faixa Brasília, segundo Fuck (1994), é apresentada como um extenso sistema de dobramentos neoproterozóicos, edificada na margem oeste do Cráton do São Francisco e compartimentada em zona cratônica, zona externa e zona interna. A zona cratônica é constituída por exposições do embasamento cobertas pelas sequências sedimentares proterozóicas dos grupos Paranoá e Bambuí. A zona externa é representada pelas sequências metassedimentares dos grupos Paranoá e Canastra, além de porções de seu embasamento. A zona interna compreende os micaxistos e as rochas do Grupo Serra da Mesa e áreas de embasamento expostas entre os xistos. Essa Faixa se estende na direção N-S, situando-se tectonicamente entre o Cráton de São Francisco, a leste, a Faixa-Paraguaia-Araguaia, a noroeste, e a Bacia do Paraná, a sudeste (MARINI et al., 1984).

4.1.2 Geologia local

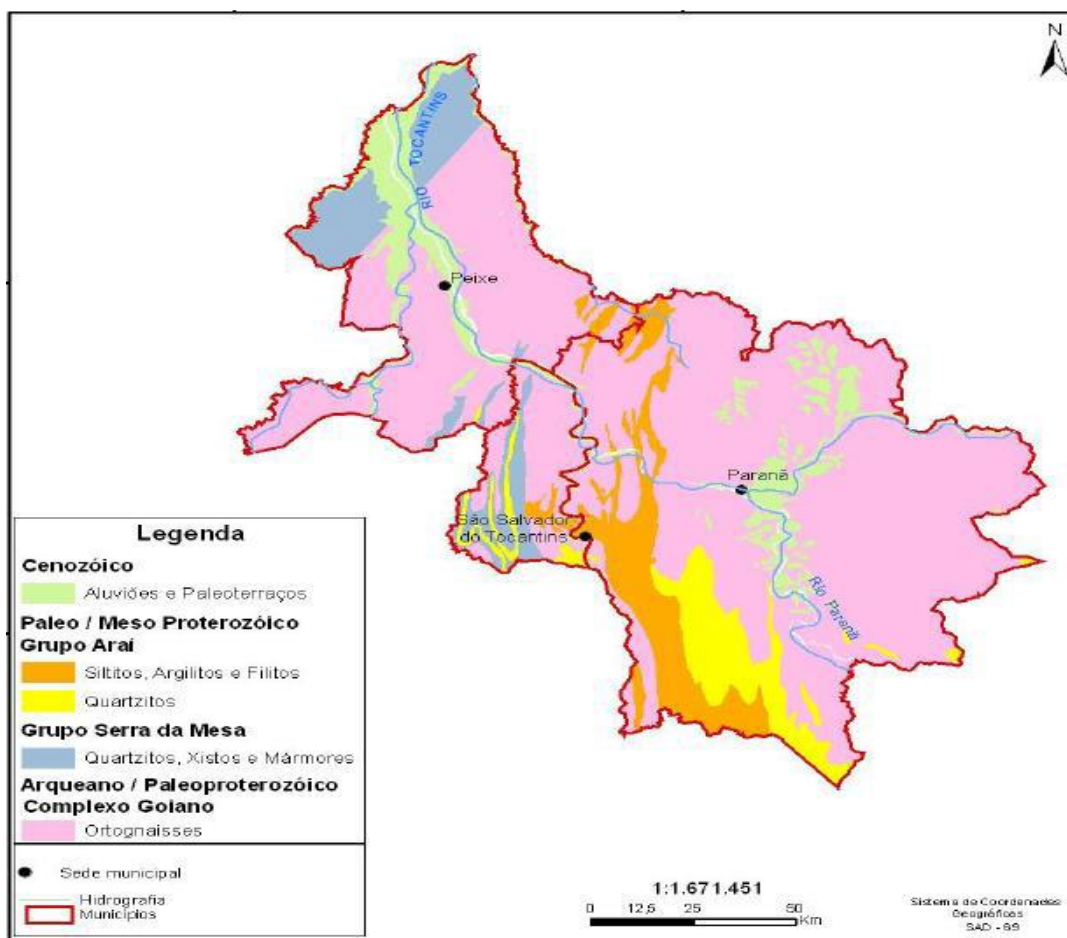
Localmente a geologia é representada pelas unidades do Complexo Goiano e rochas supracrustais dobradas dos grupos Araí e Serra da Mesa, além de sedimentos aluviais recentes. A Figura 6 mostra a distribuição das rochas que compõem estas unidades.

4.1.2.1 *Complexo goiano*

O embasamento cristalino é constituído por rochas granito-gnáissico-migmatíticas do Complexo Goiano, que alojam corpos granodioríticos da unidade Granodiorito São José e corpos graníticos do tipo Serra Branca.

O Complexo Goiano é descrito na literatura como sendo constituído por biotita-gnaisses, gnaisses quinzigíticos, gnaisses básicos, contendo hornblenda e piroxênio, além de diferentes tipos de migmatitos. Ocorrem também leptinitos, biotitaxistos, mármore, quartzitos metaconglomerados e anfibólitos. São comuns núcleos graníticos ou granitóides, com orientação incipiente dos cristais e, às vezes, cataclasados.

Figura 6 – Rochas presentes nas áreas do estudo englobando o município Peixe – TO



Fonte: Souza (2008).

4.1.2.2 *Geomorfologia*

Segundo observado no Mapa de Unidades de Relevo do Brasil do IBGE (1993), a região estudada situa-se no contato entre dois compartimentos geomorfológicos marcadamente distintos, Depressão do Alto Tocantins-Araguaia e no Planalto Central, em terrenos esculpidos sobre rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas.

A depressão do Tocantins apresenta relevo de dissecação suave, predominando as formas tabulares esculpidas sobre os gnaisses do Complexo Goiano. Em direção ao sul essa depressão, apresenta um contato interdigitado com o Planalto Central que se caracteriza por uma intrincada variedade de formas de relevo, por uma diversidade muito grande de rochas metamorfizadas, por uma estrutura complicada por falhamentos, intrusões, metamorfismos, e por grande variação de cotas altimétricas.

Do ponto de vista local, na área de estudo predominam as colinas pequenas e médias, morrotes e morros residuais, além dos Terraços e Planícies de inundação.

4.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO

A região de estudo tem seu início à jusante da Usina Hidrelétrica Peixe Angical, município de Peixe-TO, e seu término à jusante do município de Ipueiras-TO, totalizando uma extensão aproximada de 140 quilômetros pelo eixo do rio.

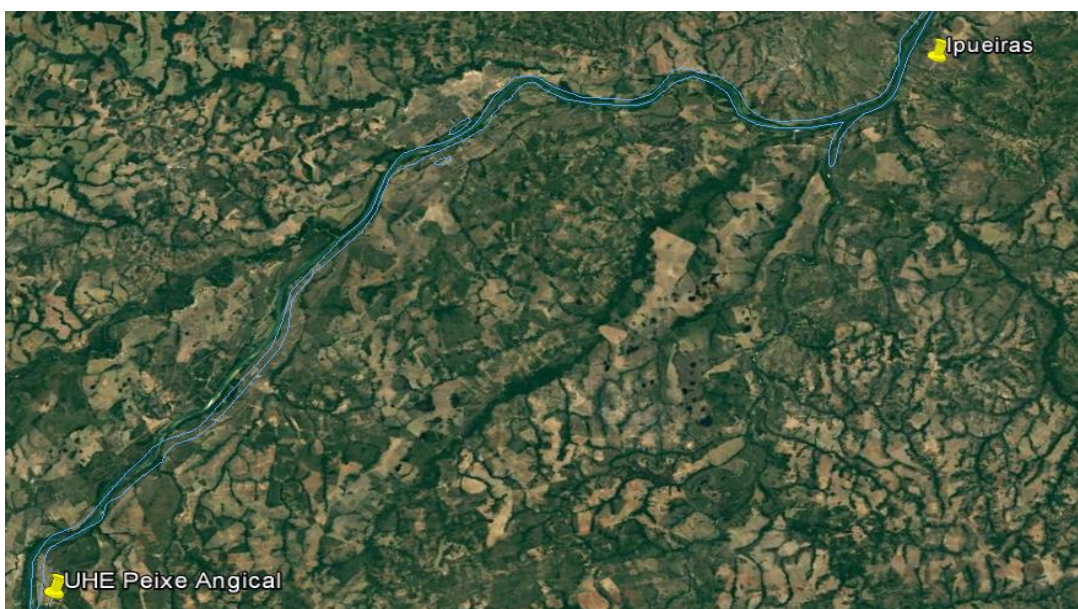
O levantamento topobatimétrico foi realizado ao longo de todo este trecho tendo por objetivo representar da melhor maneira a sua calha.

O trabalho consistiu na realização de levantamento de seções topobatimétricas transversais, detecção de características relevantes ao longo do trecho, tal como obras de arte, deflexões, estrangulamentos, além da realização de amarração topográfica e aferição altimétrica do modelo, as figuras de 7 a 12 mostram a área de estudo e pontos onde foram realizados alguns dos levantamentos de dados utilizados para a execução do modelo.

Para a realização da atividade foram utilizados os equipamentos abaixo:

- Ecobatímetro tipo monofeixe;
- DGPS, Atlas link GNSS, com correção por banda L1/L2;
- Notebook;
- Embarcação;
- Materiais e equipamentos de apoio.

Figura 7 – Representação de trecho de estudo



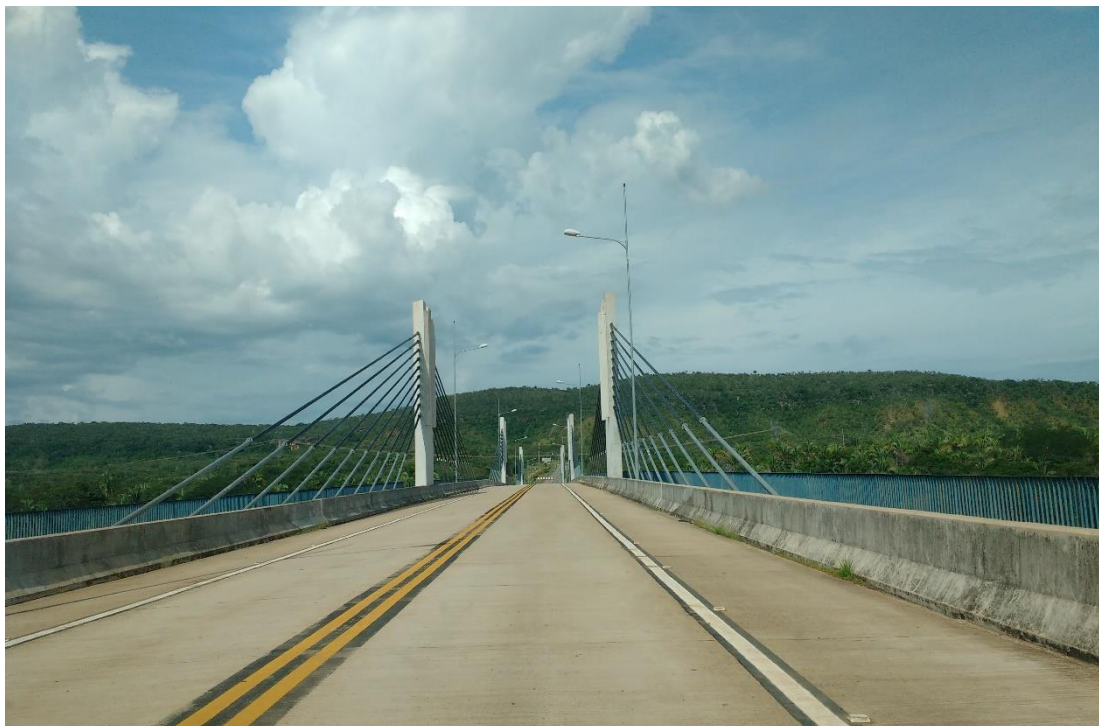
Fonte: Google Earth (2018).

Figura 8 – Rio Tocantins



Fonte: Próprio autor

Figura 9 – Levantamento de obras de arte



Fonte: Próprio autor

Figura 10 – Levantamento batimétrico no Rio Tocantins



Fonte: Próprio autor

Figura 11 – Determinação de Nível D'água



Fonte: Próprio autor

Figura 12 – Levantamento de RN - Referência de Nível



Fonte: Próprio autor

4.3 APLICAÇÃO DO MODELO MUSKINGUM-CUNGE-TODINI

Baseado no algoritmo proposto por Todini, foi desenvolvida uma programação para aplicação do método MCT.

O desenvolvimento da programação foi gradual, a partir de um protótipo implementado totalmente na planilha de cálculo. A planilha foi útil para testar os procedimentos básicos do algoritmo descrito por Todini (2007), bem como facilitou a análise das variáveis envolvidas no cálculo.

Na fase seguinte os procedimentos começaram a ser automatizados com uso de macros interagindo com os dados da planilha, como, por exemplo, na iteração para obtenção numérica da profundidade, realizada com a função “Atingir Meta”, integrante do pacote de análise numérica do Excel.

Após esta etapa os passos de cálculo começaram a ser transferidos da planilha para o contexto do programa em Excel-VBA, terminando no contexto em que a planilha só é usada para fornecer os dados de entrada e receber a resposta; todo o algoritmo é executado pelo programa. Na etapa final atingida neste trabalho, o protótipo pode ser

facilmente migrado para um aplicativo independente da planilha, o que permitirá ser empregado num contexto operacional.

A programação completa desenvolvida para a obtenção do modelo encontra-se no anexo 7.1.

4.4 RESULTADOS

4.4.1 Testes de desenvolvimento do programa

O funcionamento do programa foi testado utilizando como base para referência os mesmos canais prismáticos e os resultados apresentados por Todini (2007). Estes resultados foram os mesmos empregados por Pontes (2011).

Os testes de funcionamento do programa seguiram também a metodologia incremental. Inicialmente a funcionalidade básica do método foi testada com a formulação analítica das variáveis hidráulicas da seção, conforme apresentada por Todini em seu trabalho original. Esta solução é válida apenas para canais prismáticos, de forma triangular, retangular ou trapezoidal.

Foi utilizado um hidrograma sintético para a entrada (NERC, 1975, apud TODINI, 2007) definido por:

$$Q_{(t)} = Q_{base} + (Q_{pico} - Q_{base}) \left[\frac{t}{Tp} \exp \left(1 - \frac{t}{Tp} \right) \right]^{\beta} \quad 4.1$$

Os parâmetros adotados foram: $Q_{base} = 100\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{pico} = 900\text{m}^3/\text{s}$, $Tp = 24\text{h}$ e $\beta = 16$.

Os testes foram realizados com a propagação em canais com 100km de extensão, usando $\Delta x = 2000\text{m}$, $\Delta t = 1800\text{s}$, declividade de fundo $S_0 = 0,0025$ e rugosidade de Manning $n = 0,035$. A declividade das margens do canal triangular e do trapezoidal foi de 1V:5H. O canal retangular possui base $B_0 = 50\text{m}$ e o trapezoidal $B_0 = 15\text{m}$.

Os testes iniciais demonstraram que o programa funcionava como esperado, reproduzindo os valores de referência. Por simplicidade, apresenta-se a Tabela 1, com a comparação dos resultados da vazão de pico apenas para o caso padrão apresentado por Todini.

Tabela 1 – Verificação do algoritmo com base em resultados de TODINI (2007) para canais prismáticos e características hidráulicas determinadas analiticamente

Vazões Máximas - Características hidráulicas determinadas analiticamente									
	Seção Triangular			Seção Retangular			Seção Trapezoidal		
	Qpico	Diferença	Erro %	Qpico	Diferença	Erro %	Qpico	Diferença	Erro %
Este Trabalho	641,158	-0,012	-0,002	669,529	-0,001	0,000	643,739	-0,001	0,000
Referência	641,170			669,530			643,740		

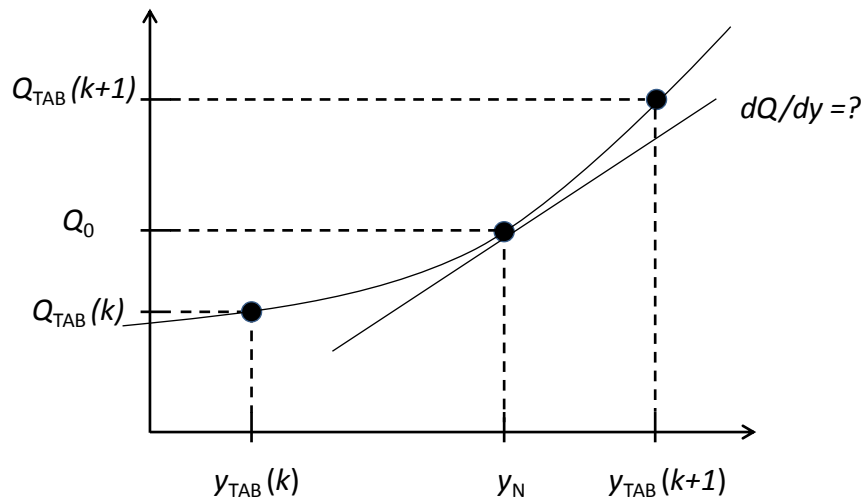
Fonte: Próprio autor

Verifica-se a ocorrência de um pequeno erro numérico, que pode ter surgido tanto da metodologia empregada na solução por tentativas da equação de Manning, quanto do erro máximo admitido na solução iterativa. O programa utiliza o método da bisecção, com erro máximo de 0,001 na profundidade. Todini empregou método de Newton-Raphson, não informando o erro máximo admitido nas iterações. Para fins práticos, a diferença foi considerada desprezível.

A partir da reprodução com sucesso dos casos da literatura, passou-se ao teste da generalização desenvolvida neste trabalho, que admite canais de forma qualquer. Com isso a equação de Manning não pode se basear em fórmulas analíticas para as características hidráulicas da seção (Área, Perímetro Molhado e Largura da Seção). Como já citado na apresentação do programa desenvolvido, esta generalização foi obtida com a construção de tabelas com as características hidráulicas calculadas numericamente, em função da profundidade.

Uma questão prática que surge quando se utiliza este método com seções generalizadas é a definição do esquema numérico a ser utilizado para a aproximação da derivada dQ/dy empregada na fórmula da celeridade. No desenvolvimento do programa foram testadas 4 alternativas de aproximação numérica, que podem ser apresentadas a partir da Figura 13.

Figura 13 – Esquema numérico de aproximações dQ/dy usando valores tabelados da seção



Fonte: Todini (2007)

- Aproximação 1: esquema progressivo

$$\frac{dQ}{dy} \cong \frac{Q_{TAB}(k+1) - Q_0}{y_{TAB}(k+1) - y_N} \quad 4.2$$

- Aproximação 2: esquema centrado

$$\frac{dQ}{dy} \cong \frac{1}{2} \left(\frac{Q_{TAB}(k+1) - Q_0}{y_{TAB}(k+1) - y_N} + \frac{Q_0 - Q_{TAB}(k)}{y_N - y_{TAB}(k)} \right) \quad 4.3$$

- Aproximação 3: usa apenas os dados do intervalo da tabela em que está a vazão

$$\frac{dQ}{dy} \cong \frac{Q_{TAB}(k+1) - Q_{TAB}(k)}{y_{TAB}(k+1) - y_{TAB}(k)} \quad 4.4$$

- Aproximação 4: esquema regressivo

$$\frac{dQ}{dy} \cong \frac{Q_0 - Q_{TAB}(k)}{y_N - y_{TAB}(k)} \quad 4.5$$

A funcionalidade do cálculo para seções generalizadas foi testada com os mesmos canais prismáticos, buscando reproduzir os resultados de referência obtidos com a determinação analítica dos parâmetros hidráulicos da seção. Os resultados para a vazão de pico são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Verificação do cálculo com metodologia válida para seções generalizadas

Vazões Máximas - Características hidráulicas determinadas com tabelas									
	Seção Triangular			Seção Retangular			Seção Trapezoidal		
	Qpico	Diferença	Erro %	Qpico	Diferença	Erro %	Qpico	Diferença	Erro %
Aproximação 1	641,379	0,209	0,033	669,611	0,081	0,012	643,927	0,187	0,029
Aproximação 2	640,776	-0,394	-0,061	669,374	-0,156	-0,023	643,738	-0,002	0,000
Aproximação 3	641,177	0,007	0,001	669,544	0,014	0,002	643,738	-0,002	0,000
Aproximação 4	640,224	-0,946	-0,148	669,120	-0,410	-0,061	642,726	-1,014	-0,157
Referência	641,170			669,530			643,740		

Fonte: Próprio autor

A última etapa do desenvolvimento do programa incluiu a capacidade para tratar de canais com seções interpoladas, emulando características presentes em programas como o HEC-RAS. Para essa etapa não são disponíveis dados da literatura. Assim, o primeiro teste da funcionalidade foi realizado com os mesmos canais de seção constante, sendo a seção de jusante criada a cada passo ΔX . Como a seção final é a mesma da inicial, cada etapa da interpolação linear das seções deve gerar sempre o mesmo resultado, o que permitirá deduzir pelo correto funcionamento da rotina de interpolação. O teste foi realizado com a aproximação 3.

Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Teste inicial da rotina de interpolação de seções (canais de seção constante)

Vazões Máximas - Características Hidráulicas Tabeladas de Seções Interpoladas									
	Seção Triangular			Seção Retangular			Seção Trapezoidal		
	Qpico	Diferença	Erro %	Qpico	Diferença	Erro %	Qpico	Diferença	Erro %
Seção Constante	641,177	0,007	0,001	669,544	0,014	0,002	643,738	-0,002	0,000
Seção Interpolada	641,177	0,007	0,001	669,544	0,014	0,002	643,738	-0,002	0,000
Referência	641,170			669,530			643,740		

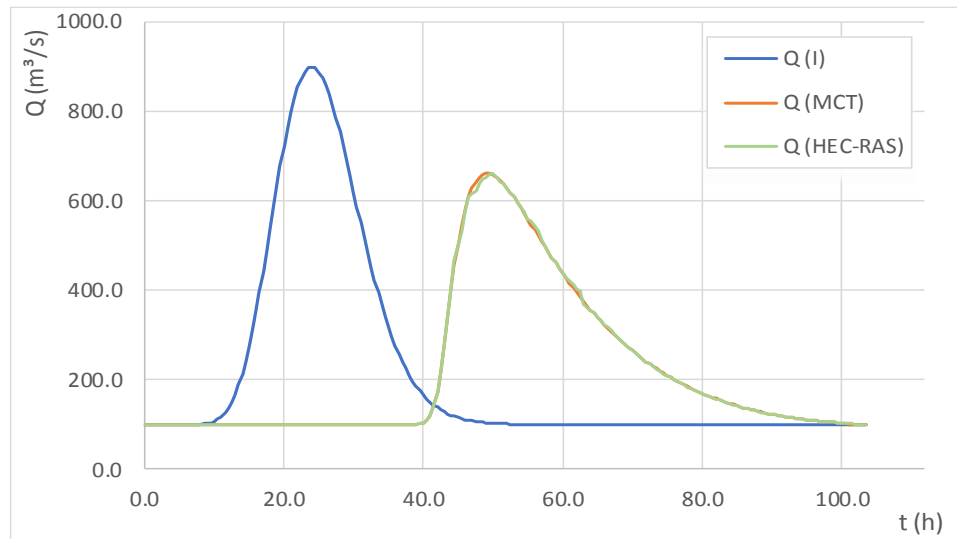
Fonte: Próprio autor

Verifica-se que a rotina de interpolação não modificou o resultado, o que indica o correto funcionamento da codificação modificada para incluir a possibilidade de interpolação: foram criadas duas seções para armazenamento das seções inicial e final do canal e rotinas para substituição, a cada trecho, da seção de jusante pela seção interpolada.

O teste final de funcionamento do programa envolveu a comparação dos resultados do MCT com o HEC-RAS em dois canais prismáticos. Na figura 14 é apresentado os resultados dos modelos para canal constante.

O primeiro, com seção trapezoidal constante, com base $B_0 = 400\text{m}$ e inclinação das margens de 1V:4H.

Figura 14 – Hidrogramas dos modelos gerados para canal constante



Fonte: Próprio do autor

O segundo canal possui seção inicial igual ao primeiro, e com seção final com base $B_0 = 800$. Os demais dados foram: comprimento dos canais $L = 100\text{km}$, $S_0 = 0,00025\text{m/m}$, $\Delta x = 2000\text{m}$ e $\Delta t = 1800\text{s}$.

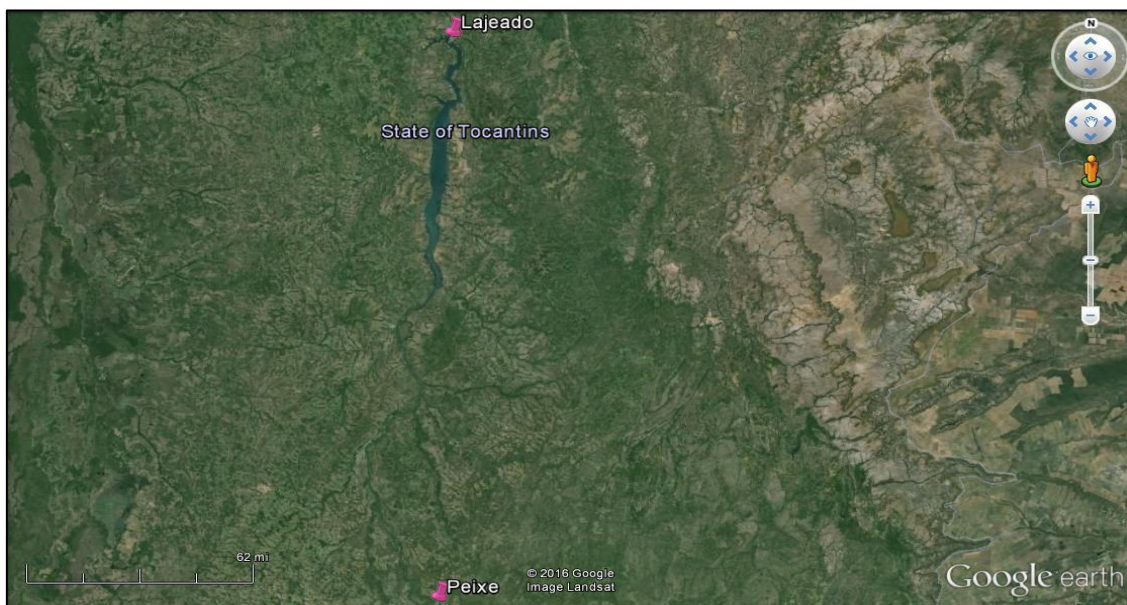
5 MODELAGEM NO RIO TOCANTINS

5.1 APLICAÇÃO DO TRECHO AO HEC-RAS

A realização da modelagem hidráulica no rio Tocantins ocorreu em um trecho de aproximadamente 130 km, partindo imediatamente à jusante da UHE Peixe Angical, até o município de Ipueiras/TO, sendo possível observar a região de interesse na figura 15. A geometria é primeira parte a ser inserida no HEC-RAS, esta etapa que determinará as áreas de inundação e as áreas de armazenamento e amortecimento da onda de cheia. Neste primeiro momento, foi considerado o rio como um trecho retilíneo. Para isto, foi inserida uma foto captada do Google Earth no HEC-RAS e traçado o rio ligando os pontos.

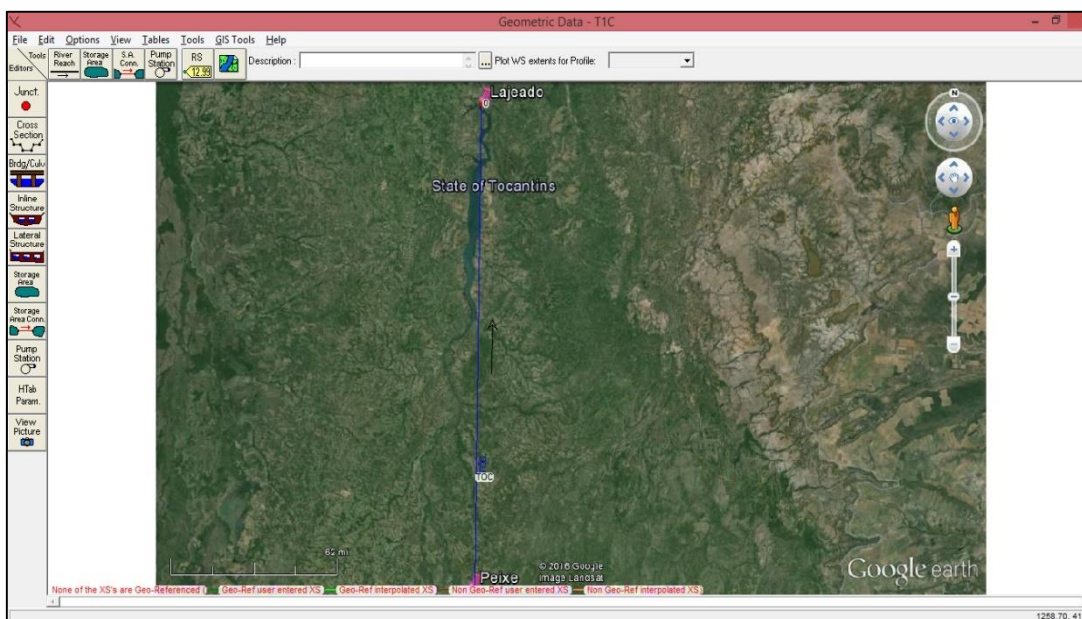
A figura 16 mostra a imagem inserida dentro da geometria do HEC-RAS. A linha azul representa o rio Tocantins. O trecho possui aproximadamente 130 km de extensão em linha reta.

Figura 15 – Imagem de Satélite utilizada para inserir a geometria



Fonte: Google Earth (2016).

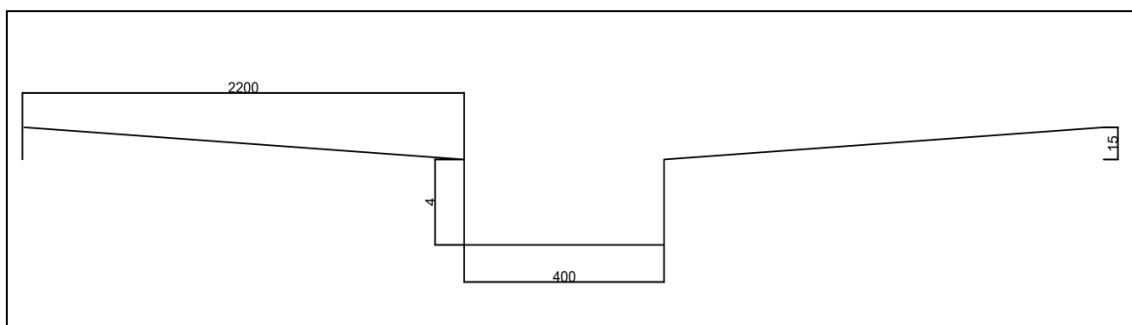
Figura 16 – Figura inserida no HEC-RAS com o traçado do rio



Fonte: Google Earth (2016).

O próximo passo foi inserir as seções do rio. Para simplificar foram analisadas as seções topobatimétricas do Modelo Digital de Elevação (MDE) e definida uma seção tipo apresentada na Figura 17 com os valores em metros.

Figura 17 – Seção tipo



Fonte: Próprio autor

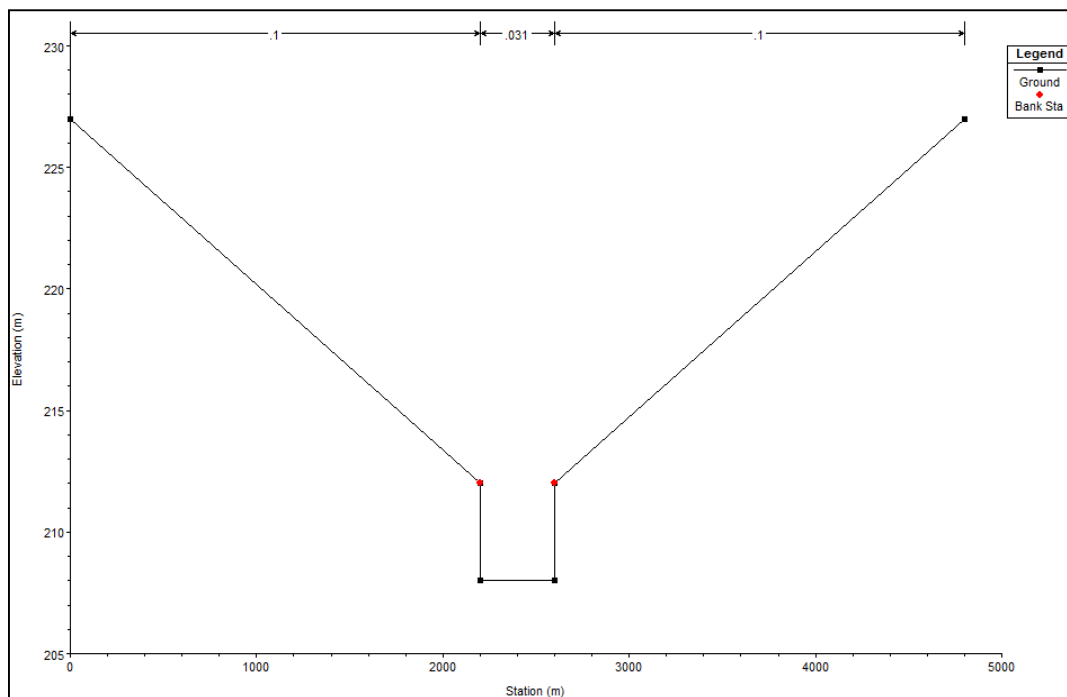
Foi necessário identificar a declividade do trecho para poder inserir as seções, para isso, foi utilizado dados de Nível de Água (NA) tanto do MDE quanto de informações técnicas da UHE Peixe Angical. Assim, os NA's foram adotados como:

- NA montante = 235,00 m (Primeira seção à montante do trecho estudado);
- NA jusante = 212,00 m (Ponto mais à jusante do trecho considerado).

A declividade média foi encontrada como 0,0821 m/km.

Os pontos vermelhos da figura 18 são as Bank Stations, ela delimita os coeficientes de Manning utilizados em cada uma da subdivisão do canal (margem direita, margem esquerda e canal).

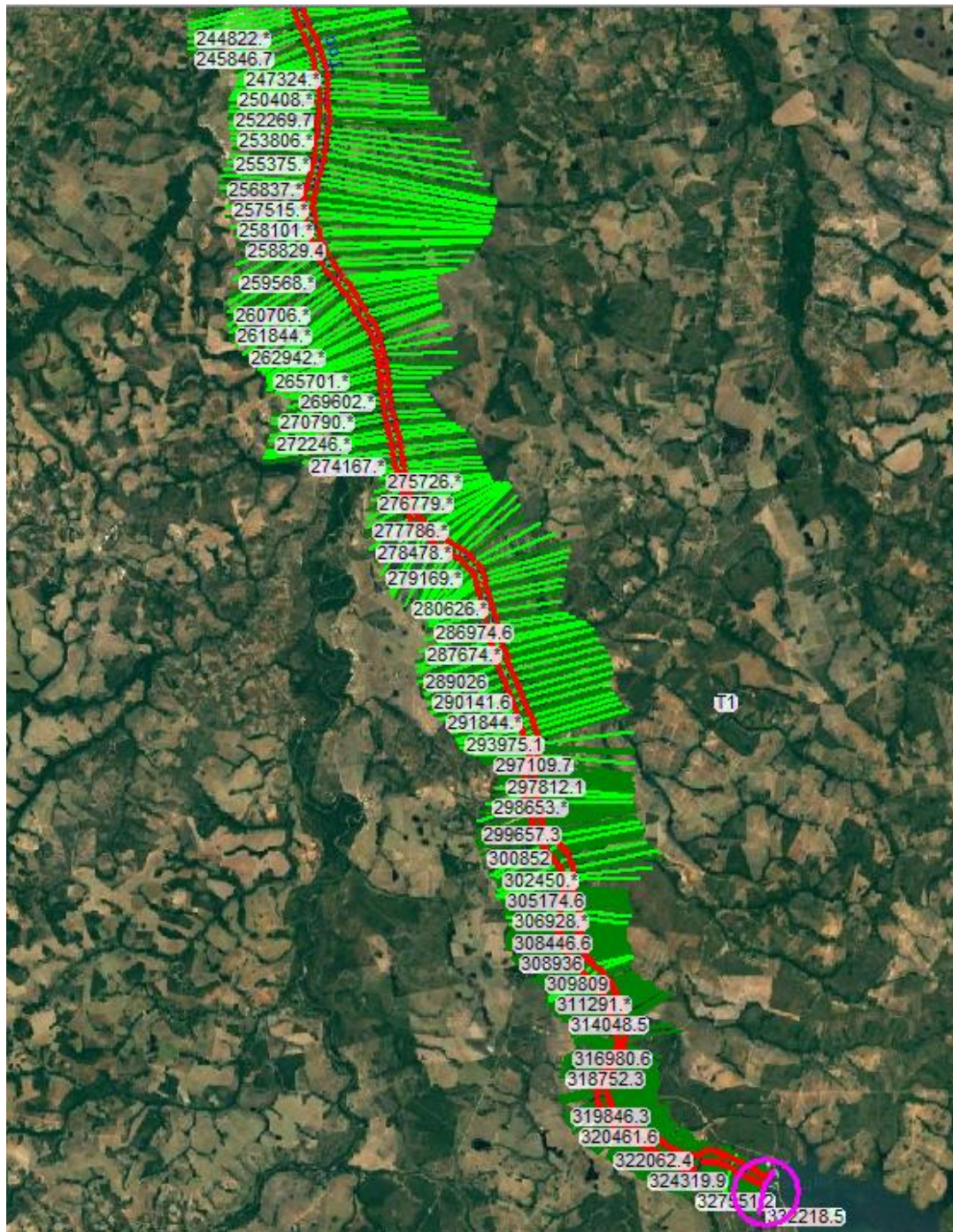
Figura 18 – Desenho da Seção de Jusante



Fonte: Hec-Ras (2010).

Com as seções de montante e jusante inseridas realizou-se a interpolação das seções entre elas. Considerando que o modelo é simplificado, a declividade foi adaptada como constante entre as seções, não acarretando em erros em relação a geometria a interpolação direta entre elas. Foram inseridas seções a cada 5000. A figura 19 mostra o rio com as seções interpoladas.

Figura 19 – Rio com as seções interpoladas



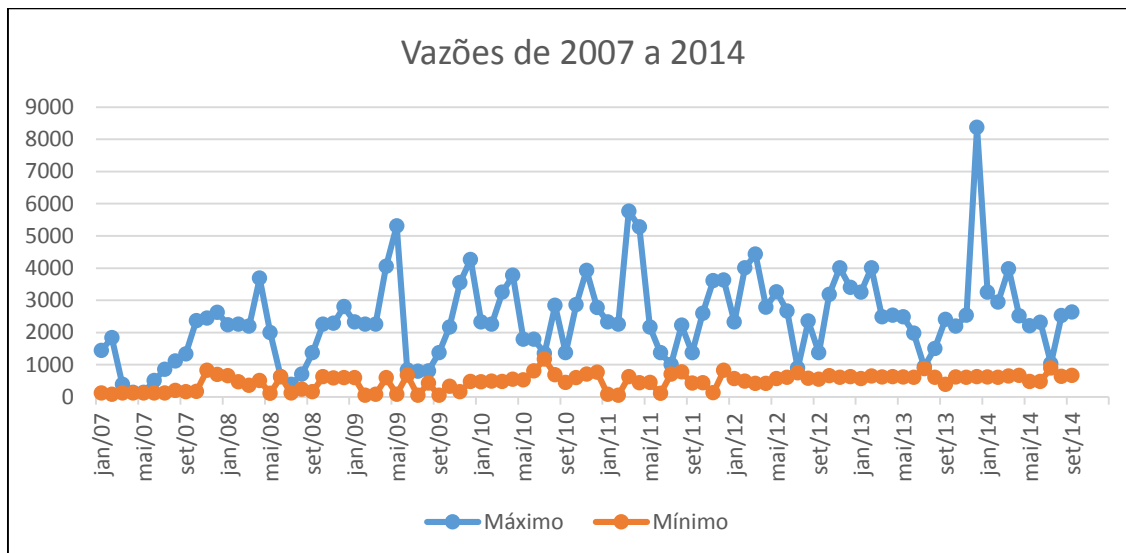
Fonte: Próprio autor

5.2 DETERMINAÇÃO DE HIDROGRAMA

A determinação do hidrograma a ser utilizado na propagação baseou-se na máxima vazão observada histórica, apresentada na figura 20, tendo como base os dados

disponibilizados pela UHE Peixe Angical. Conforme apresentado na figura abaixo, a maior vazão registrada desde o início de operação da usina foi de 8.373,24 m³/s

Figura 20 – Dados das vazões registrada pela UHE Peixe Angical



Fonte: UHE Peixe Angical (2016).

5.3 RESULTADOS

As modelagens foram realizadas tendo como base os dados apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Valores adotados para o trecho

Q_{pico} (m ³ /s)	Q_{base} (m ³ /s)	Δt (s)	Coefficiente de Manning	Declividade	Comprimento trecho (m)
8.347	2.000	1800	0,035	0,00014	120.000

Fonte: Próprio Autor

As seções de montante e jusante do rio Tocantins foram determinadas em levantamento de campo.

Os resultados apresentados nos hidrogramas para o trecho estudado demonstraram que a vazão de pico determinada pelo modelo HEC-RAS foi de 6.833,04 m³/s no instante t=27,5 horas e 6.584,25 no instante t=7 horas no modelo MCT, apontando uma diferença entre as vazões de pico de 3,6%.

6 CONCLUSÕES

O método de Muskingum-Cunge-Todini para este caso de estudo apresentou inconsistências nas primeiras horas de simulação do hidrograma de ruptura quando comparado à propagação da onda pelo método hidrodinâmico (1ª equação de Saint Venant).

Certamente, a formulação teórica do modelo de Muskingum-Cunge-Todini dificulta a representação fiel do modelo do terreno, no entanto, quando considerado um fator de correção para ajuste baseado na comparação com modelos hidrodinâmicos completos, a ferramenta se torna viável e próxima à realidade.

Comparando os resultados apresentados entre os hidrogramas obtidos nos modelos MCT e HEC-RAS, nota-se relevante similaridade em seus valores. As propagações realizadas nos modelos para o trecho do rio Tocantins apontaram resultados próximos entre o método simplificado e o modelo hidrodinâmico completo.

Pode-se concluir que para propagação de grandes vazões o modelo MCT apresenta diferenças de maior relevância quando comparado aos resultados gerados pelo modelo HEC-RAS. Vazões inferiores a 10.000 m³/s apresentaram maior similaridade nos resultados.

Ressalta-se que a aplicabilidade deste método apresenta melhor performance quando sujeita a cenários com vazões inferiores a 10.000 m³/s. A heterogeneidade da calha do trecho estudado no rio Tocantins demonstra que o modelo MCT apresentou bons resultados quando aplicado a trechos variáveis.

Levando-se em consideração a semelhança entre os resultados obtidos nos modelos MCT e HEC-RAS para o trecho aplicado ao rio Tocantins, conclui-se que o modelo simplificado Muskingum-Cunge-Todini possa ser utilizado sem maiores problemas para alguns casos que se enquadrem nos comentários acima.

REFERÊNCIAS

- AURELI, F; MARANZONI A; MIGNOSA P. A semi-analytical method for predicting the out low hydrograph due to dam-break in natural valleys. **Advances in Water Resources**, Kidlington, v. 63, p. 38-44, 2014.
- BAO, H. J. et al. **Coupling ensemble weather predictions based on TIGGE database with Grid-Xinjiang model for flood forecast. Advances in Geosciences**, Goettingen, v. 29, p. 61–67, 2011.
- BENTURA, P.L.F. **Développement d'une méthode de propagation de crue méthode delaistockage**. 1996. 490 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de Paris Val de Marne, Paris, 1996.
- BLÖSCHL, G.; SIVAPALAN, M. Scale issues in hydrological modelling: a review. In: KALMA, J. D.; SIVAPALAN, M. (E.). **Scale issues in hydrological modelling**. Chichester: John Wiley & Sons, 1995. p. 9–48.
- BOTH, G. C.; HAETINGER, C. Uso da modelagem matemática para a previsão de enchentes no Vale do Taquari – RS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 6., 2008, Serra Negra. **Anais...** São Paulo: ASBEA, 2008. p.1-7. 1CD-ROM. ISSN 1983-0653.
- CADIER, E.; LANNA, A. E.; MENEZES, M.; CATNPELLO, M. S. Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste Brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987, Salvador. **Anais...** Salvador: ABRH, 1987. v. 2, p. 225-239.
- CAPPELAERE, B. Accurate diffusive wave routing. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, v. 123, n. 3, p. 174-181, 1997
- CARNEIRO NETO, J. A. **Gestão de riscos induzidos por rompimento de barramento, estudo do caso da barragem olho d'água**. 2009. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2009.
- CASAGRANDE, L. F.; HOSS, O. Métodos de forecasting conjugado com um método qualitativo e um método com a média das previsões quantitativas e qualitativas. **Revista CAP**, v. 4, n. 4, p 94-100, 2010.
- CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959. 234 p.
- CHOW, V. T. **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1964. 1465 p.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L.W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988. 572 p.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Hidrologia aplicada**. Santafé de Bogotá: McGrawHill, 1994. 584 p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS- CPRM. **Definição da planície de inundação da cidade de governador valadares**. Belo Horizonte: [s.n.], 2004.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Previsão sazonal de vazão na Bacia do Rio Uruguai 2: previsão climática-hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 61–72, 2005.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, Abingdon, v. 7, n. 2, p.205-230.

CUNGE, J.A.; HOLLY, F. M.; VERWEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics**. Boston: Pitman, 1980. 419 p.

FREAD, D. L. **Flow routing**. New York: McGraw-Hill, 1992. p. 1-36. Chapter 10. Handbook of Hydrology.

FUCK R.A. A faixa Brasília e a compartimentação geotectônica na Província Tocantins. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 4., Brasília-DF, 1994. **Simpósio...** Brasília: [s.n.], 1994. p. 184-187

FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Normas de apresentação tabular**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. 62 p.

GRACIOSA, M. C. P. **Modelo de seguro para riscos hidrológicos com base em simulação hidráulico-hidrológica como ferramenta de gestão de risco de inundações**. 2010. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)– Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 2010.

HE, Y.; WETTERHALL, F.; BAO, H.; CLOKE, H.; LI, Z.; PAPPENBERGER, F.; HU, Y.; MANFUL, D.; AND HUANG, Y. Ensemble forecasting using TIGGE for the July-September 2008 floods in the Upper Huai catchment: a case study, atmos. **Journal of Materials Science Letters**, New York, v. 11, n. 2, p. 132– 138, 2010.

KOUSSIS, A. D. Assessment and review of the hydraulics of storage flood routing 70 years after the presentation of the Muskingum method. **Hydrological Sciences Journal**, Abingdon, v. 54, n. 1, p. 43–61, 2009.

MACHIONE, F. Application of the muskingum-cunge method for dam break flood routing. **Transactions on Ecology and the Environment**, Southampton, v. 8, p. 1-8, 1991.

MASCARENHAS, F. C. B. **Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens**.1990. 291 f. Tese (PhD)- COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1990.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL- MI. **Manual de segurança e inspeção de barragens**. Brasília- DF: Ministério, 2002. 148 p.

MARINI, O .J.; FUCK, R. A.; DANNI, J. C.; DARDENNE, M. A.; LOGUERCIO, S.O.; RAMALHO, R. As faixas de dobramento Brasília, Uruaçu e Paraguai-Araguaia e

o Maciço Mediano de Goiás. In: SCHOBENHAUS, C.; DIÓGENES, A.C.; DERGE, G.R.; ASMOS, M.G. (Coord.). 1984. **Geologia do Brasil**. Brasília: DNPM, 1981. p. 251-303

MOHOR, G. S.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; SIQUEIRA JÚNIOR, J. L. Exploratory analyses for the assessment of climate change impact on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plan. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, Amsterdã, v. 4, p. 41-59, 2015

NAGHETTINI, M. C.; NASCIMENTO, N. O.; LIMA, A. A.; BALBI, D.; THIMOTTI, T.; QUEIROGA, Y. G. **Modelos de simulação hidrológica para previsão de vazões de curto prazo**: relatório técnico parcial 4. ed. Belo Horizonte: EHR/ UFMG, 2002.

PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K.; HORRITT, M.; BLAZKOVA, S. Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. **Journal of Hydrology**, Amsterdã, v. 302, n. 1–4, p. 46-69, 2005.

PERUMAL, M.; O'CONNELL, P. E.; RANGA-RAJU, K. G. Field applications of a variable-parameter muskingum method. **Jornal de Engenharia Hidrológica**, v. 6, n. 3, p. 196–207, 2001.

PERUMAL, M. Hydrodynamic derivation of a variable parameter muskingum method. **Hydrological Sciences**, Abingdon, v. 39, n. 2, p. 431- 442, 1994.

PONCE, V. M. **Engineering hydrology: principles and practices**. New Jersey: Prentice-Hall, 1989. 640 p.

PONTES, P. R. M. **Comparação de modelos hidrodinâmicos simplificados de propagação de vazão em rios e canais**. 2011. 159 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de pesquisas hidráulicas- IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, Porto Alegre, 2011.

PRICE, R. K. Volume-conservative nonlinear flood routing. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 10, p. 838-845, 2009

REGGIANI, P.; TODINI, E.; MEIBNER, D. On mass and momentum conservation in the variable-parameter muskingum method. **Journal of Hydrology**, Nova York, v. 543, n. 37, p 562-576, 2016.

SANTOS, L. L. Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações. **RBGF**, Recife, v. 2, n. 3, p. 1-19, set-dez, 2009.

SCHAAKE, J. C., T. M.; HAMILL, R; BUIZZA, M.; CLARK, 2007 HEPEX: the hydrological ensemble prediction experiment. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 88, p. 1541–1547, 2007.

SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. E.; ASMUS, H. E. **Mapa geológico do Brasil e da Área Oceânica adjacente incluindo depósitos minerais**. Brasília: DNPM/MME, 1984.

SILVA, F. E. O. **Avaliação de métodos de propagação de vazões em cursos d'água naturais com ênfase em aspectos da geomorfologia fluvial**. 2006. 265 f. Dissertação (Mestrado) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG, Belo Horizonte - MG, 2006.

SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the madeira river basin. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 129, n. 1 - 2, p. 117–129, 2015.

SINGH, V. P. **Dam break modeling technology**. Louisiana: Kluwer Academic Publishers, 1996.

TANG, X.; KNIGHT, D. W.; SAMUELS, P. G. Volume conservation in variable parameter muskingum-cunge method. **Jornal de Engenharia Hidráulica**, v. 125, n. 6, p. 610–620.

TUCCI, C. E. M. Modelos matemáticos em hidrologia e hidráulica. **Revista Brasileira de Engenharia**, Beja, v. 3, n. 1 - 3, 1986, 550 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1993. 943 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998. 668 p.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2000.

TUCCI, C. E. M.. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 678 p. 2005.

TODINI, E. A mass conservative and water storage consistent variable parameter muskingum-cunge approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, Goettingen, v. 11, n. 5, p.1549-1592, 2007.

UNITED NATIONS. **Guidelines for reducing flood losses**. [S.l.: s.n.], 2002. Disponível em: <<http://www.unisdr.org>>. Acesso em: 3 jan 2017.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R.; ACERBI JUNIOR, F. W.; SILVA, A. M. Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 581-590, 2009.

WALDER, J. S.; O'CONNOR, J. E. Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 10, p. 2337-2348.

YOU, L.; LI, C.; XU, M; XIAOLEI, T. Review of dam-break research of earth-rock dam combining with dam safety management. **Procedia Engineering**, Amsterdã, v. 28, p. 382-388, 2012.

7 ANEXOS

7.1 ROTINA DE CALCULO

LH2 - LABORATÓRIO DE HIDROLOGIA E HIDROMETRIA

' DEC - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

' FEIS - FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

' UNESP - UNVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

' PROGRAMA MCT - Versão 2017.2 do LH2, DEC-FEIS-UNESP

' PROPAGAÇÃO POR MUSKINGUM CUNGE TODINI - MCT

' Versão 2017.0 APENAS PRISMÁTICOS : TRIANGULAR, RETANGULAR E TRAPEZOIDAL e solução analítica de $y(n)$

' Versão 2017.1 Inclui canais com seção qualquer e solução de $y(n)$ por interpolação em tabelas de seções

' Versão 2017.2 Inclui canais com seção variável, determinadas por interpolação das seções do início e fim

' FONTES ORIGINAIS DO ALGORITMO

' TODINI, E. A mass conservative and water storage consistent variable parameter

' Muskingum-Cunge approach. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,

' European Geosciences Union, 2007, 11 (5), pp.1645-1659.

' TODINI, E. Corrigendum to "A mass conservative and ...approach"

' Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 1783, 2007. www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1783/2007/

'

' AUTORIA: PUPIM, Pedro; SANTINI, Maurício; DALL'AGLIO SOBRINHO, Milton

' É livre a distribuição e modificação deste material desde que citada a fonte.

' email para contato: mauriciosantinijr@gmail.com

'

' ATENÇÃO: v. atual utiliza DADOS ESTÁTICOS de nomes de planilhas e posição das células de entrada e saída.

' Portanto não mude nomes de planilhas nem a posição das células com dados.

' INSTRUÇÕES:

' 1. A planilha "TAB" deve ser preparada antes de rodar a sub "Principal".

```

' Esta planilha contém as tabelas para interpolação das propriedades hidráulicas da
seção;
' pode ser montada por qualquer meio, mas esta versão dispõe de duas rotinas para a
tarefa,
' acionadas pelo botão "Gerar Características Hidráulicas".
' 2. As seções são entradas em vetores de qualquer tamanho até 200 pares de pontos
(XE,YE);
' deixar linha em branco após os dados.
' 3. esta versão (2017.1) não comporta fundo com mínimos locais "Levees"; caso
necessário usar a rotina
' da versão 0 do MCTSolver para calcular a tabela e copiar o resultado para a planilha
"TAB"
' 4. A planilha "DADOS" contém os parâmetros que definem o problema.
' 5. O hidrograma de Entrada é fornecido na "DADOS" e é lido pela rotina "Le_Input".
' 6. O usuário deve rodar a sub "Principal" após preencher as planilhas "DADOS" e
"TAB",
' com as informações do problema. A rotina "Principal" se encarrega de chamar as
demais.
'
' lembrete - algumas variáveis globais declaradas estão obsoletas e não são mais usadas
' precisa eliminar as declarações supérfluas
'
' INÍCIO DAS DECLARAÇÕES DE VARIÁVEIS GLOBAIS
' vetores armazenam todos os tempos
Dim Qin(350) As Double ' vazao de entrada, C.I.
Dim Qout(350) As Double ' vazao de saída do trecho
Dim prof_y(350) As Double ' profundidade correspondente a Qout
Dim Area_y(350) As Double ' área da seção de saída
' parametros hidraulicos tabelados das secoes de montante "1" e jusante "2"
' S = área, Y = profundidade, P = perim molhado, KK = conveyance
Dim A1(500), A2(500), y1(500), y2(500), P1(500), P2(500), B1(500), B2(500),
KK1(500), KK2(500) As Double
Dim EX(300), EY(300) ' valores de entrada da secao de jusante
Dim Aini(500), Afim(500), yini(500), yfim(500), Pini(500), Pfim(500), Bini(500),
Bfim(500), KKini(500), KKfim(500) As Double

```

Dim maxlin_ini, maxlin_fim, maxlin1, maxlin2, iknovo1, iknovo2, num_ptos_tab As Integer ' usados para ler as tabelas das secões

Dim celer(350) As Double ' celeridade correspondente a Qout

Dim beta(350) As Double ' fator de correcao

Dim courant(350) As Double ' número de courant C*

Dim rey(350) As Double ' num de reynolds da celula D*

Dim c1, c2, c3 As Double ' constantes de propagacao

' parametros do problema fornecidos na planilha "DADOS"

Dim n, B0, Z, alfa, alfa_c, alfa_s As Double ' maning, base, z = vertical para 1 Horizontal

Ex: 1H/5V, z = 5

Dim delta_x, delta_t, s0, L As Double ' comprimento do trecho S0 = decliv fundo, L = comprimento do canal

Dim num_trechos, num_delta_t, n_trecho As Integer ' num de trechos (= L/delta_x)

Dim linha_ini As Integer ' valor estático depende da estrutura da planilha

' valores auxiliares ou de uso pelas subrotinas

Dim cte1, cte2, Area1, Pw1 As Double

Dim ynovo, erro, ValorBuscado, LadoDireito As Double ' valores temporarios ou auxiliares

Dim Pnovo, Anovo, Bnovo As Double

Dim varia_secao As Integer

,

' DECLARAÇÃO DAS FUNÇÕES CHAMADAS PELAS SUBROTINAS

,

Public Function Area(y, B0, Salfa, Calfa) As Double

' usada no método analítico (retangular, triangular e trapezoidal)

Area = (B0 + y * Calfa) * y

End Function

Public Function Perim(y, B0, Salfa, Calfa) As Double

' usada no método analítico (retangular, triangular e trapezoidal)

Perim = B0 + 2 * y / Salfa

End Function

Public Function Bw(y, B0, Salfa, Calfa) As Double

' usada no método analítico (retangular, triangular e trapezoidal)

```

Bw = B0 + 2 * y * Calfa
End Function
Public Function LDir(Aw, Pw, cte1, cte2) As Double
LDir = Aw ^ cte1 / Pw ^ cte2 ' lado direito (seg. membro) da eq. de Manning
End Function
Public Function LEsq(n, s0, Vazao) As Double
LEsq = n * Vazao / s0 ^ 0.5 ' lado esquerdo (primeiro membro) da eq. de Manning
End Function
Public Function Celerid(y)
' calcula celeridade por método analítico (ret., triang. e trap.)
a = Area(y, B0, alfa_s, alfa_c)
P = Perim(y, B0, alfa_s, alfa_c)
B = Bw(y, B0, alfa_s, alfa_c)
Celerid = cte1 * s0 ^ 0.5 / n * (a / P) ^ cte2 * (1 - 0.8 * a / (B * P * alfa_s))
End Function
Public Function interpola_tabela(x1, x2, x3, fx1, fx2, fx3, x)
' aproximação por ajuste parabólico dos dados de tabela
cb2 = (fx2 - fx1) / (x2 - x1)
cb3 = ((fx3 - fx2) / (x3 - x2) - (fx2 - fx1) / (x2 - x1)) / (x3 - x1)
interpola_tabela = fx1 + cb2 * (x - x1) + cb3 * (x - x2)
End Function

'
' SUBROTINAS
'
Public Sub Le_tabela_secao()
' Entra as tabelas de seção inicial (ini) e final (fim) preparadas por "Calcula_secao"
Sheets("TAB").Select ' atenção para valores estáticos
lini = 6
k = 0
' inicia carga da tabela da secao 1 montante
Nova_Linha1:
k = k + 1
If Cells(lini + k, 11).Value = "" Then GoTo finaliza1
yini(k) = Cells(lini + k, 11).Value
Aini(k) = Cells(lini + k, 12).Value

```

```

Pini(k) = Cells(lini + k, 13).Value
Bini(k) = Cells(lini + k, 15).Value
'KK1(k) = Cells(lini + k, 16).Value
KKini(k) = Aini(k) * (Aini(k) / Pini(k)) ^ cte2 / n * s0 ^ 0.5
GoTo Nova_Linha1

```

```
finaliza1:
```

```
maxlin_ini = k - 1
```

```
' inicia carga da tabela da secao 2 jusante
```

```
k = 0
```

```
Nova_Linha2:
```

```
k = k + 1
```

```
If Cells(lini + k, 17).Value = "" Then GoTo finaliza2
```

```
yfim(k) = Cells(lini + k, 17).Value
```

```
Afim(k) = Cells(lini + k, 18).Value
```

```
Pfim(k) = Cells(lini + k, 19).Value
```

```
Bfim(k) = Cells(lini + k, 21).Value
```

```
KKfim(k) = Afim(k) * (Afim(k) / Pfim(k)) ^ cte2 / n * s0 ^ 0.5
```

```
Cells(lini + k, 23).Value = KKfim(k)
```

```
GoTo Nova_Linha2
```

```
finaliza2:
```

```
maxlin_fim = k - 1
```

```
End Sub
```

```
Public Sub Interpola_K2(Vazao)
```

```
' dada a vazão retorna os valores interpolados de Y, Área, Perímetro e Largura
```

```
' da seção inicial do trecho
```

```
For k = 1 To maxlin2
```

```
If Vazao >= KK2(k) And Vazao <= KK2(k + 1) Then
```

```
' encontrou a faixa de vazoes para interpolar
```

```
ik = k
```

```
k = maxlin2 + 1
```

```
End If
```

```
Next k
```

```
ynovo = interpola_tabela(KK2(ik), KK2(ik + 1), KK2(ik + 2), y2(ik), y2(ik + 1), y2(ik + 2), Vazao)
```

```
Anovo = interpola_tabela(KK2(ik), KK2(ik + 1), KK2(ik + 2), A2(ik), A2(ik + 1),
A2(ik + 2), Vazao)
```

```
Pnovo = interpola_tabela(KK2(ik), KK2(ik + 1), KK2(ik + 2), P2(ik), P2(ik + 1), P2(ik
+ 2), Vazao)
```

```
Bnovo = interpola_tabela(KK2(ik), KK2(ik + 1), KK2(ik + 2), B2(ik), B2(ik + 1),
B2(ik + 2), Vazao)
```

```
iknovo2 = ik
```

```
End Sub
```

```
Public Sub Calcula_Nivel(q)
```

```
' usada no método analítico (retangular, triangular e trapezoidal)
```

```
' utiliza o método da biseccção na tabela da seção de jusante
```

```
' atenção: contém definicoes estaticas
```

```
cte1 = 5 / 3
```

```
cte2 = 2 / 3
```

```
max_iter = 50 ' número máximo de biseccções
```

```
ValorBuscado = LEsq(n, s0, q)
```

```
' inicio do calculo pelo metodo da biseccao
```

```
ermax = 0.001 ' no momento variável estatica
```

```
ymin = 2 ' no momento variáveis estaticas
```

```
ymax = 16 ' sugestão: automatizar com base em Hmax informado em "TAB"
```

```
ynovo = (ymin + ymax) / 2
```

```
iteracao = 0
```

```
proxima_tentativa:
```

```
iteracao = iteracao + 1
```

```
y = ynovo
```

```
Area1 = Area(y, B0, alfa_s, alfa_c)
```

```
Pw1 = Perim(y, B0, alfa_s, alfa_c)
```

```
LadoDireito = LDir(Area1, Pw1, cte1, cte2)
```

```
If LadoDireito < ValorBuscado Then ymin = y
```

```
If LadoDireito > ValorBuscado Then ymax = y
```

```
ynovo = (ymin + ymax) / 2
```

```
If iteracao > max_iter Then GoTo finaliza
```

```
If Abs(ValorBuscado - LadoDireito) > ermax Then GoTo proxima_tentativa
```

```
finaliza:
```

```
erro = ValorBuscado - LadoDireito ' apenas para debug
```

End Sub

Public Sub Le_Input()

' entra o hidrograma de entrada no trecho

Sheets("DADOS").Select ' atenção para variável estática

For k = 0 To num_delta_t

linha = linha_ini + k

Qin(k) = Cells(linha, 3).Value

Next k

' publica resultados para conferir na planilha "SAIDA"

Sheets("SAIDA").Select ' atenção para variável estática

For k = 0 To num_delta_t

 linha = 12 + k ' atenção para valor estático da linha inicial

 Cells(linha, 3).Value = Qin(k)

Next k

End Sub

Public Sub Principal()

' antes preparar a tabela com dados hidraulicos da seção

' rodando a macro calcula_secao

' inicializa valores do problema

'

' TRECHO COM EDIÇÃO DE CÓDIGO PARA DEFINIR TIPO DE SOLUÇÃO

Flag_analitico = 0 ' 1 = canal prismático com solução analítica

 ' 0 = canal prismático ou natural, com solução numérica

Sheets("DADOS").Select ' atenção para variáveis estáticas

Z = Cells(9, 4).Value

B0 = Cells(6, 4).Value

s0 = Cells(5, 4).Value

n = Cells(4, 4).Value

delta_x = Cells(3, 4).Value

delta_t = Cells(7, 4).Value

varia_secao = Cells(8, 4).Value ' se = 1 seção varia linearmente entre entrada e saída

 ' se = 0 seção é constante - canal prismático de forma qualquer

```

L = Cells(10, 4).Value
num_trechos = Cells(3, 8).Value
num_delta_t = Cells(7, 8).Value
linha_ini = Cells(6, 8).Value ' não utilizado verificar
linha = ActiveCell.Row      ' não utilizado verificar
' calcula constantes solução analítica
If Flag_analitico = 1 Then
  If Z = 0 Then
    alfa = Application.WorksheetFunction.Acos(Z) ' canal retangular
    alfa_c = 0
    alfa_s = 1
  Else
    alfa = Atn(1 / Z) ' canal triangular ou trapezoidal
    alfa_c = 1 / Tan(alfa)
    alfa_s = Sin(alfa)
  End If
End If ' trecho com flag analítico
cte1 = 5 / 3
cte2 = 2 / 3

' inicio da logica
n_trecho = 0
' carrega as condicoes de contorno do primeiro trecho em Qin (k)
  Call Le_Input
  Call Le_tabela_secao
' atribui seção inicial à seção de montante (1)
  For iktab = 1 To maxlin_ini
    y1(iktab) = yini(iktab)
    A1(iktab) = Aini(iktab)
    P1(iktab) = Pini(iktab)
    B1(iktab) = Bini(iktab)
    KK1(iktab) = KKini(iktab)
  Next iktab
  maxlin1 = maxlin_ini
' atribui seção final à seção de jusante (2)
If varia_secao = 0 Then

```

```

For iktab = 1 To maxlin_fim
    y2(iktab) = yfim(iktab)
    A2(iktab) = Afim(iktab)
    P2(iktab) = Pfim(iktab)
    B2(iktab) = Bfim(iktab)
    KK2(iktab) = KKfim(iktab)
Next iktab
maxlin2 = maxlin_fim

```

End If

calcula_trecho:

```
n_trecho = n_trecho + 1
```

```
If varia_secao = 1 Then ' seção variável, calcula tabela da seção de jusante (3)
```

```
    ' inicialmente testa se tabelas tem mesmo tamanho
```

```
    If maxlin_fim = maxlin_ini Then
```

```
        ' OK, tabelas iguais, gera a seção intermediária
```

```
        maxlin2 = maxlin_fim ' para compatibilizar com codificação anterior
```

```
        Call monta_area_jusante
```

```
    Else ' tabelas diferentes não é possível interpolar
```

```
        GoTo finaliza ' ATENÇÃO termina sem fazer nada e sem msg de erro
```

```
    End If
```

```
End If ' seção é constante, já carregou a seção 2 para todos os trechos
```

```
' condicao inicial
```

```
Qout(0) = Qin(0)
```

```
If Flag_analitico = 1 Then
```

```
    ' trecho usando a solução analítica
```

```
        Call Calcula_Nivel(Qout(0)) ' solução analítica por biseção
```

```
        prof_y(0) = ynovo
```

```
        Area_y(0) = Area(prof_y(0), B0, alfa_s, alfa_c)
```

```
        B = Bw(prof_y(0), B0, alfa_s, alfa_c)
```

```
        celer(0) = Celerid(prof_y(0))
```

```
    Else
```

```
    ' trecho usando a solução numerica interpolando a tabela da seção
```

```
        Call Interpola_K2(Qout(0)) ' solução numérica interpolando a tabela
```

```

prof_y(0) = ynovo
Area_y(0) = Anovo
B = Bnovo
'
' TRECHO1 PARA EDIÇÃO DO CÓDIGO CONFORME SUA OPÇÃO -
Compatibilizar com Trecho 2
' diversas opções para calculo da celeridade com dif. finitas
' eq 1: dif finita progressiva
'celer(0) = (KK2(iknovo2 + 1) - Qout(0)) / (B * (y2(iknovo2 + 1) - ynovo))
' eq 2: esquema centrado para dQ/dy com ponto a frente e ponto atrás
'celer(0) = ((KK2(iknovo2 + 1) - Qout(0)) / (y2(iknovo2 + 1) - ynovo) +
(Qout(0) - KK2(iknovo2)) / (ynovo - y2(iknovo2))) / (2 * B) '
Celerid(prof_y(0))
' eq 3: dif centrada com ponto tabelado a frente e ponto atrás
celer(0) = (KK2(iknovo2 + 1) - KK2(iknovo2)) / (B * (y2(iknovo2 + 1) -
y2(iknovo2)))
'eq 4: dif finita regressiva
' celer(0) = (Qout(0) - KK2(iknovo2)) / (B * (ynovo - y2(iknovo2)))
' FIM DO TRECHO1
End If
beta(0) = celer(0) * Area_y(0) / Qout(0)
courant(0) = celer(0) / beta(0) * (delta_t / delta_x)
rey(0) = Qout(0) / (beta(0) * B * s0 * celer(0) * delta_x)

' Início da propagacao no trecho atual
For k = 1 To num_delta_t
' primeira estimativa de Qref
Qref = Qout(k - 1) + Qin(k) - Qin(k - 1)
icalculo = 0
repete_calculo:
' saída estimada a partir de Qref
Qout(k) = (Qin(k) + Qref) / 2
If Flag_analitico <> 1 Then
Call Interpola_K2(Qout(k)) ' numerico
prof_y(k) = ynovo
Area_y(k) = Anovo

```

B = Bnovo

' TRECHO2 PARA EDIÇÃO DO CÓDIGO CONFORME SUA OPÇÃO -
Compatibilizar com Trecho1

' diversas opções para calculo da celeridade com dQ/dy por dif. finitas

' Equação 1: esquema progressivo

'celer(k) = (KK2(iknovo2 + 1) - Qout(k)) / (B * (y2(iknovo2 + 1) - ynovo))

' Equação 2: esquema centrado para dQ/dy com ponto a frente e ponto atrás

'celer(k) = ((KK2(iknovo2 + 1) - Qout(k)) / (y2(iknovo2 + 1) - ynovo) +
(Qout(k) - KK2(iknovo2)) / (ynovo - y2(iknovo2))) / (2 * B)

' Equação 3: usa dQ/dy centrado no intervalo da tabela em que está a vazão

celer(k) = (KK2(iknovo2 + 1) - KK2(iknovo2)) / (B * (y2(iknovo2 + 1) -
y2(iknovo2)))

' Equação 4: fórmula regressiva

'celer(k) = (Qout(k) - KK2(iknovo2)) / (B * (ynovo - y2(iknovo2)))

' FIM DO TRECHO2

Else

Call Calcula_Nivel(Qout(k)) ' analitico

prof_y(k) = ynovo

Area_y(k) = Area(prof_y(k), B0, alfa_s, alfa_c)

B = Bw(prof_y(k), B0, alfa_s, alfa_c)

celer(k) = Celerid(prof_y(k)) ' analitica

End If

beta(k) = celer(k) * Area_y(k) / Qout(k)

courant(k) = celer(k) / beta(k) * (delta_t / delta_x)

rey(k) = Qout(k) / (beta(k) * B * s0 * celer(k) * delta_x)

'calculo das constantes de propagacao

comum = 1 + courant(k) + rey(k)

comum2 = courant(k) / courant(k - 1)

c1 = (-1 + courant(k) + rey(k)) / comum

c2 = (1 + courant(k - 1) - rey(k - 1)) / comum * comum2

c3 = (1 - courant(k - 1) + rey(k - 1)) / comum * comum2

'Qref passa a ser a vazao propagada para a saida

Qref = c1 * Qin(k) + c2 * Qin(k - 1) + c3 * Qout(k - 1)

'verifica se esta com a primeira estimativa da vazao de referencia

```

    icalculo = icalculo + 1
    If icalculo < 2 Then GoTo repete_calculo ' calcula novamente
    Qout(k) = Qref ' já é a segunda estimativa, entao temos Qout
Next k ' Calcula próximo tempo
' calculou todos os tempos da seção
' imprime a saída do trecho em todos os tempos
Sheets("SAIDA").Select
    numsec = Cells(1, 2).Value ' pega info sobre qtas colunas ja publicadas
    colini = 4 + numsec ' calcula a primeira coluna livre para os dados
    For k = 0 To num_delta_t
        Cells(12 + k, colini).Value = Qout(k) ' atencao para valor estatico (linha 12)
    Next k
    Cells(1, 2).Value = numsec + 1 ' deixa a info para publicar a prox coluna
    Cells(10, colini).Value = numsec + 1
' calculou todos os tempos, pode ir para o novo trecho
' saída do trecho anterior passa a ser a entrada do trecho atual
    For k = 0 To num_delta_t
        Qin(k) = Qout(k)
    Next k
    If n_trecho < num_trechos Then GoTo calcula_trecho ' começa o novo trecho
    Cells(1, 2).Value = 0 ' prepara para saída de outra rodada
finaliza:
' imprime o resultado final na planilha "DADOS"
Sheets("DADOS").Select
For k = 0 To num_delta_t
    Cells(18 + k, 4).Value = Qout(k) ' atencao para valor estatico (linha 12)
Next k
End Sub

```

```

Public Sub Calcula_Secao_fim()
' rodar antes da "Principal" para montar a planilha com as
' características hidráulicas da seção de jusante
' iniciar na célula do primeiro dado EX da seção
'
' leitura dos pontos que caracterizam a seção

```

```

lini = 3 ' atenção valores estáticos
colini = 4
Hmax = Cells(3, 3).Value ' prof max esperada no problema; é função de Qmax
' le as entradas
k = 0
Nova_Linha:
    k = k + 1
    EX(k) = Cells(lini + k - 1, colini).Value
    EY(k) = Cells(lini + k - 1, colini + 1).Value
    If EX(k) <> "" Then GoTo Nova_Linha
    n_entradas = k - 1
' inicio do calculo da tabela de dados hidraulicos
' localiza máximo e mínimo
    kmax = 1: kmin = 1: EXmax = EX(1): EXmin = EX(1): EYmax = EY(1): EYmin =
EY(1)
    For k = 2 To n_entradas
        If EY(k) > EYmax Then
            EYmax = EY(k)
            kmax = k
        Else
            If EY(k) < EYmin Then
                EYmin = EY(k)
                kmin = k
            End If
        End If
    Next k
' verifica fundo plano
    kmin_E = kmin: kmin_D = kmin
    If EY(kmin) = EY(kmin + 1) Then kmin_D = kmin + 1

' calcula deltay e deltah
    deltaH = Hmax / 500
    If deltaH < 0.05 Then deltaH = 0.05
    deltaY = EY(kmax) - EY(kmin)
    num_ptos_tab = Int(deltaY / deltaH)

```

```

For iktab = 1 To num_ptos_tab
  ' inicio do calculo à esquerda
  AE = 0: BE = 0: PE = 0
  isec = kmin_E: yatual = EY(isec) + iktab * deltaH
proximo_isec:
  isec = isec - 1
  If yatual >= EY(isec) Then
    ' ponto interno
    dx = Abs(EX(isec + 1) - EX(isec))
    dy = Abs(EY(isec) - EY(isec + 1))
    hm = (2 * yatual - EY(isec + 1) - EY(isec)) / 2
    AE = AE + hm * dx
    BE = BE + dx
    PE = PE + Sqr(dx * dx + dy * dy)
    If isec > 0 Then GoTo proximo_isec
  Else
    ' ponto da entrada está acima, calcula a intersecção
    dy = Abs(EY(isec) - EY(isec + 1))
    dx = Abs(EX(isec + 1) - EX(isec))
    aa = Abs(yatual - EY(isec + 1))
    bb = aa * dx / dy
    AE = AE + aa * bb / 2
    BE = BE + bb
    PE = PE + Sqr(aa * aa + bb * bb)
  End If

  ' inicio do calculo à direita
  isec = kmin_D: yatual = EY(kmin_D) + iktab * deltaH
  AD = 0: BD = 0: PD = 0
proximo_isec_D:
  isec = isec + 1
  If yatual >= EY(isec) Then
    ' ponto interno
    dx = Abs(EX(isec) - EX(isec - 1))
    dy = Abs(EY(isec) - EY(isec - 1))
    hm = (2 * yatual - EY(isec) - EY(isec - 1)) / 2

```

```

AD = AD + hm * dx
BD = BD + Abs(dx)
PD = PD + Sqr(dx * dx + dy * dy)
If isec < n_entradas Then GoTo proximo_isec_D
Else
' ponto da entrada está acima, calcula a intersecção
dy = Abs(EY(isec) - EY(isec - 1))
dx = Abs(EX(isec) - EX(isec - 1))
aa = Abs(yatual - EY(isec - 1))
bb = aa * dx / dy
AD = AD + aa * bb / 2
BD = BD + bb
PD = PD + Sqr(aa * aa + bb * bb)

End If

```

proximo_DH:

```

Afim(iktab) = AE + AD
Pfim(iktab) = PE + PD
Bfim(iktab) = BE + BD
'verifica fundo plano
If kmin_E < kmin_D Then
'fundo plano
base = EX(kmin_D) - EX(kmin_E)
altura = yatual - EY(kmin_E)
Afim(iktab) = Afim(iktab) + base * altura
Pfim(iktab) = Pfim(iktab) + base
Bfim(iktab) = Bfim(iktab) + base
End If
yfim(iktab) = iktab * deltaH
Next iktab

'imprimir a tabela para conferir

For iktab = 1 To num_ptos_tab
Cells(6 + iktab, 17).Value = yfim(iktab)

```

```

Cells(6 + iktab, 18).Value = Afim(iktab)
Cells(6 + iktab, 19).Value = Pfim(iktab)
Cells(6 + iktab, 20).Value = Afim(iktab) / P2(iktab)
Cells(6 + iktab, 21).Value = Bfim(iktab)
Cells(6 + iktab, 22).Value = Afim(iktab) * (Afim(iktab) / Pfim(iktab)) ^ (2 / 3)

```

```
Next iktab
```

```
End Sub
```

```
Public Sub Calcula_Secao_ini()
```

```
' rodar antes da "Principal" para montar a planilha com as
```

```
' características hidráulicas da seção de montantesante
```

```
' iniciar na célula do primeiro dado EX da seção
```

```
,
```

```
' leitura dos pontos que caracterizam a seção
```

```
lini = 3 ' atenção, valores estáticos
```

```
colini = 1
```

```
Hmax = Cells(3, 3).Value ' prof max esperada no problema; é função de Qmax
```

```
' le as entradas
```

```
k = 0
```

```
Nova_Linha:
```

```
    k = k + 1
```

```
    EX(k) = Cells(lini + k - 1, colini).Value
```

```
    EY(k) = Cells(lini + k - 1, colini + 1).Value
```

```
    If EX(k) <> "" Then GoTo Nova_Linha
```

```
    n_entradas = k - 1
```

```
' inicio do calculo da tabela de dados hidraulicos
```

```
' localiza máximo e mínimo
```

```
    kmax = 1: kmin = 1: EXmax = EX(1): EXmin = EX(1): EYmax = EY(1): EYmin =
```

```
EY(1)
```

```
For k = 2 To n_entradas
```

```
    If EY(k) > EYmax Then
```

```
        EYmax = EY(k)
```

```
        kmax = k
```

```

Else
  If EY(k) < EYmin Then
    EYmin = EY(k)
    kmin = k
  End If
End If
Next k
' verifica fundo plano
kmin_E = kmin: kmin_D = kmin
If EY(kmin) = EY(kmin + 1) Then kmin_D = kmin + 1
' calcula deltay e deltah
deltaH = Hmax / 500
If deltaH < 0.05 Then deltaH = 0.05
deltaY = EY(kmax) - EY(kmin)
num_ptos_tab = Int(deltaY / deltaH)

For iktab = 1 To num_ptos_tab
  ' inicio do calculo à esquerda
  AE = 0: BE = 0: PE = 0
  yatual = EY(kmin_E) + iktab * deltaH
proximo_isec:
  isec = isec - 1
  If yatual >= EY(isec) Then
    ' ponto interno
    dx = Abs(EX(isec + 1) - EX(isec))
    dy = Abs(EY(isec) - EY(isec + 1))
    hm = (2 * yatual - EY(isec + 1) - EY(isec)) / 2
    AE = AE + hm * dx
    BE = BE + dx
    PE = PE + Sqr(dx * dx + dy * dy)
    If isec > 0 Then GoTo proximo_isec
  Else
    ' ponto da entrada está acima, calcula a intersecção
    dy = Abs(EY(isec) - EY(isec + 1))
    dx = Abs(EX(isec + 1) - EX(isec))
    aa = Abs(yatual - EY(isec + 1))
  End If
End For

```

```

bb = aa * dx / dy
AE = AE + aa * bb / 2
BE = BE + bb
PE = PE + Sqr(aa * aa + bb * bb)
End If
' Início do Cálculo à direita
isec = kmin_D: yatual = EY(kmin_D) + iktab * deltaH
AD = 0: BD = 0: PD = 0
proximo_isec_D:
isec = isec + 1
If yatual >= EY(isec) Then
  ' ponto interno
  dx = Abs(EX(isec) - EX(isec - 1))
  dy = Abs(EY(isec) - EY(isec - 1))
  hm = (2 * yatual - EY(isec) - EY(isec - 1)) / 2
  AD = AD + hm * dx
  BD = BD + Abs(dx)
  PD = PD + Sqr(dx * dx + dy * dy)
  If isec < n_entradas Then GoTo proximo_isec_D
Else
  ' ponto da entrada está acima, calcula a intersecção
  dy = Abs(EY(isec) - EY(isec - 1))
  dx = Abs(EX(isec) - EX(isec - 1))
  aa = Abs(yatual - EY(isec - 1))
  bb = aa * dx / dy
  AD = AD + aa * bb / 2
  BD = BD + bb
  PD = PD + Sqr(aa * aa + bb * bb)
End If
proximo_DH:
Aini(iktab) = AE + AD
Pini(iktab) = PE + PD
Bini(iktab) = BE + BD
'verifica fundo plano
If kmin_E < kmin_D Then
  'trata seção com trecho de fundo plano

```

```

base = EX(kmin_D) - EX(kmin_E)
altura = yatual - EY(kmin_E)
Aini(iktab) = Aini(iktab) + base * altura
Pini(iktab) = Pini(iktab) + base
Bini(iktab) = Bini(iktab) + base
End If
y1(iktab) = iktab * deltaH
Next iktab
' trecho imprime a tabela para conferir, pode ser suprimido em versão de produção
For iktab = 1 To num_ptos_tab
Cells(6 + iktab, 11).Value = yini(iktab)
Cells(6 + iktab, 12).Value = Aini(iktab)
Cells(6 + iktab, 13).Value = Pini(iktab)
Cells(6 + iktab, 14).Value = Aini(iktab) / P1(iktab)
Cells(6 + iktab, 15).Value = Bini(iktab)
Cells(6 + iktab, 16).Value = Aini(iktab) * (Aini(iktab) / Pini(iktab)) ^ (2 / 3)
Next iktab
End Sub

Public Sub Gera_Tabela_Secoos()
' macro associada ao botão na planilha "TAB"
Call Calcula_Secao_ini
Call Calcula_Secao_fim
End Sub

Public Sub monta_area_jusante()

x = n_trecho * delta_x

For iktab = 1 To maxlin_fim
y2(iktab) = interpola_linear(yini(iktab), yfim(iktab), x)
A2(iktab) = interpola_linear(Aini(iktab), Afim(iktab), x)
P2(iktab) = interpola_linear(Pini(iktab), Pfim(iktab), x)
B2(iktab) = interpola_linear(Bini(iktab), Bfim(iktab), x)
KK2(iktab) = A2(iktab) * (A2(iktab) / P2(iktab)) ^ cte2 / n * s0 ^ 0.5

```

Next iktab

End Sub

Public Function interpola_linear(x1, x2, x)

interpola_linear = x1 + ((x2 - x1) / L) * x

End Function

7.2 HIDROGRAMA

t (h)	Q (m ³ /s)	t (h)	Q (m ³ /s)
0	3000	15	2757,58
0,5	7500	15,5	2727,27
1	12000	16	2696,97
1,5	16500	16,5	2666,67
2	21000	17	2636,36
2,5	25500	17,5	2606,06
3	30000	18	2575,76
3,5	28312,5	18,5	2545,46
4	26625	19	2515,15
4,5	24937,5	19,5	2484,85
5	23250	20	2454,55
5,5	21562,5	20,5	2424,24
6	19875	21	2393,94
6,5	18187,5	21,5	2363,64
7	16500	22	2333,33
7,5	14812,5	22,5	2303,03
8	13125	23	2272,73
8,5	11437,5	23,5	2242,42
9	9750	24	2212,12
9,5	8062,5	24,5	2181,82
10	6375	25	2151,52
10,5	4687,5	25,5	2121,21
11	3000	26	2090,91
11,5	2969,7	26,5	2060,61
12	2939,39	27	2030,3
12,5	2909,09	27,5	2000
13	2878,79	28	1969,7
13,5	2848,49	28,5	1939,39
14	2818,18	29	1909,09
14,5	2787,88	29,5	1903,57