



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA PATRÍCIA SALES CASTRO

ANÁLISE DE RISCO DE ENCHENTES MEDIANTE MODELOS
HIDRODINÂMICOS *FUZZY*

FORTALEZA

2019

MARIA PATRÍCIA SALES CASTRO

ANÁLISE DE RISCO DE ENCHENTES MEDIANTE MODELOS HIDRODINÂMICOS

FUZZY

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva

Coorientador: Prof. Dr. John Kenedy Araújo

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C352a Castro, Maria Patricia Sales.
Análise de Risco de Enchentes mediante Modelos Hidrodinâmicos Fuzzy / Maria Patricia Sales Castro. –
2019.
105 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Fernando Jose Araújo da Silva.
Coorientação: Prof. Dr. John Kenedy de Araújo.

1. Modelos Hidrodinâmicos. 2. Ondas de Cheias. 3. Teoria Fuzzy. I. Título.

CDD 627

MARIA PATRÍCIA SALES CASTRO

ANÁLISE DE RISCO DE ENCHENTES MEDIANTE MODELOS HIDRODINÂMICOS
FUZZY

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de doutor em Engenharia Civil. Área de Concentração: Recursos Hídricos

Aprovada em: 28 de Agosto de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. John Kenedy Araújo (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Marisete Dantas de Aquino
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

A Deus e a Nossa Senhora, por serem meus guias na minha caminhada e renovarem minha fé a cada dia.

Aos meus pais, José e Maria Socorro, pelo amor incondicional que tem por mim, além do incentivo e apoio em todas as minhas escolhas e decisões, sempre torcendo pelo meu sucesso.

As minhas irmãs Danielle e Aline e aos meus avós maternos Miguel (*in memoriam*) e Maria (*in memoriam*) e paternos Antônio (*in memoriam*) e Lúcia (*in memoriam*), dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar com as dificuldades. Agradeço a Deus também por ter me dado a minha família.

Aos meus pais José e Socorro, que sempre me incentivaram, por sempre estarem presentes, sempre primaram pela minha Educação e por serem exemplos de conduta. As minhas irmãs Danielle e Aline onde tenho muito orgulho de ter cada uma de vocês em minha vida. Estendo meus agradecimentos aos meus cunhados Henrique e Diogo, os quais eu considero como irmãos.

Ao meu orientador Prof. Raimundo Oliveira de Souza (*in memoriam*) por todo carinho, dedicação, paciência, tranquilidade e orientações repassadas. Aos professores Fernando José e John Kenedy que para minha alegria e honra aceitaram a missão de representar o Prof Raimundo Oliveira de Souza (*in memoriam*). Minha eterna gratidão.

Meus respeitosos agradecimentos pela contribuição da banca do exame de qualificação formada pelos professores: Prof. Raimundo Oliveira de Souza (*orientador in memoriam*), Prof. Fernando José Araújo da Silva e Prof. John Kenedy de Araújo e à banca examinadora da defesa formada pelos professores Fernando José Araújo da Silva, Prof. John Kenedy de Araújo e Profa. Marisete Dantas de Aquino, Prof. José Maria Brabo Alves e o Prof. Emerson Mariano da Silva. Em especial, aos professores Fernando José e John Kenedy.

A Alice Souza e Joana Souza, por vocês serem essas pessoas iluminadas. Mesmo na dor de ter perdido um ente-querido, vocês se dispuseram a ajudar. É um privilégio quando temos ao nosso lado pessoas tão maravilhosas como vocês. Nunca terei como agradecer todo o apoio que vocês me ofereceram no momento em que tanto precisei.

Ao Prof Mario Ângelo e sua esposa Rosina, para mim, vocês são uma grande família, aquela que nem sempre eu pude ter por perto, mas que assim que nos conhecemos, eu já os reconheci pela sintonia de alma. Tê-los é um grande presente em minha vida. Agradeço a Deus ter o privilégio de terem vocês em minha vida.

Ao Prof John Kenedy de Araújo que vem acompanhando de longa data a minha caminhada, mais precisamente desde os tempos da graduação (LabCG). Agradeço por toda a sua disponibilidade, orientação, atenção, conselhos, confiança, respeito, amizade, compreensão e por sempre acreditar que chegaria ao final desta difícil, porém gratificante etapa. Eu sou muito honrada em ter você como professor e amigo.

Ao Prof José Fábio Bezerra Montenegro por me ajudar nessa caminhada, sempre transmitindo seus conhecimentos com leveza.

As amigas de pesquisa: Alice Rocha, Ticiane e Karyna, por suas demonstrações de amizade e alegria. Obrigada por dividir comigo as alegrias e lágrimas. E, em especial a Karyna sempre com palavras de alegria e incentivo durante esse período. Vocês são um presente de Deus na minha vida.

Aos meus amigos de turma de Doutorado: José Benevides e Ronald, por terem tornado o dia a dia na pós-graduação tão enriquecedor e prazeroso. As minhas amigas da turma de mestrado Tayane Lima e Jéssica Elen, por estarem sempre torcendo por mim.

Ao Daniel Cid, Paula Nobre e Liana, amigos e colegas de doutorado, por nossa caminhada de estudo e por serem meus companheiros oficiais de viagem.

A professora Marisete Dantas pelo carinho e atenção, sempre presente.

Aos meus amigos de sala prof Raimundo, aos quais conheci por serem frequentadores daquela sala tão querida: Silvia Helena, Patricia Chagas, Rejane Félix, Juliana Araújo, Prof Fernando e Umbelina, agradeço por nossas horas de muita conversa e histórias, sempre regadas de boas risadas juntos. Uauuuuuu!

A “mi” querida amiga de toda as horas Vanessa Herculano de Lima.

Agradeço a todos os professores do curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional e por tanto que se dedicaram a mim, em especial aos professores: John Kennedy, Marisete Dantas, Horst, Fernando, Suetônio, Ernesto Pitombeira, José Nilson e Marco Aurélio.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) pela colaboração e disponibilidade constante, em especial a: Edineuza, Shirley, Joviene, Xavier, Erivelton e "Chiquim".

Aos membros do Departamento de Engenharia de Transporte (DET) pelo apoio incondicional, em especial a: Zacarias, Clélia, Cecília, Helry, prof Bruno Bertoncini, prof Mario Azevedo.

E ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento da pesquisa de doutorado via bolsa de estudos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Ao meu orientador Professor Raimundo Oliveira de Souza (*in memoriam*), por acreditar em meu potencial de uma forma em que eu não acreditava ser capaz de corresponder. Sempre disponível e disposto a ajudar, querendo que eu aproveitasse cada segundo dentro do doutorado para absorver algum tipo de conhecimento. Neste período de convívio e amizade, pude testemunhar sua paixão por lecionar que se estendia além das salas de aula. Com você aprendi muito mais do que teoria, aprendi valores humanos para ser colocado em prática. Firme em suas posições, nunca abandonou seu jeito gentil de saber ouvir, de se interessar pelo que o outro dizia, mesmo se discordasse. É um aspecto cada vez mais raro nos dias de hoje: apesar da posição de destaque, sempre preferiu a discrição, qualidade dos que sabem que a obra diz mais do que o homem. Aqui expresso a minha mais sincera gratidão, por ter permanecido ao meu lado sempre com suas palavras de incentivo e motivação, mas principalmente, por acreditar tanto em mim. Obrigada por não ser apenas o orientador, mas por ter me dado a honra de sua amizade.

“Em um ser humano, não há espaço para a arrogância e a humildade no mesmo corpo, um vai expulsar o outro.”

(Raimundo Oliveira de Souza)

RESUMO

Muitos dos problemas hidrodinâmicos que envolvem a propagação de ondas ao longo da extensão em canais naturais são resolvidos através da equação de Saint-Venant. Na maioria das aplicações práticas, os modelos da onda cinemática e difusa são aplicados em rios para estudar a propagação de uma onda de cheia em canais naturais. Esses modelos são derivações do Modelo da Onda Dinâmica, a partir de simplificações das Equações de Saint-Venant, onde alguns termos são desprezados. Esta pesquisa tem como objetivo aplicar a Teoria *Fuzzy* nos modelos hidrodinâmicos da propagação da onda em canais naturais, a fim de verificar as incertezas e os riscos em relação aos parâmetros hidrodinâmicos presentes nesses modelos. A introdução da lógica *fuzzy* no modelo hidrodinâmico, para calcular as funções de pertinência vinculadas às variáveis de controle, proporciona um procedimento adequado e prontamente eficaz para a análise dos campos de risco presentes no processo de propagação de onda de cheia. As equações diferenciais parciais, pertinentes aos modelos foram resolvidas através do Método das Diferenças Finitas, sendo o esquema de aproximação explícito aplicado para aos modelos de onda dinâmica e cinemática, enquanto que o esquema de aproximação implícito foi aplicado para ao modelo de onda difusa. Foram realizadas ainda algumas simulações específicas para a análise do comportamento do risco de cheias, e da garantia, em função das características hidráulicas e hidrológicas do canal, avaliando, assim, de que maneira determinadas alterações no coeficiente de rugosidade, ou na declividade do canal, por exemplo, podem afetar o comportamento da função de risco. Os resultados mostram que o comportamento da propagação das ondas dinâmica, difusiva e cinemática, bem como o comportamento das funções de risco e garantia, são influenciados pelos parâmetros hidráulicos do canal. De acordo com os resultados apresentados, concluiu-se que a aplicação da Teoria *Fuzzy*, em sistemas hidrodinâmicos, na avaliação de incertezas é uma alternativa viável para determinação do risco de ocorrência de cheias e assim ser mais uma ferramenta de apoio em programas de Gestão de Recursos Hídricos.

Palavras-chave: Modelos Hidrodinâmicos. Ondas de Cheia. Teoria Fuzzy.

ABSTRACT

Many hydrodynamic problems that involve of the propagation flood waves along the length in natural channels are solved by Saint–Venant equations. In most practical applications the diffusive and kinematic wave routing are applied to study the flow routing in natural channels. These wave equations are derivations of the Dynamic Wave Routing, from simplifications of Saint-Venant Equations, where some terms are neglected. This research aims to apply the Fuzzy Theory in hydrodynamic models at natural channels, in order to verify the uncertainties and Risks related to the hydrodynamic parameters present in these models. Introducing fuzzy logic into the hydrodynamics model, to calculate the membership functions associated with the control variables, provides a suitable and readily efficacious procedure for the analysis of the risk fields in the flood wave routing process. Through the Finite Difference schemes was solved partial differential equations present in Saint-Venant equations, explicit approach was applied for dynamic and kinematic wave, while implicit approach was applied for diffusion routing equation. In addition, some specific simulations were performed for the analysis of the flood risk and safety behaviour, in terms of the hydraulic and hydrologic channel characteristics and, therefore, evaluating in which manner certain changes, for example, in the roughness coefficient and in the bed slope may affect the risk function behaviour. Results allowed establishing some interesting analysis with regard to the behaviour of dynamic, diffusive and kinematic wave flood routing, as well as the risk and the safety functions behaviour are highly influenced by the channel hydraulic parameters. Results allowed concluding that the application of the Fuzzy Theory, in the hydrodynamic systems, in the evaluation of uncertainty is a viable alternative for determining the risk of flooding and thus be more a support tool in Water Resources Management programs.

Keywords: Hydrodynamic Wave Models. Flood Routing. Fuzzy Theory.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Volume de controle para a dedução da equação da continuidade	29
Figura 2 – Volume de controle para a dedução da equação da quantidade de momento	30
Figura 3 – Representação da função de pertinência triangular	34
Figura 4 – Representação da função de pertinência trapezoidal	35
Figura 5 – Representação da função de pertinência Gaussiana	36
Figura 6 – Adição <i>Fuzzy</i>	37
Figura 7 – Subtração <i>Fuzzy</i>	37
Figura 8 – Multiplicação <i>Fuzzy</i>	38
Figura 9 – Divisão <i>Fuzzy</i>	38
Figura 10 – Risco <i>fuzzy</i>	40
Figura 11 – Malha de discretização no plano $x - t$	46
Figura 12 – Gráfico de Malha de discretização para onda dinâmica	48
Figura 13 – Gráfico de Malha de discretização para onda difusa	49
Figura 14 – Gráfico de Malha de discretização para onda cinemática	51
Figura 15 – Fluxograma completo do programa computacional	55
Figura 16 – Fluxograma subrotina Leitura de Dados.	56
Figura 17 – Fluxograma subrotina para as Funções de Pertinência.	57
Figura 18 – Fluxograma estruturado para a saída de dados Hidrodinâmica <i>Fuzzy</i>	58
Figura 19 – Localização do Rio Cocó.	60
Figura 20 – Propagação da onda dinâmica ao longo do canal natural para diferentes tempos, com $S_0 = 0,000305$ e $n = 0,05$	61
Figura 21 – Propagação da onda difusa ao longo do canal natural para diferentes tempos, com $S_0 = 0,000305$ e $n = 0,05$	62
Figura 22 – Propagação da onda cinemática ao longo do canal natural para diferentes tempos, com $S_0 = 0,000305$ e $n = 0,05$	63
Figura 23 – Comparação entre as vazões das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 10km da origem	64
Figura 24 – Comparação entre as vazões das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 20km da origem	65
Figura 25 – Comparação entre as profundidades das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 10km da origem	66

Figura 26 – Comparação entre as profundidades das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 20km da origem	66
Figura 27 – Comparação entre as áreas das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 10km da origem	67
Figura 28 – Comparação entre as áreas das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 20km da origem	68
Figura 29 – Hidrógrafo da vazão da onda Dinâmica ao longo do canal, correspondente ao nível de corte- $\alpha = 0,5$ e $t=4h$	69
Figura 30 – Hidrógrafo da vazão da onda Difusa ao longo do canal, correspondente ao nível de corte- $\alpha = 0,5$ e $t=4h$	69
Figura 31 – Hidrógrafo da vazão da onda Cinemática ao longo do canal, correspondente ao nível de corte- $\alpha = 0,5$ e $t=4h$	70
Figura 32 – Hidrógrafo da vazão da onda Cinemática ao longo do canal, correspondente ao nível de corte- $\alpha = 0,5$ e $t=6h$	71
Figura 33 – Função de Pertinência da Profundidade Onda Dinâmica para o tempo de 2 horas	72
Figura 34 – Função de Pertinência da Vazão Onda Dinâmica para o tempo de 2 horas	72
Figura 35 – Representação <i>fuzzy</i> da função marginal de segurança para Onda Dinâmica no tempo de 2 horas, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$	73
Figura 36 – Função de pertinência da vazão da onda dinâmica para 3 seções distintas, $t=2$ horas, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$	74
Figura 37 – Função de pertinência da profundidade da onda dinâmica para 3 seções distintas, $t=2$ horas, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$	74
Figura 38 – Representação <i>fuzzy</i> da função marginal de segurança para onda dinâmica em 3 seções distintas, $t=2$ horas, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$	75
Figura 39 – Função de pertinência da vazão da onda dinâmica para 2 tempos distintos, seção=10 km, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$	76
Figura 40 – Função de pertinência da profundidade da onda dinâmica para 2 tempos distintos, seção=10 km, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$	76
Figura 41 – Representação <i>fuzzy</i> da função marginal de segurança para onda dinâmica em 2 tempos distintos, seção=10 km, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$	77

Figura 42 – Função de pertinência da profundidade da onda dinâmica para $n=0,05$ e $n=0,1$, $t=2$ horas e $S_0=0,0005$	78
Figura 43 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança Onda Dinâmica para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$, $n= 0,05$ e $n=0,1$	78
Figura 44 – Função de pertinência da profundidade da onda difusa para $n=0,05$ e $n=0,1$, $t=2$ horas e $S_0=0,0005$	79
Figura 45 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança Onda Difusa para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$, $n= 0,05$ e $n=0,1$	79
Figura 46 – Função de pertinência da profundidade da onda cinemática para $n=0,05$ e $n=0,1$, $t=2$ horas e $S_0=0,0005$	80
Figura 47 – Representação <i>fuzzy</i> da função marginal de segurança Onda Cinemática para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$, $n= 0,05$ e $n=0,1$	80
Figura 48 – Representação <i>fuzzy</i> da função marginal de segurança dos modelos hidrodinâmicos para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$ e $n= 0,05$	81
Figura 49 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança dos modelos hidrodinâmicos para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$ e $n=0,1$	81
Figura 50 – Função de pertinência onda dinâmica para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$	82
Figura 51 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança onda dinâmica para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$	83
Figura 52 – Função de pertinência onda difusa para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$	83
Figura 53 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança onda difusa para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$	84
Figura 54 – Função de pertinência onda cinemática para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$	84
Figura 55 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança onda cinemática para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$	85
Figura 56 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança dos modelos hidrodinâmicos para $t=2$ horas, $n= 0,05$, $S_0=0,0005$	85
Figura 57 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança dos modelos hidrodinâmicos para $t=2$ horas e $S_0=0,00003$	86

Figura 58 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança onda dinâmica para t=2 horas, $n=0,05, S_0=0,0005$	87
Figura 59 – Representação <i>fuzzy</i> da marginal de segurança onda difusa para t=2 horas, $n=$ $0,05, S_0=0,0005$	87
Figura 60 – Representação <i>fuzzy</i> da margem de segurança onda cinemática para t=2 horas, $n=0,05, S_0=0,0005$	88
Figura 61 – Representação do risco <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n=0,01, S_0=0,0001$	89
Figura 62 – Representação da garantia <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n=0,01, S_0=0,0001$	89
Figura 63 – Representação do risco e garantia <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n=0,01, S_0=0,0001$	90
Figura 64 – Representação do risco <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n=0,03, S_0=0,0001$	91
Figura 65 – Representação da garantia <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n=0,03, S_0=0,0001$	92
Figura 66 – Representação do risco <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 5km, $n=$ $0,01, S_0=0,0001$	92
Figura 67 – Representação do risco <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 5km, $n=$ $0,01, S_0=0,00005$	93
Figura 68 – Representação da garantia <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 5km, $n=0,01, S_0=0,0001$	93
Figura 69 – Representação da garantia <i>fuzzy</i> dos modelos hidrodinâmicos na seção 5km, $n=0,01, S_0=0,00005$	94
Figura 70 – Campos de risco para diferentes picos de onda dinâmica, ao longo do tempo, a 5 km da origem	95
Figura 71 – Campos de garantia para diferentes picos de onda dinâmica, ao longo do tempo, a 5 km da origem	95
Figura 72 – Campos de risco de cheias para modelos hidrodinâmicos, a 5 km da origem, com pico de onda $3Q_0$	96
Figura 73 – Campos de risco de cheias para modelos hidrodinâmicos, a 5 km da origem, com pico de onda $4Q_0$	97

Figura 74 – Campos de risco de cheias para modelos hidrodinâmicos, a 5 km da origem,
com pico de onda $5Q_0$ 97

LISTA DE SÍMBOLOS

A	$[L^2]$	Área da seção transversal do fluxo
B	$[L]$	Largura superior da superfície livre do canal
c	$[L/T]$	Celeridade
D	$[L^2/T]$	Coefficiente difusivo
F	$[ML/T^2]$	Força que age no fluido
F_{fx}	$[ML/T^2]$	Componente da força de cisalhamento na direção x
F_{gx}	$[ML/T^2]$	Componente da força gravitacional na direção x
F_{px}	$[ML/T^2]$	Componente da força de pressão na direção x
g	$[L/T^2]$	Aceleração da gravidade
\forall	$[L^3]$	Volume
h_c	$[L]$	Distância vertical entre a superfície livre até o centroide da área da seção transversal
n	$[L^{-1/3}.T]$	Número de Manning
P, P_M	$[L]$	Perímetro molhado
Q	$[L^3/T]$	Vazão
Q_0	$[L^3/T]$	Vazão inicial
q, q_L	$[L^3/T/L]$	Vazão lateral de entrada por unidade de comprimento na direção do fluxo
R, R_h	$[L]$	Raio hidráulico
S_f	$[L/L]$	Perda de carga devido ao atrito com as margens e o fundo do rio
S_0	$[L/L]$	Declividade de fundo
t	$[T]$	Tempo
U	$[L/T]$	Velocidade média na seção transversal do fluxo na direção(x)
v_L	$[L/T]$	Velocidade da vazão lateral entrando, com ângulo de inclinação θ na direção x

x	[L]	Distância linear ao longo do rio
Y, y	[L]	Altura de escoamento da seção; profundidade de escoamento na seção
\tilde{A}	[L ²]	Função de pertinência para a área transversal do canal do rio
\tilde{M}	[-]	Função de pertinência da matriz (M)
\tilde{Q}	[L ³ /T]	Função de pertinência para a vazão
\tilde{q}	[L ³ /T]	Função de pertinência para o escoamento lateral
\tilde{S}_f	[L/L]	Função de pertinência para a declividade da linha de energia
\tilde{S}_0	[L/L]	Função de pertinência para a declividade do leito do rio
\tilde{y}	[L]	Função de pertinência para a profundidade
$\mu_{\tilde{A}}(x)$	[-]	Grau de pertinência do elemento x em um conjunto <i>fuzzy</i> \tilde{A}
$\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}$	[-]	Coefficientes <i>fuzzy</i> que compõem a matriz \tilde{M}
QU	[L ³ /T]	Vazão <i>fuzzy</i> superior para corte $\alpha=0,5$
QL	[L ³ /T]	Vazão <i>fuzzy</i> inferior para corte $\alpha=0,5$
Δx	[L]	Incremento no espaço para a solução numérica
Δt	[L]	Incremento no tempo para a solução numérica
τ_0	[M/L.T ²]	Tensão de cisalhamento
$\text{tang } \theta = S_0$	[L/L]	Inclinação no fundo do canal
ϕ, θ	[-]	Ângulos
Φ	[-]	Coefficiente de ponderação no esquema numérico implícito
κ	[-]	Coefficiente da forma discretizada da celeridade
λ	[-]	Coefficiente da forma discretizada do coefficiente difusivo
$\frac{\partial}{\partial t}$	[T ⁻¹]	Derivada parcial em relação a t
$\frac{\partial}{\partial x}$	[L ⁻¹]	Derivada parcial em relação a x

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Objetivos da Pesquisa	23
1.1.1	<i>Objetivo Geral</i>	23
1.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	23
1.2	Justificativa	24
1.3	Organização do Trabalho	25
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	26
2.1	Equações de Saint-Venant	27
2.2	Equação da Continuidade	28
2.3	Equação da Quantidade de Movimento	29
2.4	Teoria <i>Fuzzy</i>	32
2.4.1	<i>Conjuntos Fuzzy</i>	33
2.4.2	<i>Formato das funções de pertinência</i>	33
2.4.3	<i>Operações aritméticas com números Fuzzy</i>	36
2.5	Risco e Confiabilidade <i>Fuzzy</i>	39
3	METODOLOGIA	42
3.1	Modelo Hidrodinâmico: Equações de Saint-Venant	42
3.1.1	<i>Equação da Onda Dinâmica</i>	42
3.1.2	<i>Equação da Onda Difusa</i>	43
3.1.3	<i>Equação da Onda Cinemática</i>	44
3.2	Formulação Numérica	44
3.2.1	<i>Formulação Numérica para o Modelo da Onda Dinâmica</i>	46
3.2.2	<i>Formulação Numérica para o Modelo da Onda Difusa</i>	48
3.2.3	<i>Formulação Numérica para o Modelo da Onda Cinemática</i>	50
3.3	Modelo Hidrodinâmico <i>Fuzzy</i>	52
3.3.1	<i>Equação da Onda Dinâmica Fuzzy</i>	53
3.3.2	<i>Equação da Onda Difusa Fuzzy</i>	53
3.3.3	<i>Equação da Onda Cinemática Fuzzy</i>	53
3.4	Cálculo de Risco	54
3.5	Aspectos Computacionais	54

3.6	Cenários para a simulação	58
3.6.1	<i>Potencial de Aplicação em Escala Real</i>	59
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	61
4.1	Propagação das Ondas Hidrodinâmicas	61
4.2	Função de Pertinência <i>Fuzzy</i>	68
4.3	Função Marginal de Segurança	71
4.4	Potencial de Aplicação em Escala Real	94
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	98
	REFERÊNCIAS	101

1 INTRODUÇÃO

Desde sua origem o homem convive com os fenômenos da natureza, entre eles encontram-se as cheias. Os fenômenos de cheia fluvial, com inundação de zonas adjacentes, podem colocar em risco a segurança de pessoas e de bens, além de comprometer a qualidade do ambiente e o desenvolvimento econômico de uma região. As áreas de inundações e os impactos correspondentes podem ser mitigados com base na implementação de restrições em determinadas atividades humanas e/ou construção de obras de controle. De acordo com o artigo 3º da Lei 12.608/2012 (BRASIL, 2012), cabe aos municípios criar mecanismos de controle e fiscalização para evitar a edificação em áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos (SOUZA *et al.*,).

A aplicação desta lei é uma oportunidade para o desenvolvimento de medidas preventivas e sustentáveis das inundações proporcionando novos desafios à engenharia. Os modelos hidrológicos e hidráulicos espacialmente distribuídos para determinação das zonas inundáveis são uma ferramenta importante que auxilia no processo do planejamento e gestão da análise de risco. A representação da superfície do terreno é um fator crítico na modelação hidrológica e hidráulica de inundações, pois, como dado de entrada do modelo, condiciona a vazão de entrada e a extensão da inundação (HORRITT; BATES, 2001).

Sobre o nível de complexidade do modelo hidrológico e hidráulico, e sobre os dados necessários para obter uma previsão útil da extensão das enchentes não há um consenso. Assim existem várias técnicas com o intuito de apresentar uma previsão da extensão inundada resultante da propagação de ondas de cheias fluviais. Embora os modelos físicos e os estudos das calhas sejam utilizados para investigar as vazões em canais complexos, pode-se fazer referência aos trabalhos de Thomas e Williams (1994); Lin e Shiono (1995); Cokljat e Kralj (1997); Ye e Mccorquodale (1998); Bates *et al.* (1999) e Sofialidis e Prinos (1999), que trataram tema. Os modelos numéricos oferecem muito mais flexibilidade na sua aplicação, principalmente devido aos avanços em técnicas numéricas e computacionais que disponibilizam fluxos cada vez mais complexos e que podem ser modelados dentro de prazos curtos.

A estratégia de modelagem numérica necessária para capturar processos importantes em eventos de enchentes ainda é, no entanto, um assunto de debate. Há também a questão do fornecimento de dados, e a maioria dos estudos de modelagem são limitados pelos dados disponíveis, e é óbvio que seria um desperdício usar um processo de representação complexa em um modelo que não pode ser executado com precisão. Na verdade, não se sabe se o tempo,

esforço e o dinheiro são mais bem aplicados para melhorar a representação de processos em modelos de enchentes ou na coleta de mais dados para a sua execução.

Modelos unidimensionais para fluxo de canal, resolvendo ou por completo ou por alguma aproximação unidimensional as equações de Saint-Venant (e. g., (MOUSSA; BOCQUILLON, 1996) e (RUTSCHMANN; HAGER, 1996), têm sido muito populares por razões de simplicidade computacional e a facilidade de parametrização, mas negligenciam importantes aspectos dos sistemas hidráulicos de enchentes.

Uma abordagem bidimensional entretando é capaz de resolver alguns processos hidráulicos induzidos pela topografia de planície e de um canal sinuoso, cujo modelo unidimensional é incapaz de representar. A desvantagem de modelos bidimensionais, quando comparado com abordagem unidimensional é que eles tendem a ser mais intensivos em relação à obtenção de dados, necessitando de dado topográfico distribuído (BATES *et al.*, 1999) e possivelmente, dado de valores de atrito (HORRITT, 2000). Este tem sido o principal argumento contra o uso de modelos bidimensionais para previsão de enchentes operacional, e tais argumentos aplicam-se ainda mais fortemente para modelagem tridimensional dos fluxos fluviais.

A modelagem bidimensional é o caminho a seguir para a previsão de enchentes por duas razões. Em primeiro lugar, os problemas de representação do processo discutida no parágrafo anterior, onde indicam que um modelo unidimensional é demasiadamente simples em seu tratamento das vazões, e que um modelo tridimensional é desnecessariamente complexo e computacionalmente intenso. Em segundo lugar, as técnicas já desenvolvidas podem ser usadas para parametrizar e validar modelos de propagação de cheias bidimensionais utilizando dados de sensoriamento remoto. Antigamente, a aplicação de modelos hidráulicos bidimensionais em escala foi muito dificultada pela escassez detalhada de dados topográficos, mas com o avanço da tecnologia é possível realizar o mapeamento das áreas inundáveis segundo mencionado por Ritchie (1995), Ritchie *et al.* (1996), Gomes-Pereira e Wicherson (1999), modelos digitais de elevação (MDEs) pode em breve estar disponível para muitos rios.

A resolução espacial (horizontal e vertical) e a qualidade do conjunto de dados geográficos podem produzir grandes diferenças nos resultados da modelação hidráulica de inundações (WILSON, 2004). Têm sido apresentados vários estudos sobre a aplicação de diferentes modelos hidráulicos na avaliação da extensão da zona inundável (HORRITT; BATES, 2002) e (HUNTER *et al.*, 2008). Apesar destas aplicações, é importante compreender o mérito dos diferentes métodos, com diferentes níveis de representação matemática do escoamento e

diferentes técnicas numéricas. Dentre estes métodos, pode-se destacar das diferenças finitas (AMEIN; CHU, 1974) e (RAHIMPOUR; TAVAKOLI, 2011), elemento finito (HICKS, 1990; SZYMKIEWICZ, 1991), volume finito (AUDUSSE; BRISTEAU, 2007) e das características (OSTAD-ALI-ASKARI *et al.*, 2018).

Por meio das equações de Saint-Venant, a hidráulica fluvial pode ser classificada como modelos de ondas dinâmicas, difusas ou cinemáticas que correspondem a diferentes formas da equação de momento, respectivamente .

Modelos de propagação da onda dinâmica mantem todos os termos da equação de momento. Os termos de aceleração nas equações de Saint-Venant podem ser negligenciados na maioria das aplicações práticas de propagação de ondas de cheia em canais naturais. O sistema é assim reduzido a uma única equação parabólica conhecida como o modelo de onda difusa. (PONCE, 1990). Desprezando os termos de aceleração local, a aceleração convectiva e os termos de pressão, a equação da onda cinemática é adquirida.

Segundo Chaudhry (2001) as alternativas para resolver as equações de Saint-Venant variando vazão e profundidade do nível de água ao longo do escoamento e do tempo são:

- Realizar as simplificações da Equação de Saint-Venant;
- Estabelecer o método a ser utilizado
- Utilizar Métodos Numéricos

Para esta pesquisa foi desenvolvida uma metodologia que combinou o modelo hidrodinâmico com a Teoria *Fuzzy* para a propagação das ondas dinâmicas, difusivas e cinemáticas com o intuito de estudar as incertezas e o risco em relação à variação dos parâmetros hidrodinâmicos como declividade e o coeficiente de rugosidade. Para isto foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN que permitiu diversas simulações a fim de avaliar o comportamento da propagação das ondas dinâmicas, difusas e cinemáticas para diferentes cenários propostos.

1.1 Objetivos da Pesquisa

1.1.1 *Objetivo Geral*

Desenvolver uma metodologia para análise de risco e da garantia em um canal natural, com a aplicação da Teoria *Fuzzy* nos modelos de propagação de onda: dinâmica, difusa e cinemática, a fim de verificar a relação entre parâmetros hidrodinâmicos presentes nesses modelos.

1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Desenvolver uma solução para os modelos hidrodinâmicos de propagação de cheias, com base em um método numérico iterativo, de modo a contornar os problemas da não linearidade de suas equações;
- Aplicar os fundamentos da Teoria *Fuzzy* nos modelos hidrodinâmicos, para estudar as incertezas presentes nos parâmetros físicos e nas variáveis de entrada das equações da hidrodinâmica;
- Utilizar a Teoria *Fuzzy* para calcular o risco e a garantia de um sistema hídrico, a partir das variáveis de controle dos modelos hidrodinâmicos em função do tempo e do espaço;
- Realizar simulações para diferentes cenários presentes em canais naturais de modo a permitir uma criteriosa análise no comportamento da propagação da onda dinâmica, difusa e cinemática.

1.2 Justificativa

Entre todos os desastres naturais, a cada ano as enchentes são os fenômenos mais frequentes, que afetam uma grande parte da população em todo o mundo. Ao longo do último século, a cheia tem sido um dos desastres mais devastadores, tanto em termos de danos à propriedade quanto de vítimas humanas. As principais consequências causadas pelas enchentes são, perda de vidas humanas, danos/perdas em edificações causados pela entrada de água nas estruturas construídas, erosão extensiva causada pela alta velocidade das águas durante a propagação das cheias, perdas dos plantios e de animais devido à inundação em áreas agrícolas.

O fenômeno de cheia fluvial causam impactos consideráveis, tanto para países desenvolvidos quanto para países em desenvolvimento, segundo Bautzer (2011). Nos EUA, a cheia do rio Mississipi que ocorreu em 2011, cerca de 1,45 milhões de hectares ficaram submersos trazendo um prejuízo em torno de nove milhões de dólares, segundo o economista Michael Hicks, diretor do Centro de Pesquisa Econômica da Ball State University, do Tennessee.

Dentre inúmeros problemas sociais que afetam o Brasil e o mundo, o crescimento populacional desordenado associado a omissão dos governos tem levado a população carente a habitar áreas consideradas como zonas de risco, localizadas a margens de rios e córregos. No Brasil cidades como Manaus, cerca de 30% de sua população vivem nos mais diversos igarapés urbanos da cidade, ficando exposta a qualquer tipo de enchente proveniente da bacia do Rio Negro, além de problemas de saneamento básico. No Nordeste, o rio Granjeiro localizado na cidade do Crato, estado do Ceará, chegou a transbordar e deixar várias famílias desabrigadas no ano de 2019.

Prejuízos causados pelas cheias vão desde impactos sobre a saúde humana, imóveis, infraestrutura no transporte urbano até outros como danos à propriedade. Em contrapartida, a fim de diminuir os gastos com estes prejuízos o governo sanciona a Lei 12.608/2012, onde o artigo 3º da mesma lei, dentre outras providências, a lei diz que cabe aos municípios criar mecanismos de controle e fiscalização para evitar a edificação em áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos.

Esta realidade não se restringe apenas ao Norte ou ao Nordeste do Brasil. É uma realidade do mundo contemporâneo. A sociedade como um todo, deve-se perguntar que providências a curto prazo devem ser tomadas para resolver ou minimizar o problema das cheias. Sob a ótica científica os estudos devem ser voltados a buscar informações pertinentes sobre os mecanismos das cheias. Como se dá? Quais parâmetros hidrológicos e hidráulicos de uma bacia

interferem no movimento e na intensidade dessa onda? Como esses parâmetros podem interferir na celeridade de propagação das mesmas? Quais os riscos do evento? Quais as garantias? Respostas a estas perguntas que podem permitir aos gestores e responsáveis pela defesa civil tomar medidas cabíveis sobre o problema e tentar minimizar os impactos do movimento dessa massa hídrica nas vidas destas populações.

Neste contexto, esta pesquisa se justifica na importância de compreender o comportamento dos modelos de propagação de cheias em função dos parâmetros hidrodinâmicos, por meio de modelos simplificados, tendo como metodologia proposta baseada na Teoria *fuzzy*, a fim de abranger as incertezas presentes nos processos hidrológicos e avaliar os riscos de cheias. Com isso permitirá uma alternativa de avaliação de riscos em modelos hidrodinâmicos e assim que poderá contribuir aos gestores nas questões pertinentes a planejamento de ocupação dessas áreas.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho foi organizado em cinco capítulos. O presente capítulo trata da abordagem introdutória do estudo, sendo apresentados os objetivos, a justificativa de se realizar tal pesquisa e como o documento foi organizado.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre propagação de cheias, abordando as teorias usadas para alcançar o objetivo desta pesquisa além de uma revisão dos principais trabalhos com respeito a este tema, destacando a importância dos modelos matemáticos, a teoria *Fuzzy* no estudo da propagação das ondas dinâmica, difusa e cinemática em canais naturais, e sobre análise de risco e incertezas presentes no estudo.

No Capítulo 3 expõe-se a metodologia utilizada para o estudo sobre os modelos hidrodinâmicos como a propagação da onda dinâmica, difusa e cinemática tanto sob os aspectos determinísticos quanto *fuzzy*, apresentando as formulações, os métodos usados para a solução e a estrutura desenvolvida do programa computacional para gerar tais resultados que serão compilados no Capítulo 4.

O Capítulo 4 exhibe uma análise dos resultados obtidos através das simulações geradas pelo programa computacional, e exhibe por meio de gráficos os resultados gerados para as diversas situações simuladas.

O Capítulo 5 discorre sobre as conclusões da pesquisa, salientando algumas recomendações para estudos futuros.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As cheias é o risco natural que mais afeta as pessoas no mundo. As cheias nos rios podem causar grandes perdas de vidas e bens. Refere-se a uma ameaça que atinge territórios localizados nas proximidades da rede hidrográfica, linha de costas, diques e barragens. Segundo a Organização Meteorológica Mundial (OMM), os desastres provocados por enchentes estão aumentando, devido à expansão urbana em planícies aluviais e a influência das mudanças climáticas.

Como destacado por Carvalho (2012) o problema social da ocupação humana em áreas sujeitas à inundação é resultado de um crescimento desordenado das cidades, o que aconteceu antes que qualquer legislação sobre tal aspecto entrasse em vigor. Assim, a ocupação de áreas nos leitos dos rios, denominadas Áreas de Preservação Permanente (APP), é um problema que dificilmente pode ser resolvido por políticas públicas, uma vez que a realocação destes habitantes é uma alternativa de eficiência duvidosa. Pode-se esperar que essas áreas ocupadas sejam protegidas por alguma medida estrutural, ou prevenidas por medidas não estruturais. Ou ainda, que haja fiscalização, por parte de órgão público, para que as construções sejam adequadas estruturalmente, de maneira a minimizar danos.

Muitos dos problemas hidráulicos e hidrológicos envolvem o cálculo da propagação de ondas em canais naturais, baseado na solução das equações de Saint-Venant. As equações de Saint-Venant são equações diferenciais parciais que não podem ser resolvidas analiticamente.

Chen e Chow (1971) apresentaram uma formulação matemática para a análise do escoamento não permanente em canais abertos. Strelkoff (1969) também apresentou equações unidimensionais para escoamento em canais abertos. Yen (1973) apresentou uma dedução mais abrangente das equações para escoamento não permanente de fluidos homogêneos em canais abertos, bem como para fluidos não homogêneos. Tanto Strelkoff (1969) como Yen (1973) assinalaram as hipóteses básicas envolvidas nas equações unidimensionais para escoamento não permanente, comumente usadas para canais abertos, e também enfatizaram as diferenças entre as equações da quantidade de movimento e as equações de energia.

Moussa e Bocquillon (1996) mostraram, em seu trabalho, uma outra forma das equações de Saint-Venant para a continuidade e para a quantidade de movimento. Os autores também mostraram a classificação das ondas em rios para as respectivas formas da equação da quantidade de movimento. O trabalho trouxe ainda o desenvolvimento de um método quantitativo para identificar os tipos de ondas em rios. Então, no caso particular da equação da onda difusiva,

orientou o usuário na escolha do algoritmo de diferenças finitas e especificar o erro introduzido pelo algoritmo computacional selecionado. No estudo, dois casos foram discutidos. O primeiro, para um dado evento de cheia e para um dado algoritmo de propagação de cheia, estima o erro introduzido pelo esquema numérico. O segundo, propõe uma metodologia para otimizar a escolha do método de propagação de cheia e para determinar os intervalos adequados de espaço e tempo, que forneçam um erro menor do que um limiar definido pelo usuário.

Smith (1980) apresentou, resumidamente, a equação de propagação de cheia pela onda cinemática, discutindo e estabelecendo as condições necessárias fundamentais para a sua aplicação com sucesso.

Stepien (1984) que desenvolveu um programa computacional, escrito em linguagem FORTRAN IV, para resolver as equações de escoamento não permanente. Ele investigou o escoamento não permanente abaixo da estação hidráulica no rio Vistula, Polônia. O autor usou o método implícito de quatro pontos para resolver as equações de Saint-Venant. Os resultados de experimentos numéricos foram comparados, com sucesso, com as séries registradas de escoamento para várias medidas de profundidade de controle nos 60km ao longo do rio Vistula na Polônia.

2.1 Equações de Saint-Venant

A equação integral da quantidade de movimento originada do teorema de transporte de Reynolds, para um escoamento não permanente e não uniforme, pode ser aproximada para o escoamento de um fluido incompressível, em rios ou canais, para descrever a propagação da onda de cheia, resultando nas equações de Saint-Venant. Este estudo do escoamento não permanente em canais começou no início do século XIX, com os trabalhos de Laplace e Lagrange, em 1871, o matemático francês Barre de Saint-Venant desenvolveu duas equações parciais diferenciais para o escoamento não permanente (YEVJEVICH, 1975). Estas equações são obtidas a partir da aplicação dos princípios da continuidade (equação 2.2) e da quantidade de movimento (equação 2.11), conhecidas como equações de Saint-Venant (CUNGE *et al.*, 1980), descrevem o fluxo não permanente para um canal aberto.

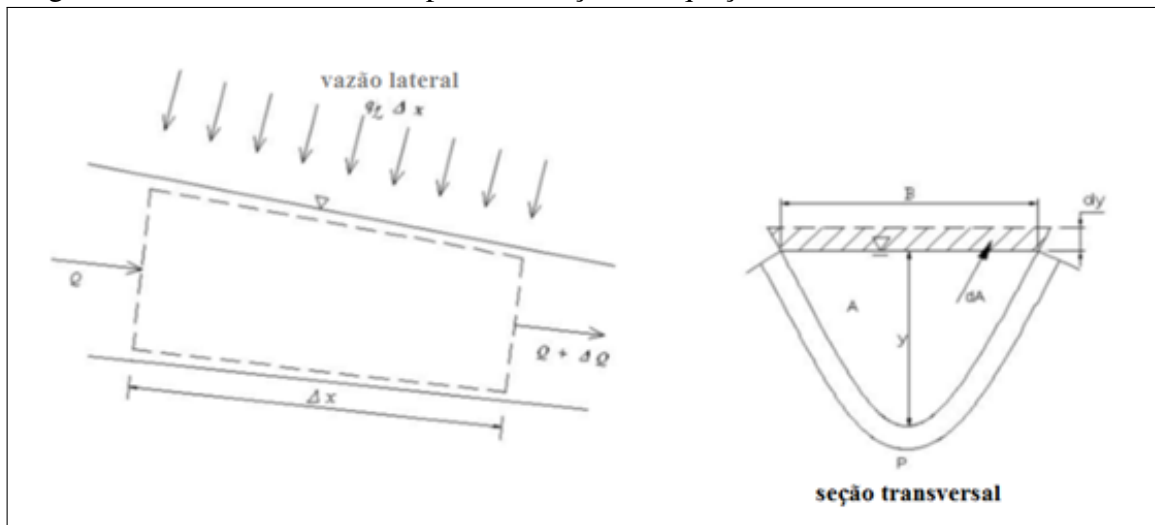
Embora as equações da continuidade e momento possam ser derivadas de inúmeras maneiras, o método de volume de controle pequeno é o mais aplicado, mas de comprimento finito, Δx , onde é reduzido até comprimento zero no limite, a fim de se obter a equação diferencial final. As seguintes considerações foram admitidas (STURM, 2001):

- Escoamentos de águas rasas são negligenciados as acelerações verticais, resultando em uma distribuição de pressão, na vertical, hidrostática. Isto é, profundidade, y , é muito pequena quando comparada com o comprimento de onda cheia;
- A declividade de fundo do canal é pequena, de modo que $\cos^2\theta$ nas formulações da força de pressão hidrostática é aproximadamente unidade, e $\sin\theta \approx \tan\theta=S_0$, a inclinação do leito do canal, onde θ é o ângulo do leito do canal em relação a horizontal;
- O leito do canal é estável, de modo que as elevações do leito não variam com o tempo. Isto implica que não foram considerados neste estudo, os conceitos de fundo móvel devido o movimento de sedimentos, aplicados em rios naturais;
- O escoamento é considerado unidimensional, a profundidade e a velocidade variam apenas na direção longitudinal do canal. Isto implica que a velocidade é constante e a superfície da água é horizontal numa seção perpendicular ao eixo longitudinal do canal;
- A resistência de atrito no fundo do canal é a mesma tanto para escoamentos não permanentes quanto para escoamentos permanentes, de modo que as equações de *Manning* ou *Chezy* podem ser usadas a fim de avaliar a tensão de cisalhamento no fundo do leito.

2.2 Equação da Continuidade

A primeira equação fundamental do escoamento em rios e canais é a equação da continuidade. Ela é deduzida a partir do princípio da conservação de massa, aplicado ao elemento de controle, definido pelo trecho de um rio. Considere o volume de controle de altura igual à profundidade, y , e comprimento, Δx , conforme mostrado na Figura 1

Figura 1 – Volume de controle para a dedução da equação da continuidade



Fonte: Adaptado de Sturm (2010)

Aplicando o princípio da conservação de massa nesse referido volume de controle, temos que o balanço de massa do fluido que entra e sai do volume de controle é igual à variação temporal da massa fluida no interior do referido volume. (CHOW, 1988). Isto pode ser expresso como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t - q_L \Delta x \Delta t = - \frac{\partial A}{\partial t} \Delta x \Delta t \quad (2.1)$$

onde:

Q = Vazão média no interior do canal natural;

q_L = contribuição lateral por unidade de comprimento do canal natural;

A = Área da seção transversal do fluxo;

Δx = comprimento do volume de controle;

Δt = intervalo de tempo relativo ao volume de controle.

Dividindo a 2.1 por $\Delta x \Delta t$, admitindo que não há contribuição lateral (isto é, $q_L=0$) e rearranjando temos que a equação da continuidade é:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (2.2)$$

2.3 Equação da Quantidade de Movimento

O princípio de conservação da quantidade de movimento linear diz que: a taxa de variação da quantidade de movimento é igual ao somatório das forças que agem num fluido,

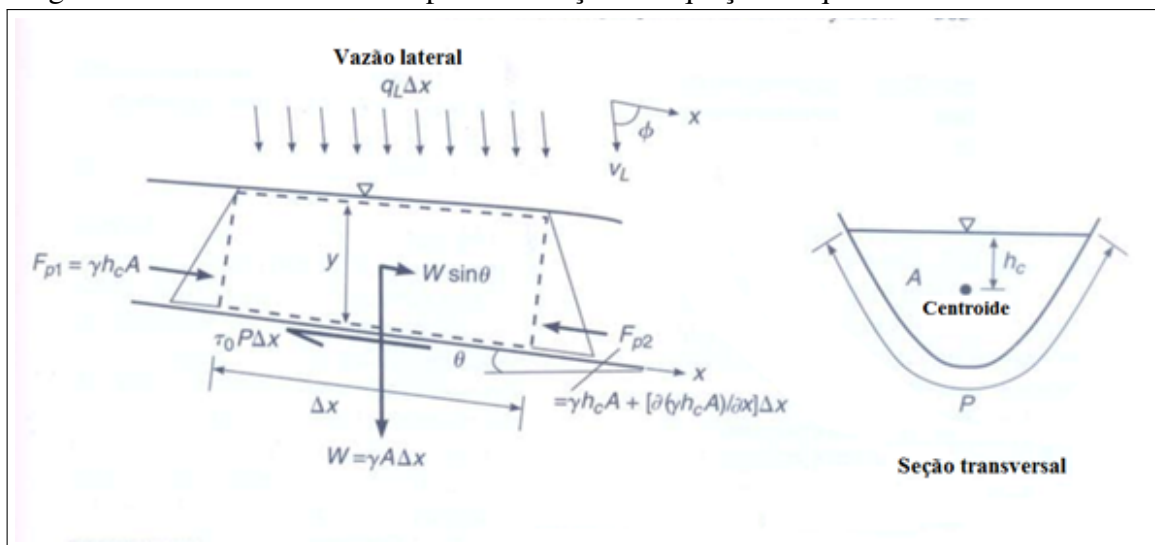
logo:

$$\frac{\partial(m.\vec{V})}{\partial t} = \sum \vec{F} \quad (2.3)$$

Em que: $m.\vec{V}$ é a quantidade de movimento linear e $\sum \vec{F}$ é a força resultante que age no fluido. Observe que esta expressão corresponde à segunda lei de Newton ($\vec{F} = m.\vec{a}$) formulada na mecânica clássica.

A equação da quantidade de movimento é derivada conforme a figura 2, cujas forças atuantes no volume de controle são mostradas. Forças gravitacional, de cisalhamento e de pressão são consideradas, e estes devem balancear a taxa de variação do momento no tempo dentro do volume de controle e o fluxo do momento saindo do volume de controle. Na direção x , onde indica à direção do fluxo, a equação do momento pode ser escrita

Figura 2 – Volume de controle para a dedução da equação da quantidade de momento



Fonte: Adaptado de Sturm (2010)

$$\sum \vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (2.4)$$

F_g representa a força gravitacional ao longo do canal devido ao peso da água no volume de controle é definida por:

$$F_g = \rho . g . A . S_0 . dx \quad (2.5)$$

cuja declividade de fundo do canal, S_0 , é igual a $-\partial z/\partial x$ e g é a aceleração da gravidade.

F_f representa a força de atrito que se desenvolve nas paredes do corpo hídrico e é definida por:

$$F_f = \rho \cdot g \cdot A \cdot S_f \cdot dx \quad (2.6)$$

sendo S_f é a declividade da linha de energia.

F_p representando a força de pressão, no elemento fluido considerado, definida por:

$$F_p = -\rho \cdot g \cdot A \cdot \frac{\partial y}{\partial x} \cdot dx \quad (2.7)$$

A avaliação do fluxo da quantidade de movimento na entrada e saída do elemento fluido é feita através das formulações abaixo. Na entrada do volume de controle:

$$\iint \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = -\rho V Q \quad (2.8)$$

Na saída do volume de controle:

$$\iint \vec{V} \cdot \rho \cdot \vec{V} \cdot d\vec{A} = \rho \left[V Q + \frac{\partial(VQ)}{\partial x} dx \right] \quad (2.9)$$

A variação temporal da quantidade de movimento dentro do volume de controle é dada por:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{VC} \vec{V} \cdot \rho \cdot dV = \rho \frac{\partial Q}{\partial t} dx \quad (2.10)$$

Substituindo 2.4 a 2.10, e rearranjando tem-se a equação da quantidade de movimento, conforme:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (2.11)$$

A equação 2.11 descreve os processos físicos que governam a quantidade de movimento do fluido. Da esquerda para direita, o primeiro termo da equação 2.11 é o termo da aceleração local, que descreve a variação do momento devido a mudanças temporais na velocidade, o segundo termo é o da aceleração convectiva, que descreve a mudança no momento

devido à mudança de velocidade ao longo do canal S_0 , o terceiro é o termo da força de pressão, proporcional à mudança da profundidade de água ao longo do canal, o quarto é o termo da força da gravidade, proporcional à declividade de fundo do canal, e o quinto é o termo da força de atrito, proporcional à declividade da linha de energia. Os termos da aceleração local e convectiva representam o efeito das forças de inércia no escoamento (CHOW, 1988).

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores vêm tentando estabelecer diferentes modelos matemáticos para o estudo da propagação de cheias, como ferramenta de previsão, de modo que surjam perspectivas de cenários e soluções para essas questões. Com o intuito de facilitar as tomadas de decisões aos processos envolvidos, auxiliar as medidas corretivas apropriadas para o monitoramento da hidrodinâmica fluvial, avaliar a extensão e os possíveis impactos causados frente a um evento de cheia e também os parâmetros do modelo que possam servir como valores de referência para outras bacias hidrográficas (FENTON, 2019; MOUSSA; MAJDALANIB, 2019; LIU *et al.*, 2018; HSIEH *et al.*, 2019)

2.4 Teoria *Fuzzy*

A Lógica *Fuzzy* desperta atualmente um interesse geral por parte dos pesquisadores, dos engenheiros e das industriais, e em geral por parte de todos aqueles que necessitam da formalização de métodos empíricos, da generalização do raciocínio natural, da automatização de decisões, da construção de sistemas artificiais realizando os empreendimentos a que os humanos se propõem (TANSCHKEIT; SHARF,).

Teoria dos conjuntos *fuzzy* é um método usado para caracterizar e quantificar incertezas e imprecisões em dados e relações funcionais (ZADEH, 1965; ZIMMERMANN, 1985). Conjuntos *fuzzy* são especialmente úteis quando o número de um certo dado não é suficiente para caracterizar a incerteza de medidas envolvendo a frequência de estimações, tais como média, desvio-padrão, ou qualquer tipo de distribuição.

Do ponto de vista histórico, a questão da incerteza nem sempre foi aceita dentro da comunidade científica (KLIR; YUAN, 1995). Na visão da ciência tradicional a incerteza representa um estado indesejável que deve ser evitado a todo custo. Esta era a visão da ciência até o final do século XIX, quando os físicos perceberam que a visão da Mecânica Newtoniana não resolvia os problemas a nível molecular.

Os conhecimentos disponíveis que temos sobre uma situação qualquer são geralmente imperfeitos, seja porque tenhamos uma dúvida sobre sua validade, portanto são incertos, seja

porque nos coloquem uma dificuldade para que os expressemos claramente, sendo, portanto, imprecisos. (TANSCHKEIT; SHARF,).

De acordo com Ross *et al.* (2002) o valor de qualquer um desses tipos de informação na tomada de decisões é uma questão de preferência, mas controversa, pontos de vista contrários foram oferecidos durante a análise. Modelos *fuzzy* não são substitutos de modelos de probabilidade.

Segundo Barreto (2001), assim como a lógica de primeira ordem tem sua correspondente na teoria dos conjuntos clássicos, a lógica difusa tem sua correspondente na teoria dos conjuntos difusos.

2.4.1 Conjuntos Fuzzy

Um conjunto *fuzzy* é um conjunto aos quais os elementos apresentam diferentes graus de pertinência. Esta ideia é o conceito contrário ao aplicado com conjuntos clássicos, ou *crisp*, porque os membros de um conjunto *crisp* não seriam pertinentes, a menos que a sua pertinência fosse total, ou completa, naquele conjunto (isto é, a sua pertinência é atribuído um valor igual a 1).

Elementos de um conjunto *fuzzy* são mapeados para um universo de valores de pertinência utilizando uma forma de função-teórica. Nesta pesquisa os conjuntos *fuzzy* serão identificados com o acento til, $\tilde{}$, acima da letra que identifica o conjunto. Assim, \tilde{A} , poderia ser o conjunto *fuzzy* A. De acordo com Zadeh (1965), esta função mapeia elementos de um conjunto *fuzzy* \tilde{A} para um valor de número real no intervalo de 0 a 1. Se um elemento no universo, dizem x , é um membro do conjunto *fuzzy* A. Assim este mapeamento funcional é dado como:

$$\mu_{\tilde{A}} \in [0, 1] \quad (2.12)$$

Em que, o símbolo $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é o grau de pertinência do elemento x em um conjunto *fuzzy* \tilde{A} . Entretanto, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ é um valor no intervalo de uma unidade que mede o grau para qual elemento x pertence ao conjunto *fuzzy* \tilde{A} , isto é, $\mu_{\tilde{A}}(x) = \text{grau}$ para cada $x \in [0, 1]$.

2.4.2 Formato das funções de pertinência

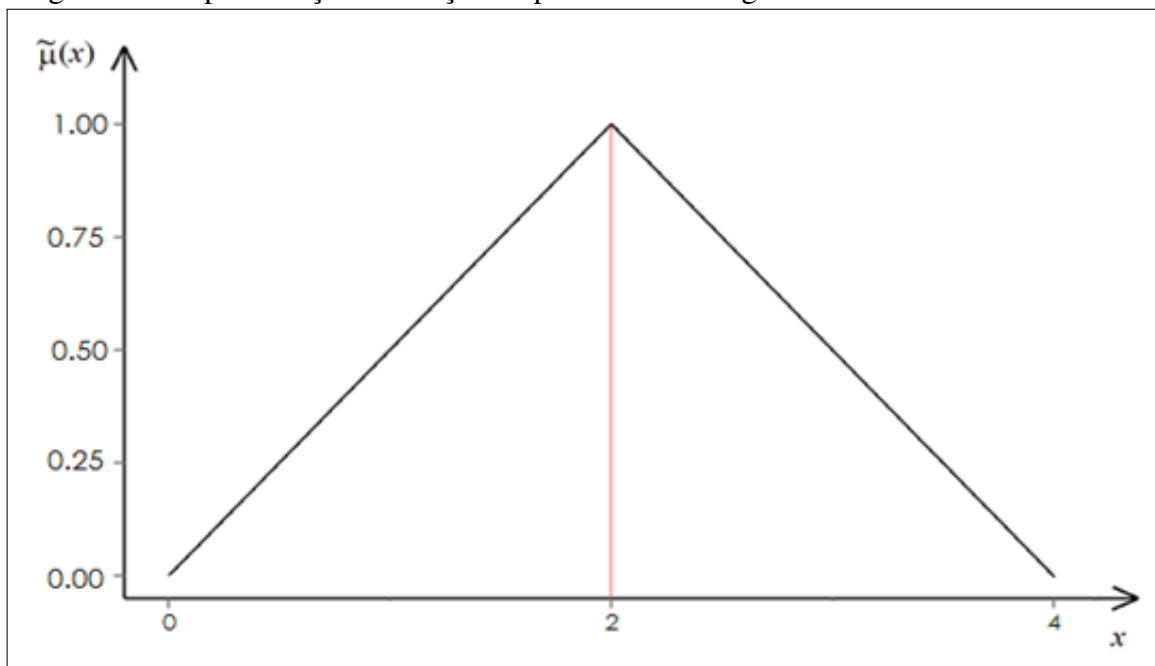
Os formatos mais comumente utilizados para funções de pertinência são os triangulares, os trapezoidais e os gaussianos.

Funções de Pertinência Triangulares

As funções de pertinência triangulares são caracterizadas por um terno (a, b, c), onde a e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b é o ponto onde a função de pertinência é máxima (FIGURA 3). Cujas função é dada:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases} . \quad (2.13)$$

Figura 3 – Representação da função de pertinência triangular



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

A Figura 3 exibe a representação da função de pertinência triangular onde pode-se destacar para os pontos $a=0$, $b=2$ e $c=4$. Destacando que encontram-se no eixo vertical os valores do grau de pertinência e no eixo horizontal os valores da variável que se quer estudar.

Funções de Pertinência Trapezoidais

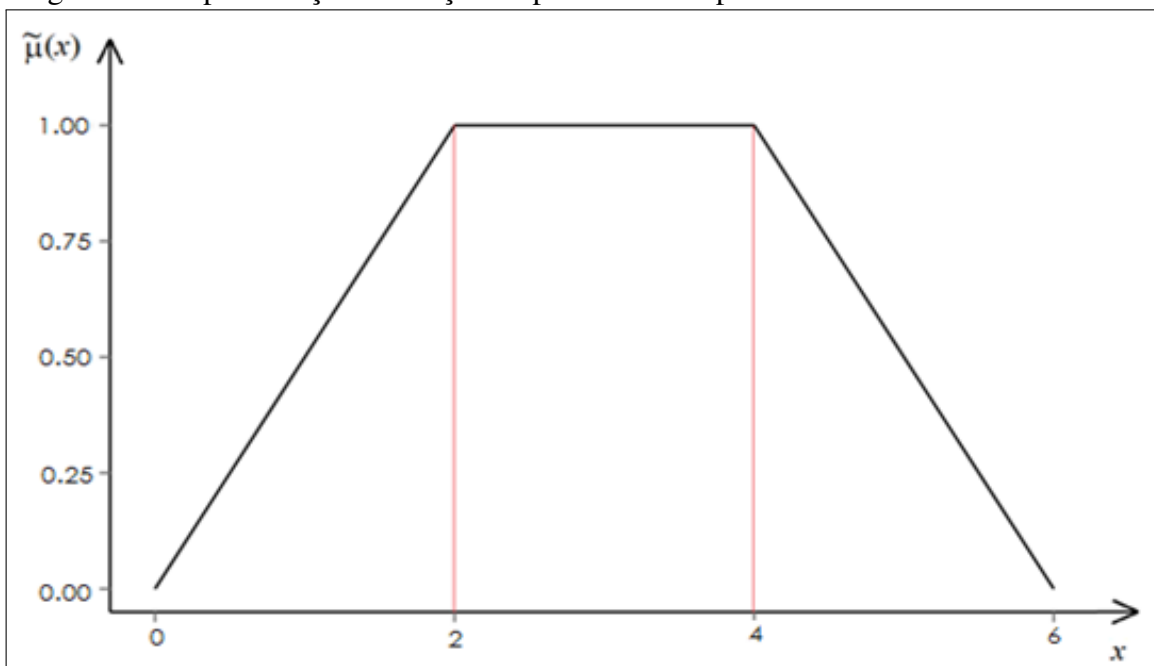
As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores de a, b, c e d, onde a e d determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência

assume valores diferentes de zero, e b e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1. A equação 2.14 expressa essa função:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-b} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases} \quad (2.14)$$

A Figura 4 exibe a representação da função de pertinência trapezoidal onde são destacados os pontos $a=0$, $b=2$, $c=4$ e $d=6$. Destacando que encontram-se no eixo vertical os valores referente ao grau de pertinência e no eixo horizontal os valores da variável que se quer estudar.

Figura 4 – Representação da função de pertinência trapezoidal



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

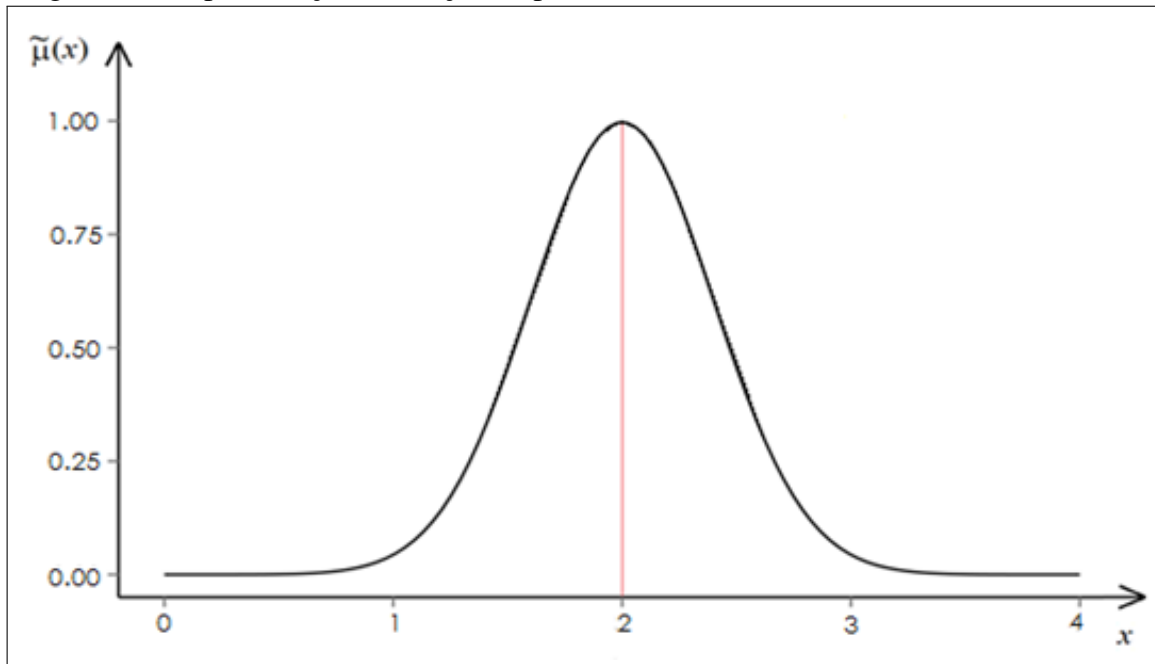
Funções de Pertinência Gaussiana

As funções de pertinência Gaussianas são caracterizadas pela sua média (ϑ) e seu desvio padrão (σ). Este tipo de função de pertinência tem um decaimento suave e tem valores diferentes de zero para todo domínio da variável estudada (FIGURA 5).

A equação 2.15 expressa a função de pertinência Gaussiana:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \text{ está fora do domínio} \\ \exp\left(\frac{-(x-\vartheta)^2}{2\sigma^2}\right) & \end{cases} \quad (2.15)$$

Figura 5 – Representação da função de pertinência Gaussiana



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

2.4.3 Operações aritméticas com números Fuzzy

A aritmética *fuzzy* clássica é baseada no princípio de extensão de Zadeh (ZADEH, 1975). Com base nos modelos matemáticos de números e variáveis *fuzzy*, um conjunto de operações aritméticas *fuzzy* pode ser formalmente definido nesta seção. Os operadores aritméticos *fuzzy* típicos são adição, subtração, multiplicação e divisão, que formam uma estrutura algébrica de aritmética *fuzzy* (ZADEH, 1975; ROSS, 1995; BISC, 2014).

Seja \tilde{A} e \tilde{B} duas variáveis *fuzzy* descritas pelo seguinte conjunto *fuzzy* triangular convexo:

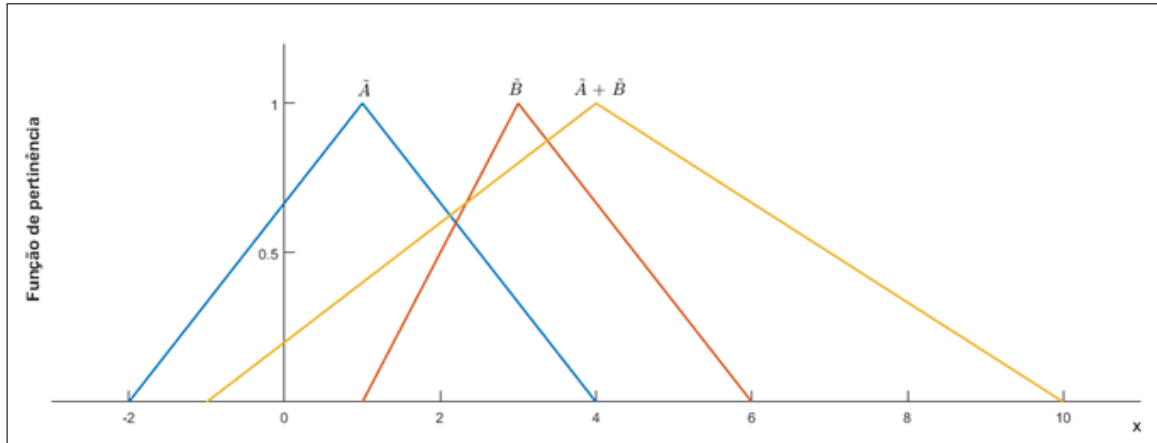
$$\tilde{A} = (a_1, a_2, a_3) \text{ e } \tilde{B} = (b_1, b_2, b_3)$$

Assim operações parciais em números *fuzzy* positivos descritos pela aritmética de intervalos podem ser expressas por:

Adição

$$\tilde{A} + \tilde{B} = [a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3]$$

Figura 6 – Adição *Fuzzy*

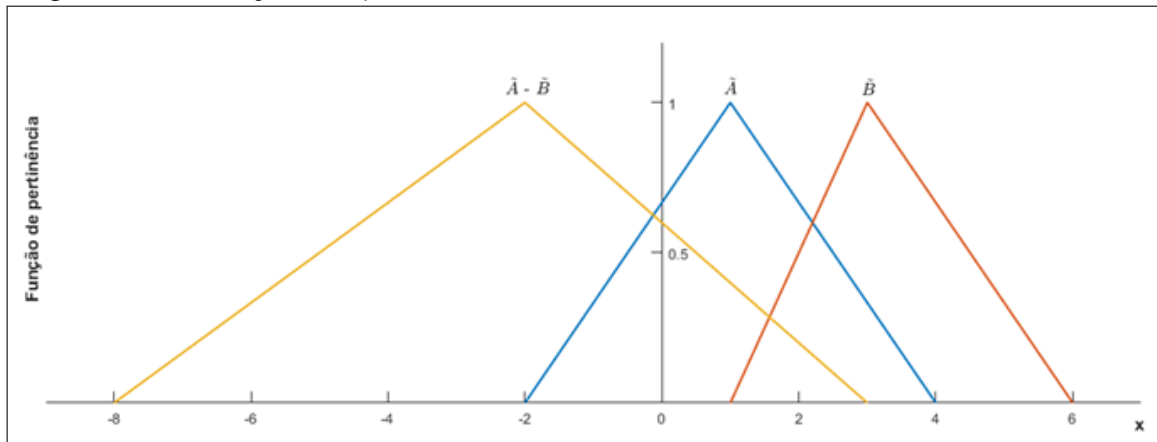


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Subtração

$$\tilde{A} - \tilde{B} = [a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1]$$

Figura 7 – Subtração *Fuzzy*

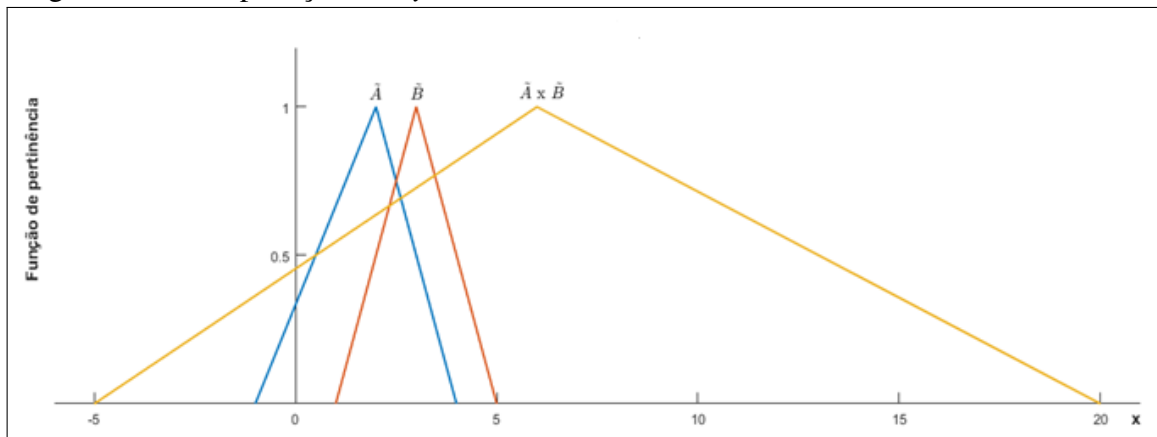


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Multiplicação

$$\tilde{A} * \tilde{B} = [\text{mín} (a_1 * b_1, a_1 * b_3, a_3 * b_1, a_3 * b_3), a_2 * b_2, \text{máx} (a_1 * b_1, a_1 * b_3, a_3 * b_1, a_3 * b_3)]$$

Figura 8 – Multiplicação *Fuzzy*

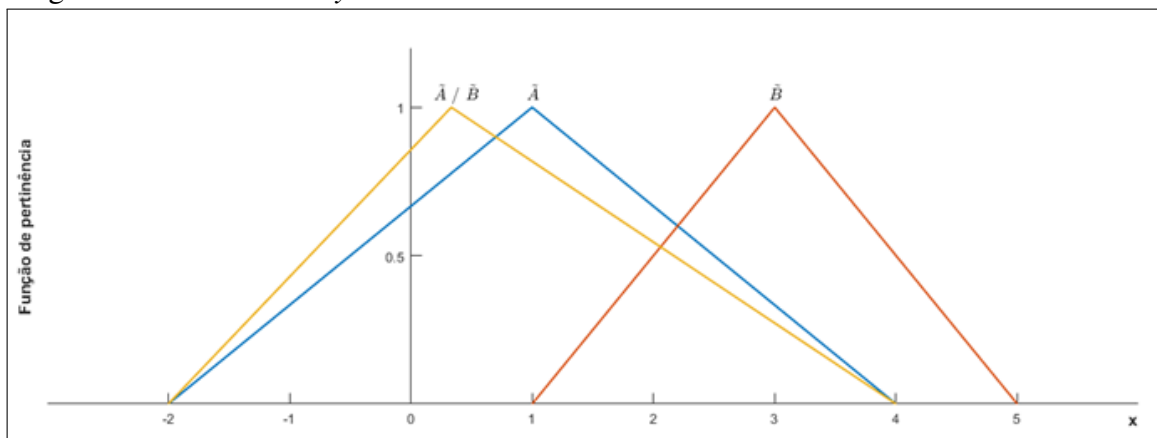


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Divisão

$$\tilde{A} / \tilde{B} = [\text{mín} (a_1 / b_1, a_1 / b_3, a_3 / b_1, a_3 / b_3), a_2 / b_2, \text{máx} (a_1 / b_1, a_1 / b_3, a_3 / b_1, a_3 / b_3)]$$

Figura 9 – Divisão *Fuzzy*



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

2.5 Risco e Confiabilidade *Fuzzy*

Comprender a palavra Risco tem uma importância crescente em nossa sociedade devido permear em diferentes aspectos, áreas e conceitos. Dentre os vários tipos de Riscos têm-se os associados à saúde (CASTIEL *et al.*, 2010), o risco financeiro (MENDES, 2016), risco operacional (TRAPP; CORRAR, 2005) e o risco ambiental (SOUSA; ZANELLA, 2009)

No âmbito da Engenharia, o Risco é a probabilidade ou possibilidade de ocorrência de eventos, fatos ou resultados indesejáveis, ao passo que a Garantia consiste na probabilidade ou possibilidade de ocorrência de eventos agradáveis ou benéficos, muitas vezes chamados de oportunidades. De posse desses conceitos tem-se que a Análise de Risco pode ser definida como uma técnica capaz de avaliar a possibilidade ou ocorrência de um efeito adverso nos seus diversos campos de engenharia (VIEIRA, 2005).

O desenvolvimento de respostas apropriadas para tratar e prevenir a propagação de cheias requer uma análise das interações entre os elementos de uma estrutura de risco que engloba riscos, vulnerabilidades e exposições. Estudos sobre a avaliação de risco de uma propagação de cheia foram propostos considerando, as condições de precipitação e parâmetros morfológicos (ELMOUSTAFA; MOHAMED, 2013; SCHROEDER *et al.*, 2016), avaliação da vulnerabilidade (KONSTANTINOS *et al.*, 2016) e avaliação da exposição (ANDRADE; SZLAFSZTEIN, 2018). Métodos para avaliar riscos também foram propostos em estudos anteriores, incluindo, entre outros, o modelo difuso interior-exterior (ZOU *et al.*, 2012), conjunto fuzzy (LI *et al.*, 2012), método analítico de morfologia (ELMOUSTAFA; MOHAMED, 2013), modelo de rede bayesiana (ABEBE *et al.*, 2018) e abordagem de análise multicritério espacial-explicita (XIAO *et al.*, 2018). Em geral, o processo de avaliação de riscos é relativo à incerteza difusa, sendo estas determinadas por vários fatores naturais e influenciados pelo homem. O conjunto fuzzy é empregado na avaliação de riscos afim de superar as lacunas causadas por termos linguísticos ou conhecimento incompleto (ZADEH, 1965), o conceito de risco fuzzy fornece uma maneira flexível para que informações sejam transmitidas e os métodos quantitativos com suposições e decisões baseadas em especialistas possam ser desenvolvidos (RADMEHR; ARAGHINEJAD, 2016; JIANG *et al.*, 2018).

De acordo com Ganoulis (1994), se um evento, ou realização de um risco, é descrito por meio da lógica fuzzy, então a confiabilidade deste evento pode ser calculada como um número *fuzzy*. Considera-se um sistema que tenha uma resistência \tilde{R} e uma carga \tilde{L} , ambos representados por números *fuzzys*. Uma medida de confiabilidade ou uma marginal de segurança

do sistema pode ser definida como sendo a diferença entre Resistência e a Carga (GANOULIS, 1994; SHRESTHA *et al.*,). Assim, este número *fuzzy* é dado por:

$$\tilde{M} = \tilde{R} - \tilde{L} \quad (2.16)$$

Tomando os intervalos h-nível de \tilde{R} e \tilde{L} como:

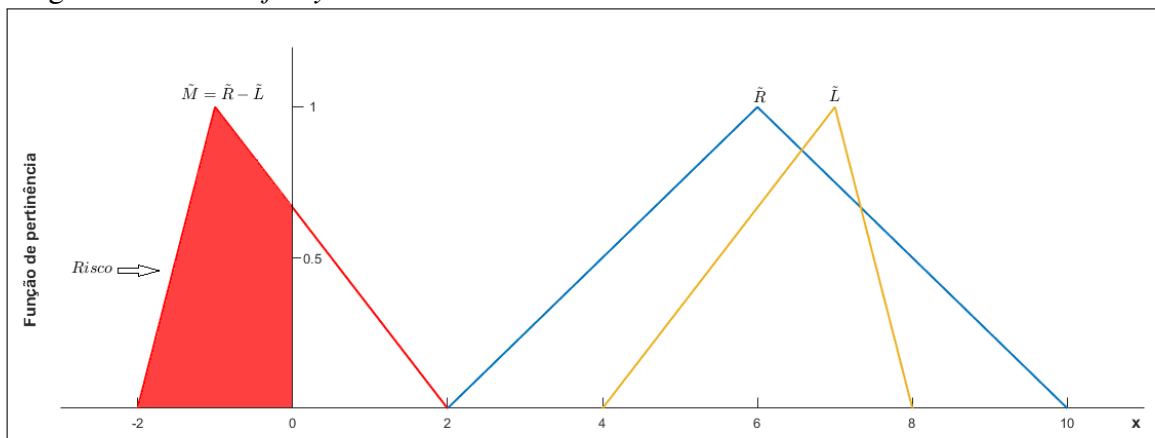
$$R(h) = [R_1(h), R_2(h)]$$

$$L(h) = [L_1(h), L_2(h)]$$

Então, para cada $h \in [0,1]$, a margem de segurança $M(h)$ é obtida subtraindo $R(h)$ de $L(h)$, representado na Figura 10, isto é:

$$M(h) = R(h) - L(h) \quad (2.17)$$

Figura 10 – Risco *fuzzy*



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Duas condições possíveis existem:

- (a) Falha absoluta se $M(h) < 0$ para $\forall h[0,1]$
- (b) Garantia absoluta se $M(h) \geq 0$ para $\forall h[0,1]$

Segundo Chagas (2005), os índices *fuzzy* de confiabilidade e de falha são funcionais e dependem de várias funções como variáveis independentes que podem ser definidas como:

$$R_i = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (2.18)$$

A medida *fuzzy* de confiabilidade, ou índice de confiabilidade *fuzzy*, C_i , é o complemento da equação de risco *fuzzy*, equação 2.18, dada como:

$$C_i = 1 - R_i = \frac{\int_{x>0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (2.19)$$

A partir desta teoria, explanada por Ganoulis (1994), pode-se estabelecer alternativas na tomada de decisão em sistemas hídricos, já que se torna possível identificar o risco e a garantia do sistema, sob condições preestabelecidas e, por conseguinte, facilitar a formulação de políticas de desenvolvimento local.

Vieira *et al.* (2004) demonstraram toda a versatilidade e adequabilidade do uso da teoria dos conjuntos difusos (TCD) nas áreas de recursos hídricos e meio ambiente através da caracterização de danos de inundação, benefícios e riscos econômicos difusos, relações custo/benefício, quantificação de impactos ambientais, indicação de níveis de pertinência de impactos negativos (deterioração ambiental), bem como os riscos ambientais difusos.

3 METODOLOGIA

A metodologia proposta para este estudo consiste na combinação de um conjunto de teorias, aplicado de modo que os objetivos da pesquisa sejam alcançados. Neste capítulo a metodologia proposta é composta das seguintes etapas:

- Resolução das equações de Saint-Venant, através de métodos numéricos, para um corpo hídrico formado por um rio natural. Nesta fase, os parâmetros hidráulicos e hidrológicos, como vazão, área da seção transversal molhada e profundidade, são determinados;
- Desenvolvimento de um modelo matemático capaz de avaliar e analisar os riscos da propagação das ondas de cheias em um rio, quando este está sujeito às variabilidades hidrológicas. Para esta análise, é aplicada a teoria *fuzzy* que utiliza funções de pertinência para avaliar o grau de incerteza de uma determinada variável;
- Desenvolvimento de um programa computacional, em linguagem FORTRAN, para resolver o conjunto de equações diferenciais parciais existentes nas diversas etapas da pesquisa.

3.1 Modelo Hidrodinâmico: Equações de Saint-Venant

A equação de Saint-Venant é composta pela Equação da Continuidade (**equação 2.2**) e pela Equação da Quantidade de Movimento (**equação 2.11**).

3.1.1 Equação da Onda Dinâmica

Para solução das equações de Saint-Venant será usada uma metodologia simplificada proposta por Keskin e Ağiralioglu (1997), onde este modelo da onda dinâmica simplificado considera a calha do rio retangular com largura constante, isto é $A = B.y$. Derivando em relação

a x , e substituindo na equação 2.11 e rearranjando a equação obtem-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2\frac{Q}{A}\frac{\partial Q}{\partial x} + \left(\frac{gA}{B} - \frac{Q^2}{A^2}\right) + gA(S_0 - S_f) = 0 \quad (3.1)$$

Combinando a equação 3.1 com a equação 2.2, pode ser obtida na seguinte forma (KESKIN, 1994):

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{t}} + \varphi \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{x}} + \omega = \mathbf{0} \quad (3.2)$$

em que:

$$\varphi = 2\frac{Q}{A} + \frac{\frac{gA}{B} - \frac{Q^2}{A^2}}{\frac{Q}{A} \left(\frac{5}{3} - \frac{4R_h}{3B}\right)}$$

$$\omega = gA(S_f - S_0)$$

em que:

A = área molhada da seção transversal (m^2); y = nível da água na superfície em relação ao fundo do canal natural ou rio (m); B = largura da calha (m); Q = vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$); t = tempo (s); g = aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-2}$); x = distância linear ao longo do rio (m); S_f = perda de carga devido ao atrito com as margens e o fundo do rio (adimensional); S_0 = declividade de fundo (adimensional);

3.1.2 Equação da Onda Difusa

O modelo da onda difusa emprega a **equação 2.2** e a **equação 2.11** onde os termos de aceleração convectiva e aceleração local foram negligenciados, pois estes possuem valores muito pequenos em relação aos demais termos, mas incorporando o termo de pressão, logo assume a seguinte forma:

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (3.3)$$

Assim combinando a equação 3.3 com a **equação 2.2** de forma a obter a equação final conhecida como a equação da onda difusa:

$$\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{t}} + \mathbf{c} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{D} \frac{\partial^2 \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{x}^2} \quad (3.4)$$

tem-se que:

$c = dQ/dA$ definido como a celeridade (velocidade de propagação) da onda cinemática e $D = Q/2S_0B$ definido como o coeficiente difusivo aparente. Termo este, responsável pela amortização do pico da vazão ao longo do canal, e que será em função da declividade do canal.

3.1.3 Equação da Onda Cinemática

As ondas cinemáticas descrevem escoamentos onde as forças de pressão e as forças inerciais (local e advectiva) são desprezíveis, assim a **equação 2.11** torna-se:

$$S_f = S_0 \quad (3.5)$$

A equação 3.5, associada com a **equação 2.2**, temos a formulação básica da onda cinemática, onde a linha de energia é paralela à linha de fundo do canal.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.6)$$

Onde: $x(m)$ é a distância a jusante, $t(s)$ é o tempo, $c = dQ/dA$ ($m.s^{-1}$) definido como a celeridade da onda cinemática e $Q(m^3.s^{-1})$ é a vazão.

3.2 Formulação Numérica

Um modelo matemático compõe-se das equações que descrevem o fenômeno analisado e das condições de contorno peculiares a cada problema, que podem ser entendidas como as restrições que tornam a solução das equações compatível com o sistema representado. Os modelos matemáticos podem ser analíticos e numéricos, porém, as equações diferenciais que foram empregadas na análise dos modelos hidrodinâmicos: onda dinâmica, difusa e cinemática, de um modo geral, não tem solução analítica simples. Portanto, os engenheiros têm preferido o emprego de técnicas numéricas para a obtenção da solução de tais equações.

Dentre as grandes vantagens do modelo matemático está o poder de verificação de vários cenários para um mesmo sistema, e em sua velocidade com o uso do computador. Além disso, o fator custo na modelagem matemática é menos restritivo. Por outro lado, o modelo numérico traz como desvantagem a necessidade de uma criteriosa discretização de processos que na realidade são contínuos. Demais, a representação de fenômenos físicos através de equações

matemáticas, por vezes, pode constituir um entrave sério por sua complexidade. Por esta razão, os engenheiros tem preferido o uso de modelos numéricos aos analíticos.

Os modelos constituem uma importante ferramenta na gestão de recursos hídricos, permitindo a análise e apresentação de cenários hipotéticos que podem nortear as decisões políticas necessárias ao aproveitamento e controle dos recursos hídricos.

As técnicas numéricas de solução das equações diferenciais mais comumente utilizadas são: o método das características, o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos. Nos métodos diretos, estão as equações expressas por diferenças finitas que são formuladas a partir das equações diferenciais parciais originais para continuidade e quantidade de movimento.

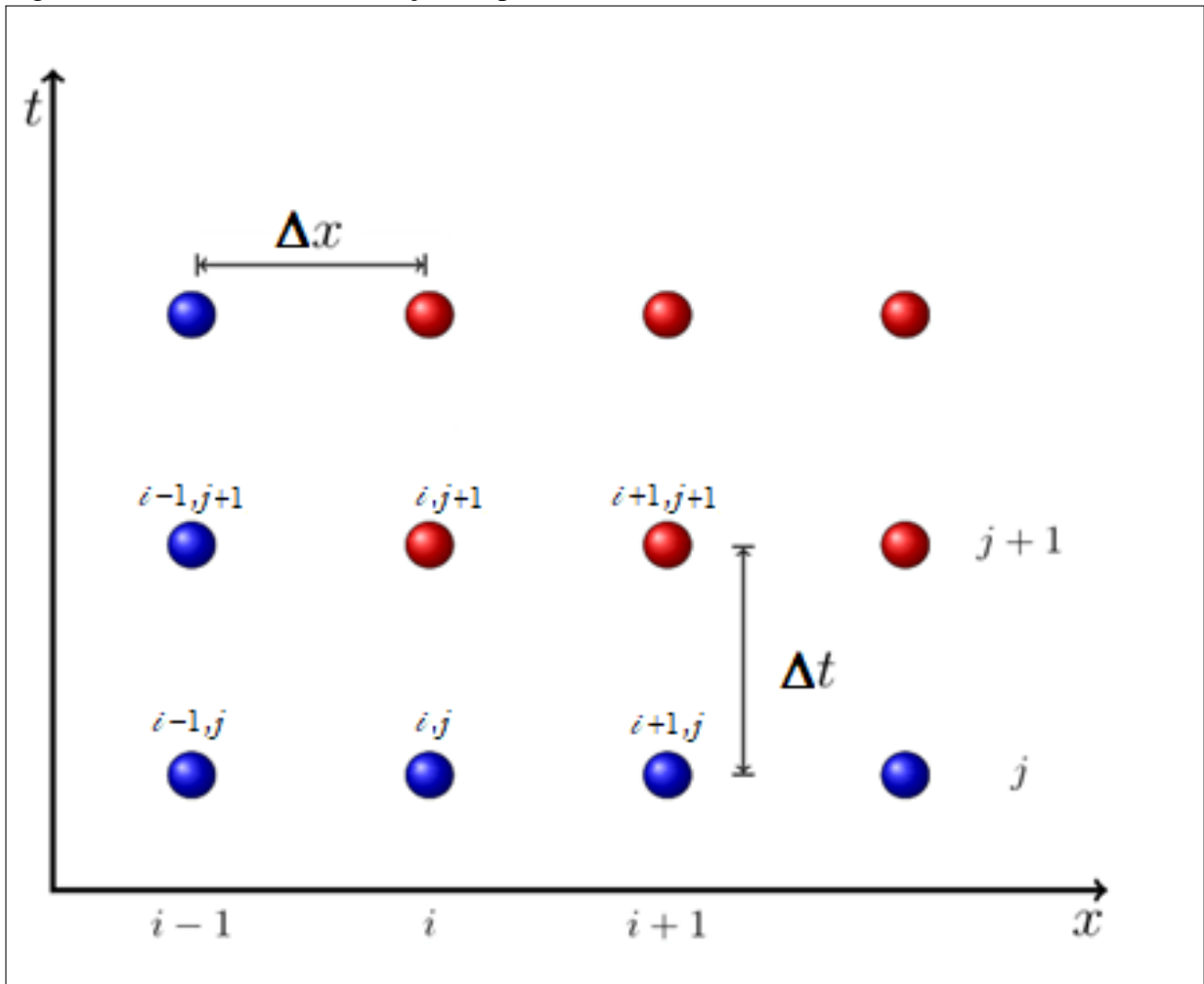
Nesta formulação numérica, o método a ser utilizado será o Método das Diferenças Finitas, por ser considerado um dos mais simples, versáteis e eficientes métodos numéricos na solução dos mais variados e complexos problemas práticos nas várias áreas de engenharia. Dentre os métodos numéricos mais usados atualmente para a solução das equações diferenciais, o Método das Diferenças Finitas é o mais antigo, o mais divulgado e, provavelmente, o mais bem compreendido por se tratar de um método de fácil implementação.

O método das diferenças finitas é um processo numérico de solução de equações diferenciais, ordinárias ou parciais, que consiste, em obter os valores numéricos da função desconhecida em um certo número de pontos espaçados ao longo de um eixo para equações diferenciais ordinárias e distribuídos em um plano para equações diferenciais parciais.

Neste processo de modelagem em estudo, o domínio da função desejada é discretizado através de uma malha ortogonal. A malha é formada por linhas traçadas paralelamente ao eixo dos x , tomado ao longo do canal e na direção da corrente, e por linhas traçadas paralelamente ao eixo dos tempos (t). Os pontos de interseção dessas linhas constituem os nós da malha $x - t$. Cada nó da malha $x - t$ é identificado por um par de índices. O índice inferior i identifica a posição do nó ao longo dos eixos dos x e o índice j superior identifica a posição do mesmo nó ao longo do eixo dos tempos (t). Assim, o índice inferior i é um índice espacial e o índice superior j é um índice temporal. As linhas paralelas ao eixo dos tempos estão espaçadas entre si de Δx e as linhas paralelas ao eixo x estão espaçadas entre si de Δt . O valor de uma função f no nó de índices i e j é o definido como f_i^j . A Figura 11 mostra uma malha no plano $x - t$. onde a linha é representada pelo índice i e a coluna pelo índice j . Os passos no espaço e no tempo são respectivamente iguais a Δx e Δt . Os pontos em azul significa que os valores são conhecidos e o

ponto em vermelho, significa que o valor é desconhecido.

Figura 11 – Malha de discretização no plano $x-t$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

3.2.1 Formulação Numérica para o Modelo da Onda Dinâmica

Na abordagem da diferença finita, o problema de domínio contínuo é "discretizada", de modo que as variáveis dependentes são consideradas de modo a existir somente em pontos discretos. As derivadas são aproximadas pelas diferenças, resultando em uma representação algébrica da equação diferencial parcial (EDP). Assim, o problema envolvendo cálculo é transformado em um problema algébrico.

A idéia de uma representação de diferenças finitas pode ser introduzida por lembrar

a definição da derivada para a função $Q(x, t)$ em $x = x_0$ e $t = t_0$.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{Q(x + \Delta x, t_0) - Q(x_0, t_0)}{\Delta x} \quad (3.7)$$

Como Q é contínuo, é esperado que:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q(x + \Delta x, t_0) - Q(x_0, t_0)}{\Delta x} \quad (3.8)$$

Seja uma aproximação razoável para $\partial Q / \partial x$ suficientemente pequeno, mas um finito Δx . De fato, o teorema do valor médio assegura que a representação da diferença é exata para algum ponto dentro do intervalo Δx . Para o modelo da onda dinâmica, o Modelo das Diferenças Finitas Explícito foi utilizado.

Para resolver a equação 3.2 numericamente, as derivadas parciais de Q em relação ao tempo e espaço são aproximadas na malha $x - t$ como mostrado na Figura 12. O valor desconhecido é $Q_{(i+1)}^{(j+1)}$.

De acordo com a discretização proposta por Chow (1988), temos que a formulação da derivada espacial de Q é encontrada através da relação:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (3.9)$$

A derivada temporal de Q é definida como:

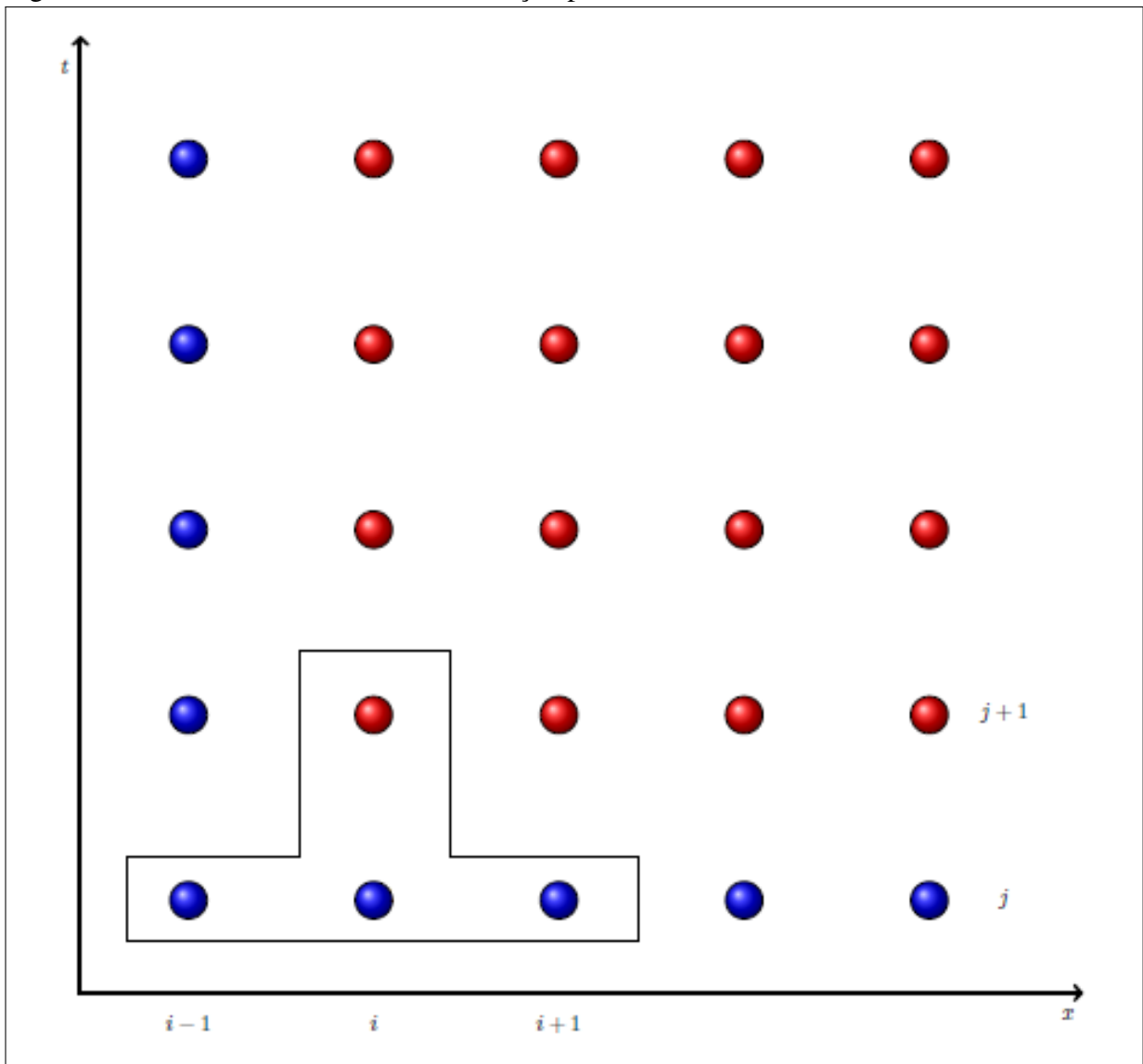
$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Os valores de φ e ω são determinados pela relação:

$$\varphi_m = \frac{\varphi_{i+1}^j + \varphi_i^{j+1}}{2} \quad (3.11)$$

$$\omega_m = \frac{\omega_{i+1}^j + \omega_i^{j+1}}{2} \quad (3.12)$$

Figura 12 – Gráfico de Malha de discretização para onda dinâmica



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

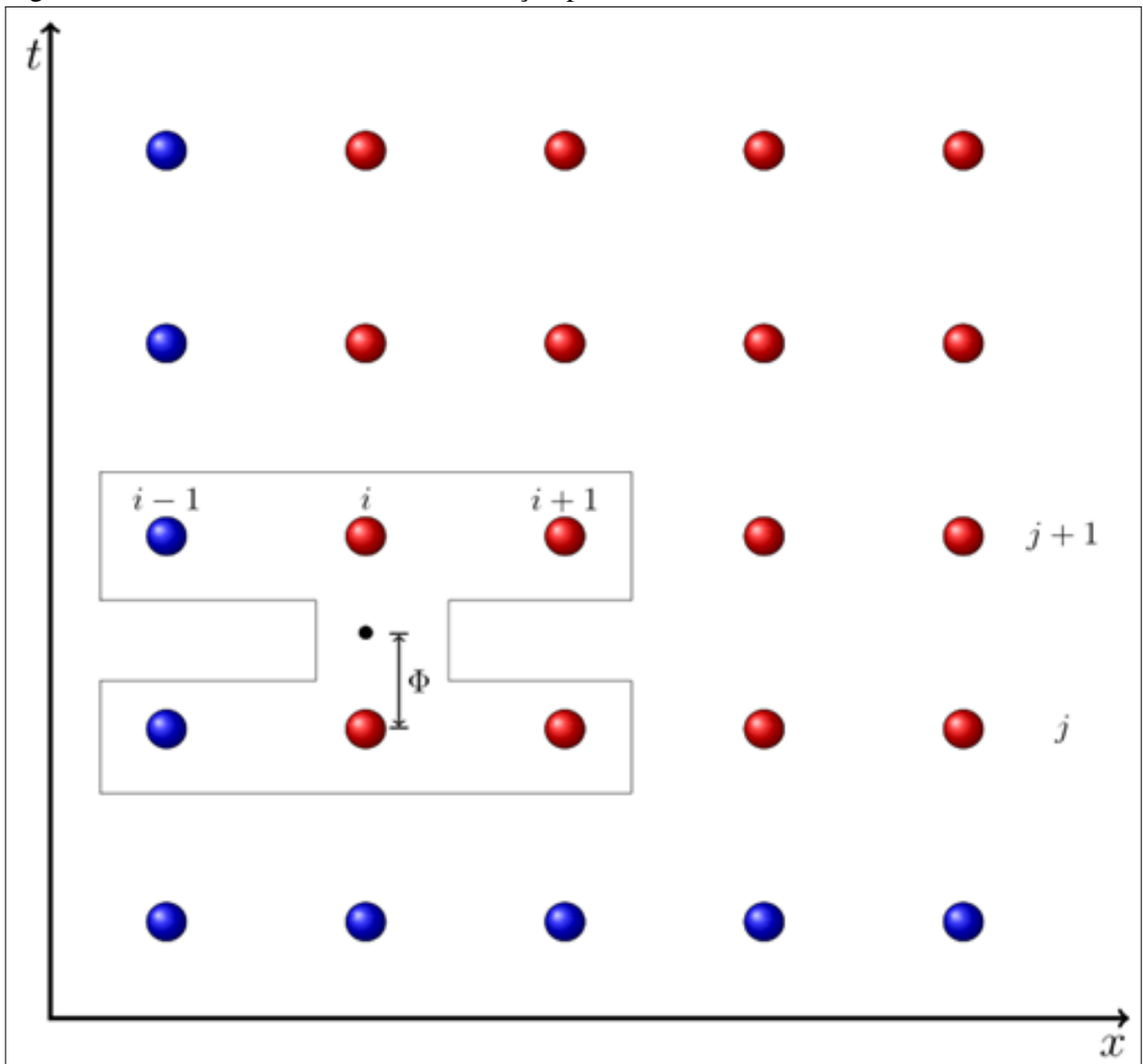
Substituindo as equações 3.9 a 3.12 na equação 3.2 e fazendo todas as devidas simplificações, tem-se:

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} + \varphi_m \left(\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta x} \right) + \omega_m = 0 \quad (3.13)$$

3.2.2 Formulação Numérica para o Modelo da Onda Difusa

Para o modelo da onda difusiva, utilizou-se o Método das Diferenças Finitas Implícito ou Método de Crank-Nicolson, conforme representado na Figura 13 (ANDERSON *et al.*, 2012).

Figura 13 – Gráfico de Malha de discretização para onda difusa



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Discretizando a equação 3.4, conforme o método das diferenças finitas implícito tem-se que a derivada parcial de Q em relação ao tempo, é dada por:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_i^{j+1} - Q_i^j}{\Delta t} \quad (3.14)$$

A derivada parcial de Q em relação ao espaço x , é aproximada por:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \Phi \left[\frac{Q_{i+1}^j - Q_{i-1}^j}{2\Delta x} \right] + (1 - \Phi) \left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i-1}^{j+1}}{2\Delta x} \right] \quad (3.15)$$

A aproximação da segunda derivada parcial, é dada por:

$$\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = \Phi \left[\frac{Q_{i+1}^j - 2Q_i^j + Q_{i-1}^j}{\Delta x^2} \right] + (1 - \Phi) \left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - 2Q_i^{j+1} + Q_{i-1}^{j+1}}{\Delta x^2} \right] \quad (3.16)$$

Como o termo derivativo após a igualdade foi aproximado de Q até o tempo $j + 1$, implica que aparecerão três termos desconhecidos na equação das diferenças, e o procedimento é conhecido como implícito, indicando que a formulação algébrica exigirá a solução simultânea de várias equações envolvendo termos desconhecidos.

Substituindo as equações 3.14 a 3.16 na equação 3.4, e rearranjando tem-se:

$$AAQ_{i-1}^{j+1} + BBQ_i^{j+1} + CCQ_{i+1}^{j+1} = Q_i^j \quad (3.17)$$

sendo:

$$AA = -\alpha - \beta$$

$$BB = 1 + 2\beta$$

$$CC = \alpha - \beta$$

$$\alpha = \kappa_i^{j+1} \cdot \frac{\Delta t}{2\Delta x}$$

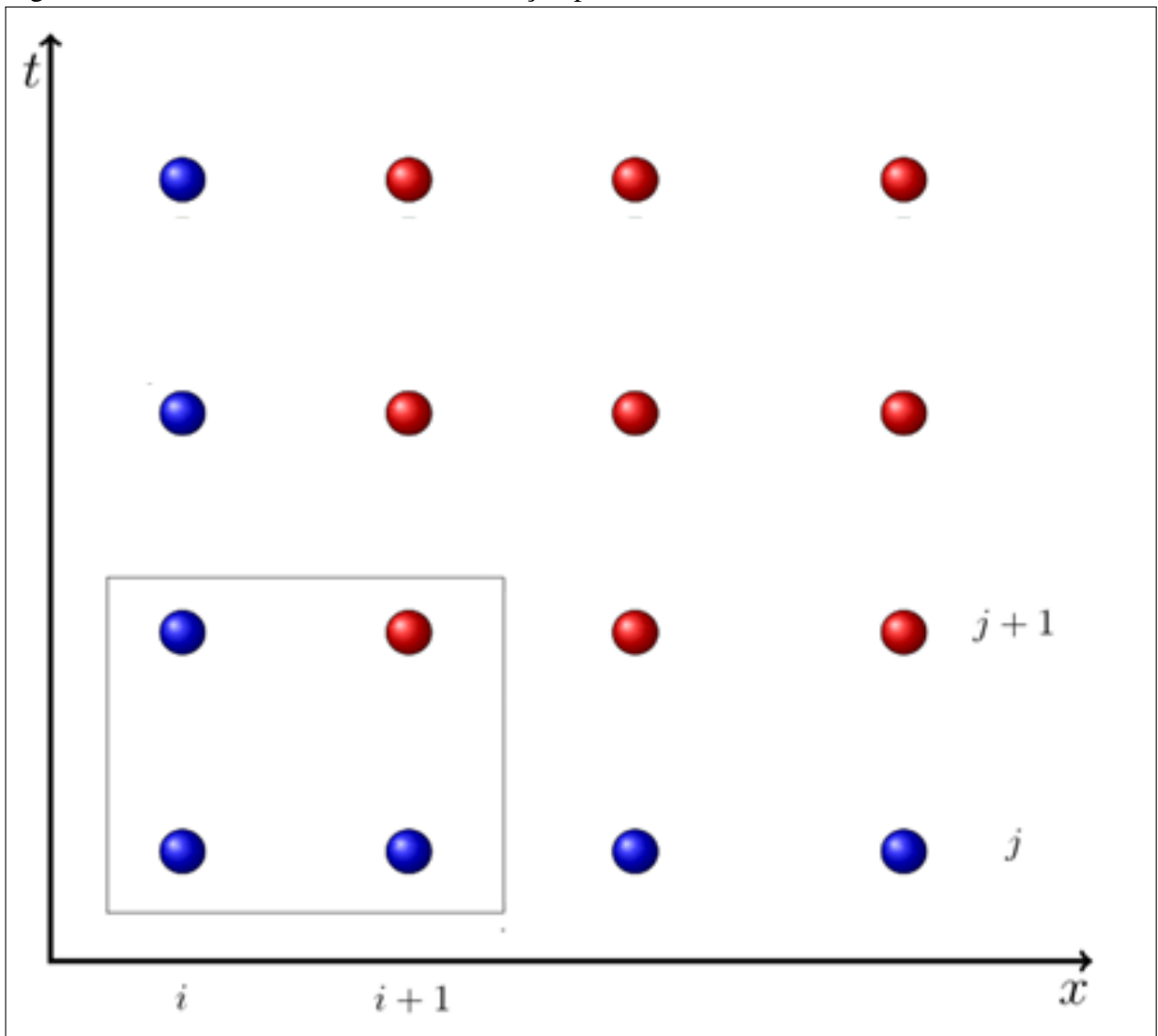
$$\beta = \lambda_i^{j+1} \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2}$$

Admitindo que κ é a forma discretizada do termo dA/dQ e λ é referente ao termo $Q/2BS_0$.

3.2.3 Formulação Numérica para o Modelo da Onda Cinemática

Para obtenção da solução numérica da equação 3.6, as derivadas parciais de Q (vazão) em relação a t e em relação a x , são substituídos por diferenças finitas que são expressões aproximadas de derivadas. No esquema adotado para a avaliação das diferenças finitas, são considerados conhecidos os valores da vazão Q_i^{j+1} e Q_{i+1}^j . E são considerados como desconhecidos e, portanto a determinar, os valores da vazão Q_{i+1}^{j+1} (CHOW, 1988). Para calcular as equações diferenciais contidas no Modelo da Onda Cinemática foi utilizado o Método das Diferenças Finitas Explícito (FIGURA 14).

Figura 14 – Gráfico de Malha de discretização para onda cinemática



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

De acordo com Gomes (2006) as derivadas discretizadas no tempo e no espaço são dadas por:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta x} \quad (3.18)$$

Da mesma maneira a derivada temporal de Q é definida como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta t} \quad (3.19)$$

Discretizando também a celeridade, tem-se:

$$c \approx \frac{1}{\alpha\beta} \left(\frac{Q_{i+1}^j + Q_i^{j+1}}{2} \right) \quad (3.20)$$

Substituindo as equações 3.18 a 3.20 na equação 3.6, obtem-se a equação que segue:

$$\left(\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta t} \right) + c \left(\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta x} \right) = 0 \quad (3.21)$$

3.3 Modelo Hidrodinâmico *Fuzzy*

Como este estudo tem como objetivo a determinação do risco de uma enchente para uma determinada bacia em áreas de inundações, há a necessidade de se levar em consideração a avaliação da incerteza das mais diversas origens presentes no processo de equacionamento e de solução das equações diferenciais do modelo.

Isto é feito, transformando-se as equações 3.2, 3.4 e 3.6 em equações *fuzzys*, como base de transformação dos parâmetros ou entrada do modelo em distribuições de valores para cada parâmetro. Assim, parâmetros como A , Q , c , D , ω e φ são transformados em funções de pertinência definida pela equação:

$$\mu_{\tilde{Z}}(x) = \begin{cases} \frac{Z-Z_L}{Z_M-Z_L} & Z_L < Z < Z_M \\ \frac{Z_U-Z}{Z_U-Z_M} & Z_M < Z < Z_U \end{cases} \quad (3.22)$$

sendo:

Z é o valor do parâmetro no intervalo $[Z_L, Z_U]$;

Z_L é o limite mínimo do intervalo nos números *fuzzy*;

Z_M é o valor do parâmetro considerado como maior grau de pertinência;

Z_U é o limite máximo do intervalo dos números *fuzzy*.

Como pode ser visto sua representação na Figura 3, a função de pertinência usada para definir cada parâmetro foi do tipo triangular, com um valor médio para o maior grau de pertinência e dois valores limites, que equivalem a dilação do número *fuzzy* triangular, ambos com grau de pertinência igual a zero.

Aplicando os parâmetros triangular *fuzzy*: \tilde{A} , \tilde{Q} , \tilde{c} , \tilde{D} , $\tilde{\omega}$ e $\tilde{\varphi}$, tem-se as equações 3.2, 3.4 e 3.6 em suas formas *fuzzy*.

3.3.1 Equação da Onda Dinâmica Fuzzy

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} + \tilde{\varphi} \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} + \tilde{\omega} = 0 \quad (3.23)$$

sendo:

$$\tilde{\varphi} = 2 \frac{\tilde{Q}}{\tilde{A}} + \frac{\frac{g\tilde{A}}{B} - \frac{\tilde{Q}^2}{\tilde{A}^2}}{\tilde{Q}\tilde{A} \left(\frac{5}{3} - \frac{4\tilde{R}_h}{3\tilde{B}} \right)}$$

$$\tilde{\omega} = g\tilde{A}(\tilde{S}_f - \tilde{S}_0)$$

3.3.2 Equação da Onda Difusa Fuzzy

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} + \tilde{c} \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} = \tilde{D} \frac{\partial^2 \tilde{Q}}{\partial x^2} \quad (3.24)$$

sendo:

$$\tilde{c} = \frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{A}}$$

$$\tilde{D} = \frac{\tilde{Q}}{2\tilde{S}_0 B}$$

3.3.3 Equação da Onda Cinemática Fuzzy

$$\frac{\partial \tilde{Q}}{\partial t} + \tilde{c} \frac{\partial \tilde{Q}}{\partial x} = 0 \quad (3.25)$$

sendo:

$$\tilde{c} = \frac{d\tilde{Q}}{d\tilde{A}}$$

tem-se que:

\tilde{A} = função de pertinência para a área transversal do canal do rio;

\tilde{Q} = função de pertinência para a vazão;

\tilde{c} = função de pertinência para a celeridade;

\tilde{y} = função de pertinência para a profundidade;

\tilde{D} = função de pertinência para o coeficiente difusivo aparente;

\tilde{S}_0 = função de pertinência para a declividade do leito do rio;

\tilde{S}_f = função de pertinência para a declividade da linha de energia

3.4 Cálculo de Risco

A solução deste conjunto de equações, mostrado anteriormente, permite determinar as variáveis dependentes, na forma de funções de pertinência. Essas funções são calculadas, ao longo dos trechos do rio, para diferentes tempos. Assim, a equação *fuzzy* dos modelos de propagação de cheias produz um campo de escoamento *fuzzy*, definido por uma função de pertinência para a vazão, uma função de pertinência para a área da seção transversal, uma função de pertinência para a velocidade, e uma função de pertinência para a profundidade do escoamento, sendo esta última a mais importante para o presente trabalho.

A margem de segurança, \tilde{M} , do corpo hídrico, definida no capítulo anterior de fundamentação teórica e expressa através da **equação 2.16**, pode ser representada pela diferença entre a função de pertinência da resistência, \tilde{R} , e a função de pertinência da profundidade calculada, \tilde{y} , que representa a resposta às possíveis ondas de cheias ou chuvas intensas no corpo hídrico.

O risco *fuzzy* é então definido como sendo:

$$R_f = \frac{\int_{-\infty}^0 \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (3.26)$$

A garantia *fuzzy* é definida por:

$$C_f = \frac{\int_{x>0} \mu_{\tilde{M}}(m) dm}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\tilde{M}}(m) dm} \quad (3.27)$$

para as equações 3.26 e 3.27, $\mu_{\tilde{M}}$ é uma função de marginal de segurança, e, m é um elemento de M .

3.5 Aspectos Computacionais

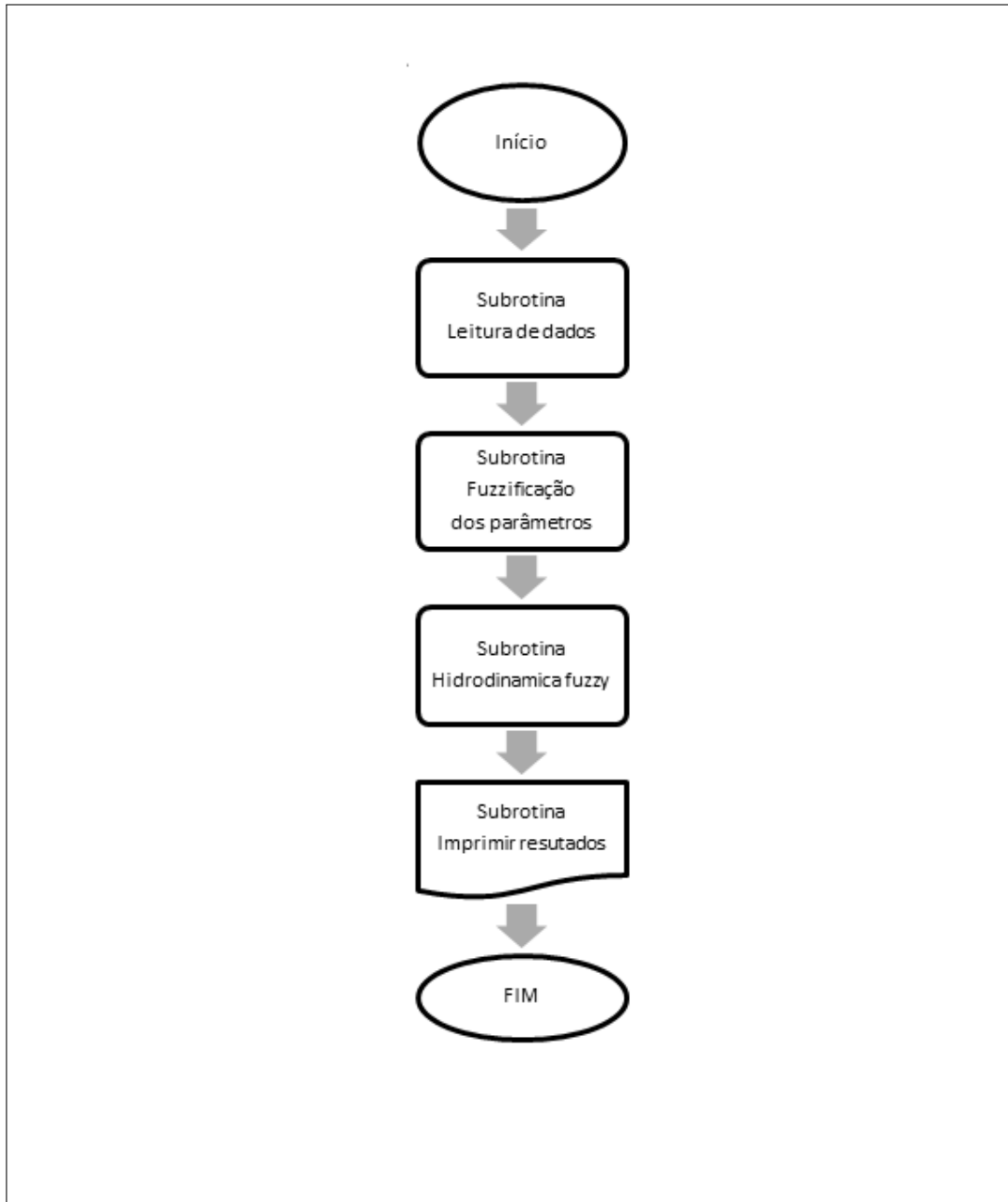
Para esta pesquisa foi desenvolvido um programa computacional com o intuito de resolver as equações diferenciais envolvidas no modelo. Este programa foi escrito em linguagem FORTRAN que permite calcular as variáveis de controle de escoamento de um fluido em rios naturais sob o ponto de vista *fuzzy*. As variáveis determinadas são: vazão, área da seção molhada, velocidade e a profundidade da superfície livre da água no rio.

O programa está dividido em três sub-rotinas bem definidas, conforme Figura 15.

(1) leitura de dados de entrada; (2) “Fuzzificação” dos parâmetros pertinentes aos modelos (3)

determinação dos valores de vazão, velocidade, profundidade, celeridade e área por meio das equações hidrodinâmicas “fuzzificadas”, ou seja, os modelos de propagação de onda dinâmica, difusa e cinemática “fuzzificado”.

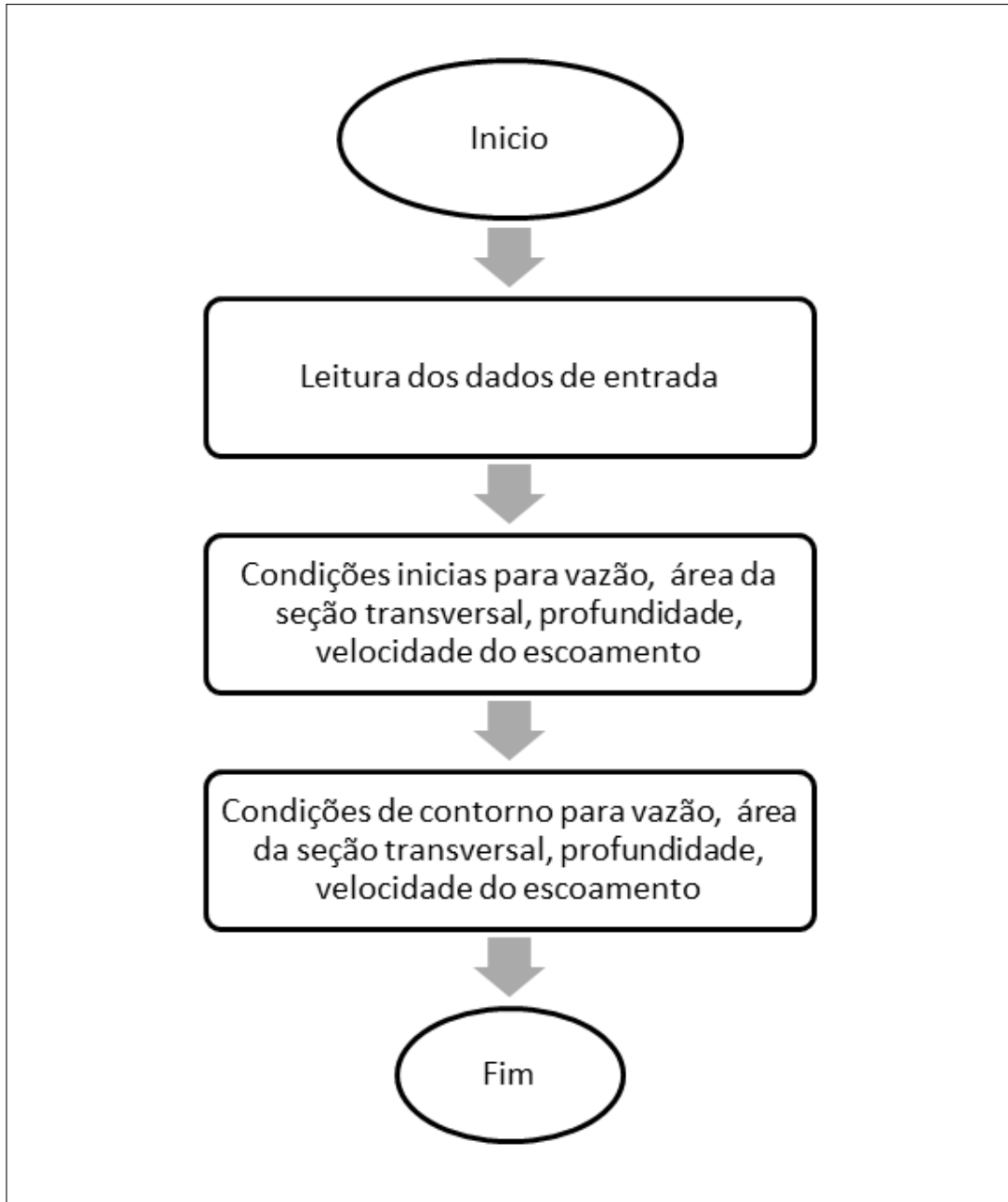
Figura 15 – Fluxograma completo do programa computacional



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

A primeira sub-rotina, Figura 16, trata da leitura dos dados de entrada. Esta sub-rotina permite que os dados referentes às condições iniciais, condições de contorno, os dados geométricos do canal (declividade, número de Manning, largura).

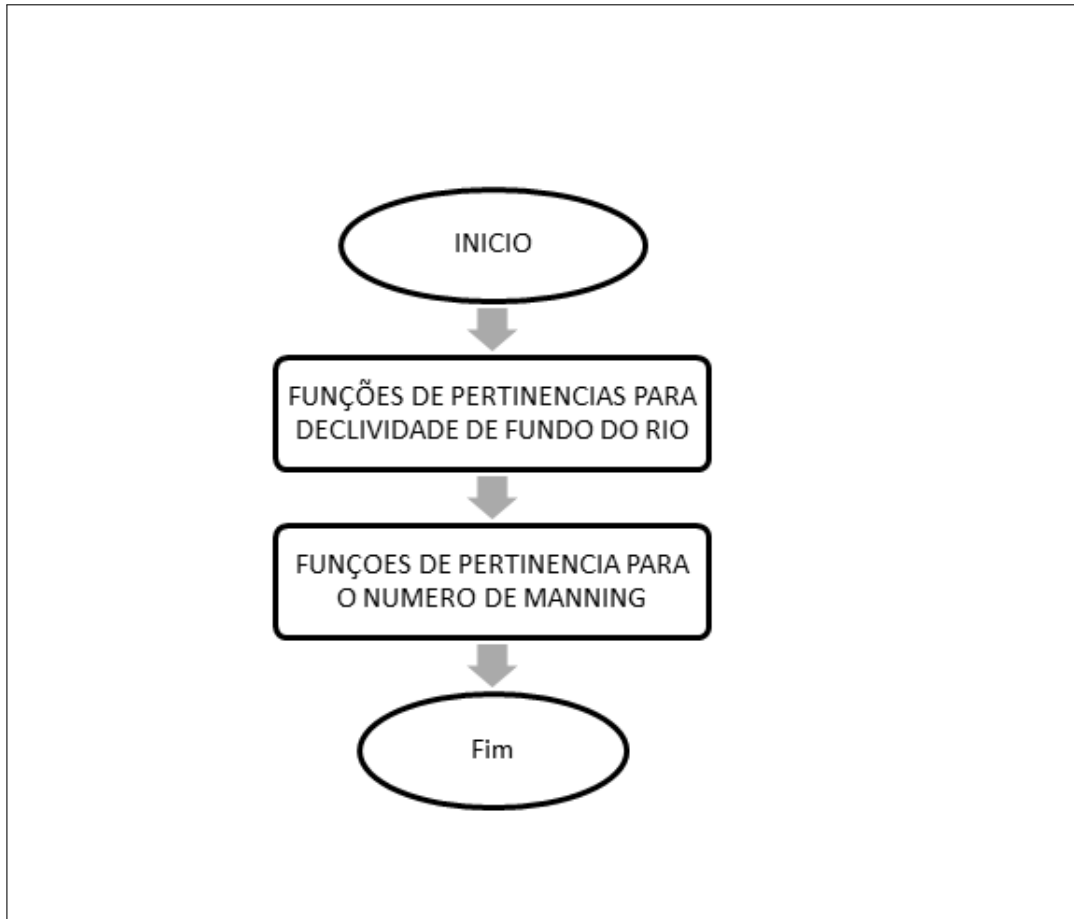
Figura 16 – Fluxograma subrotina Leitura de Dados.



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

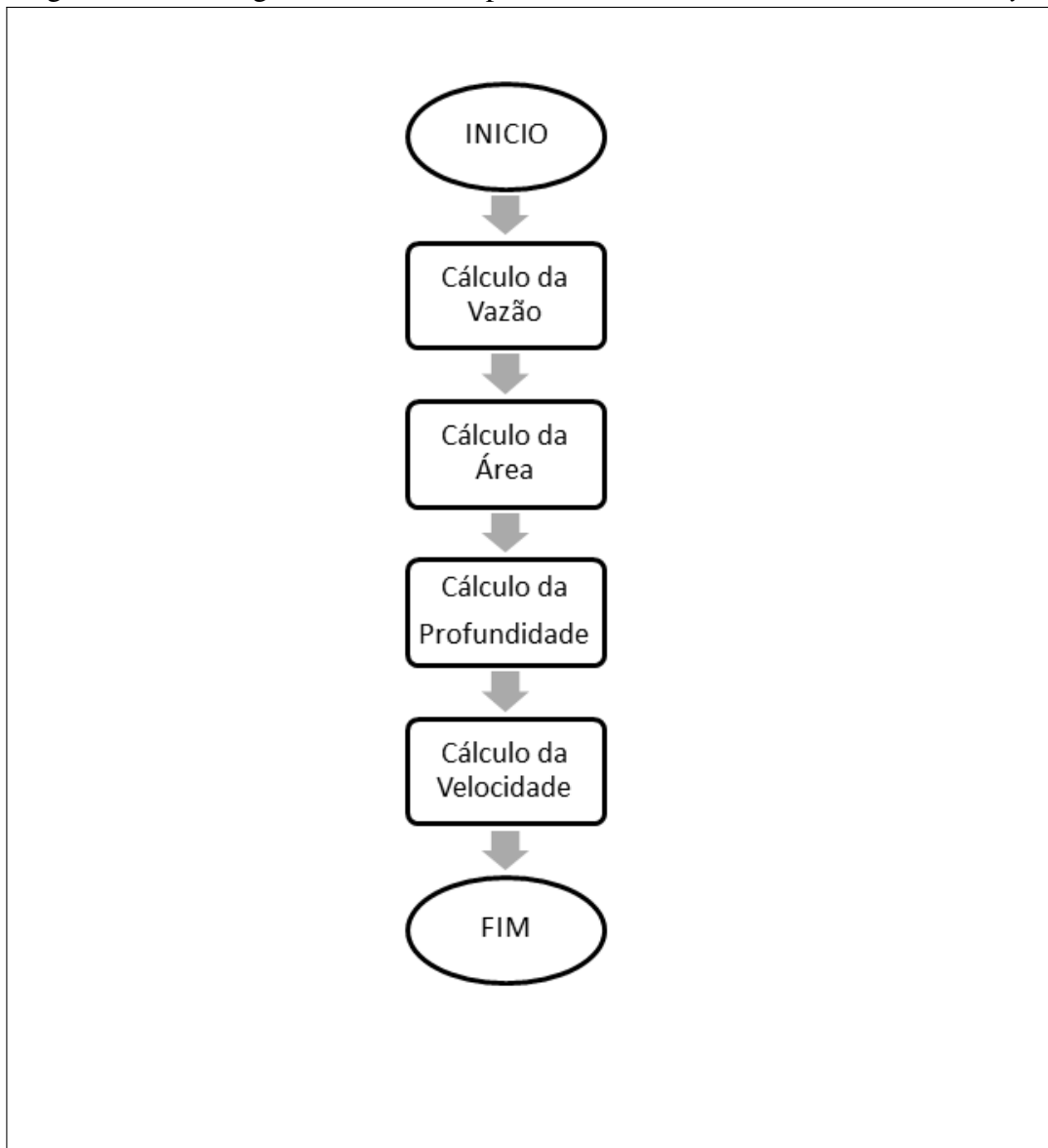
A segunda sub-rotina, Figura 17, trata da “fuzzificação” dos parâmetros e transformação desses em suas respectivas funções de pertinência.

Figura 17 – Fluxograma subrotina para as Funções de Pertinência.



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Por fim, a última sub-rotina Figura 18, que trata dos cálculos do modelo “fuzzificado” de propagação de onda dinâmica, difusa e cinemática, onde todos os parâmetros que caracterizam os modelos hidrodinâmicos são calculados retornando ao usuário como resultado os valores referentes à vazão, velocidade, profundidade, celeridade e área.

Figura 18 – Fluxograma estruturado para a saída de dados Hidrodinâmica *Fuzzy*

Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

3.6 Cenários para a simulação

Nesta pesquisa desenvolveu-se uma sequência de variações dos diversos parâmetros hidráulicos, que foram transformados em funções de pertinência como dados de entrada para o modelo hidrodinâmico *fuzzy*. Os parâmetros hidráulicos: rugosidade, declividade e a vazão de entrada foram transformadas em funções de pertinência, com o grau de pertinência 0 igual a 20% do grau de pertinência 1, para a direita e para a esquerda, denominado dilação *fuzzy*

Para essa simulação foram usados os seguintes dados comuns aos 3 modelos. Considerou-se para tanto um canal natural de seção retangular, comprimento igual a 50 km, largura de 50 m e uma vazão inicial uniforme de 50 m³/s. A variação temporal da vazão é

expressa pela função senoidal (CHAPRA, 1997):

$$Q = Q_0 \left(1 + CQ \cdot \text{sen} \frac{\pi t}{T} \right), \text{ para } 0 \leq t \leq T \quad (3.28)$$

e,

$$Q = Q_0, \text{ para } t \geq T \quad (3.29)$$

Para este trabalho inicialmente foi considerado $Q_0 = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, $CQ = 3$ de forma a garantir que a onda senoidal tenha o seu pico de vazão máximo igual a 4 vezes a sua vazão inicial e $T = 3600 \text{ s}$. equivalente a 1 hora. Assim, tem-se a equação 3.28 como:

$$Q = 50 \left(1 + 3 \cdot \text{sen} \frac{\pi t}{3600} \right), \text{ para } 0 \leq t \leq T \quad (3.30)$$

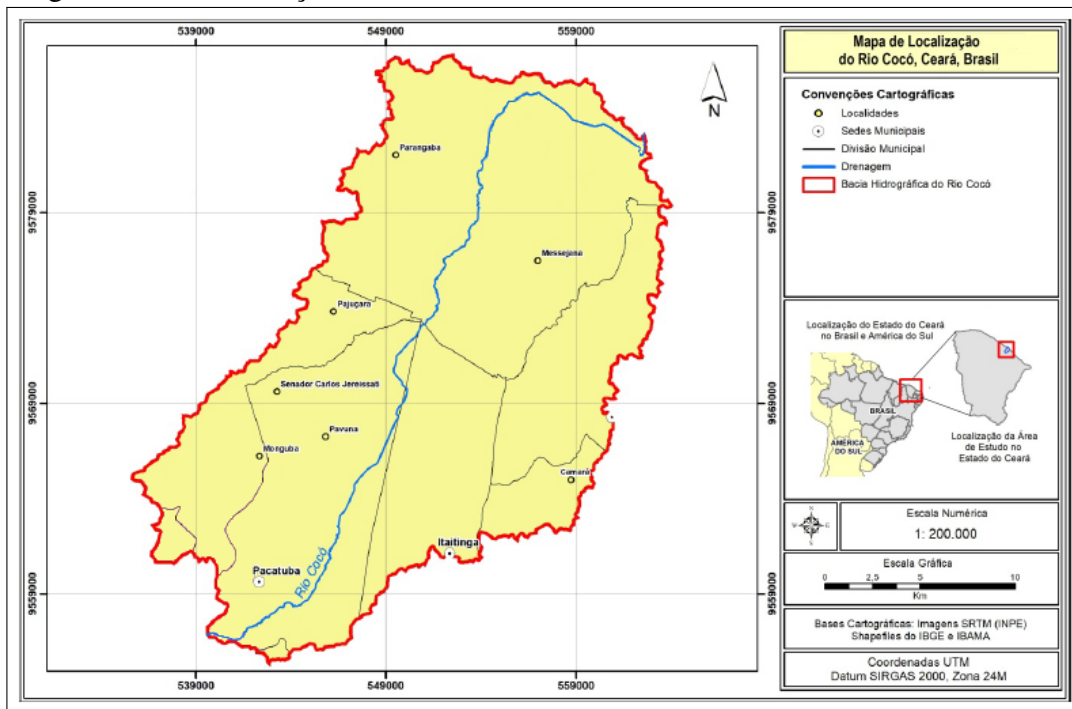
3.6.1 Potencial de Aplicação em Escala Real

A área de estudo compreende o rio Cocó, principal recurso hídrico da região Metropolitana de Fortaleza, localizado na bacia do rio Cocó (FIGURA 19). É um rio cuja a bacia recorta os municípios: Guaiúba, Pacatuba, Maracanaú, Maranguape, Itaitinga, Aquiraz, Eusébio e Fortaleza, abrangendo uma área de aproximadamente 517 km^2 .

As nascentes do Rio Cocó se situam na vertente leste da serra da Aratanha, no município da Pacatuba (CE), quando pequenos cursos d'água se encontram formando o riacho Pacatuba, que após receber outros contribuintes passa a ser denominado Gavião. Já na planície de depressão sertaneja, a denominação Cocó é atribuída a partir do trecho em que recebe as águas do riacho Alegrete e tem como referência o 4º anel viário, localizado na BR-116.

O curso do rio Cocó tem cerca de 45 km e seu leito estende-se na direção *SW – NE* por longo trecho de seu percurso formando em direção à foz uma curva acentuada para *NW – SE*. Após receber em seu trecho final o rio Coaçu, seu principal afluente, desagua no mar Atlântico, na praia do Caça e Pesca, limites entre os municípios de Fortaleza (Caça e Pesca) e Eusébio (Sabiaguaba).

Figura 19 – Localização do Rio Cocó.



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

O estudo fez também simulações tomando como base os dados do Rio Cocó na Região Metropolitana de Fortaleza. Os dados foram obtidos do trabalho de Ribeiro (2005), onde foram considerados uma declividade média de $0,00005 \text{ m/m}$ e um coeficiente de rugosidade de $0,03$, uma largura média do canal principal foi considerada 40 m . Para a análise numérica, foi considerado um certo segmento intermediário de 20 km de extensão ao longo do rio na direção da foz. Na discretização numérica, o segmento do canal foi dividido em 20 trechos de 1.000 m de comprimento cada. A função de resistência admitiu uma cota média de 3 m em relação ao fundo do canal, como valor mais provável para a altura do terreno em relação ao fundo. Como a vazão de escoamento uniforme foi considerada uma vazão média de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

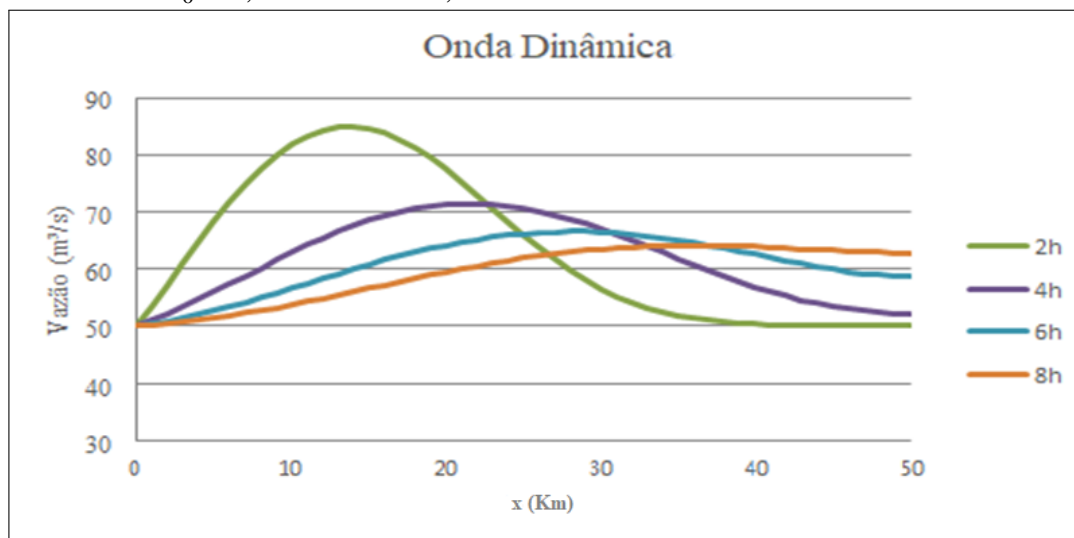
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A simulação da propagação de ondas dinâmica, difusa e cinemática realizada, através do programa computacional, permitiu chegar a vários resultados, que serão discutidos neste capítulo. Foram gerados gráficos que expressam os resultados da área e profundidade em função do tempo e da vazão em função do espaço na direção da corrente. Também tem-se como resultados o perfil d'água longitudinal de um canal natural com 50 km, onde foram gerados gráficos para cada hora de simulação, podendo-se fazer animações com estes para uma melhor compreensão dos resultados.

4.1 Propagação das Ondas Hidrodinâmicas

A primeira simulação apresenta o perfil da vazão na propagação das ondas dinâmica, difusa e cinemática para diferentes tempos ao longo do canal. As Figuras 20, 21 e 22 apresentam a propagação da onda dinâmica, difusa e cinemática, respectivamente. Em que se verificam os perfis da vazão com grau de pertinência igual a 1 para diferentes intervalos de tempo, ao longo do canal natural na direção da corrente. Este canal possui uma declividade $S_0 = 0,000305 \text{ m/m}$ e rugosidade $n = 0,05 \text{ s.m}^{-1/3}$.

Figura 20 – Propagação da onda dinâmica ao longo do canal natural para diferentes tempos, com $S_0 = 0,000305$ e $n = 0,05$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

A Figura 20 mostra os resultados da simulação da propagação de uma onda de cheia, com maior grau de pertinência, para diferentes tempos ao longo do canal. Através da figura, verifica-se que o pico de vazão diminui com o passar do tempo devido à influência do termo atrito contido na equação diferencial onda dinâmica.

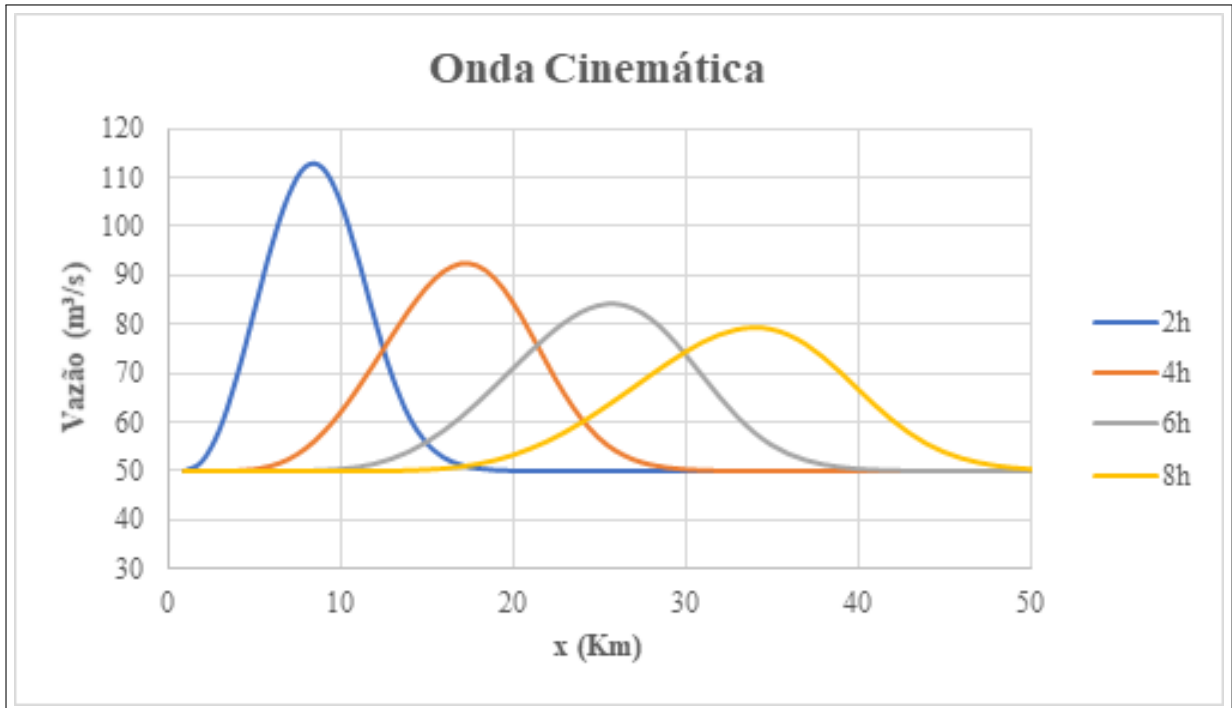
Figura 21 – Propagação da onda difusa ao longo do canal natural para diferentes tempos, com $S_0 = 0,000305$ e $n = 0,05$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Como pode ser observado na Figura 21, um processo de amortecimento é verificado ao longo do comprimento do rio para os diferentes tempos. Isto é decorrente do termo difusivo existente na equação diferencial para a onda difusiva. Estes parâmetros, como o próprio nome indica, têm a propriedade de dispersar a energia de propagação da onda, ao longo do canal, fazendo com que a onda se espalhe e atenuar os seus efeitos no processo de enchentes. Através da figura é possível verificar que, para um tempo de 6 horas, o pico da onda é bem menor do que para um tempo de 2 horas, confirmando a análise feita anteriormente.

Figura 22 – Propagação da onda cinemática ao longo do canal natural para diferentes tempos, com $S_0 = 0,000305$ e $n = 0,05$

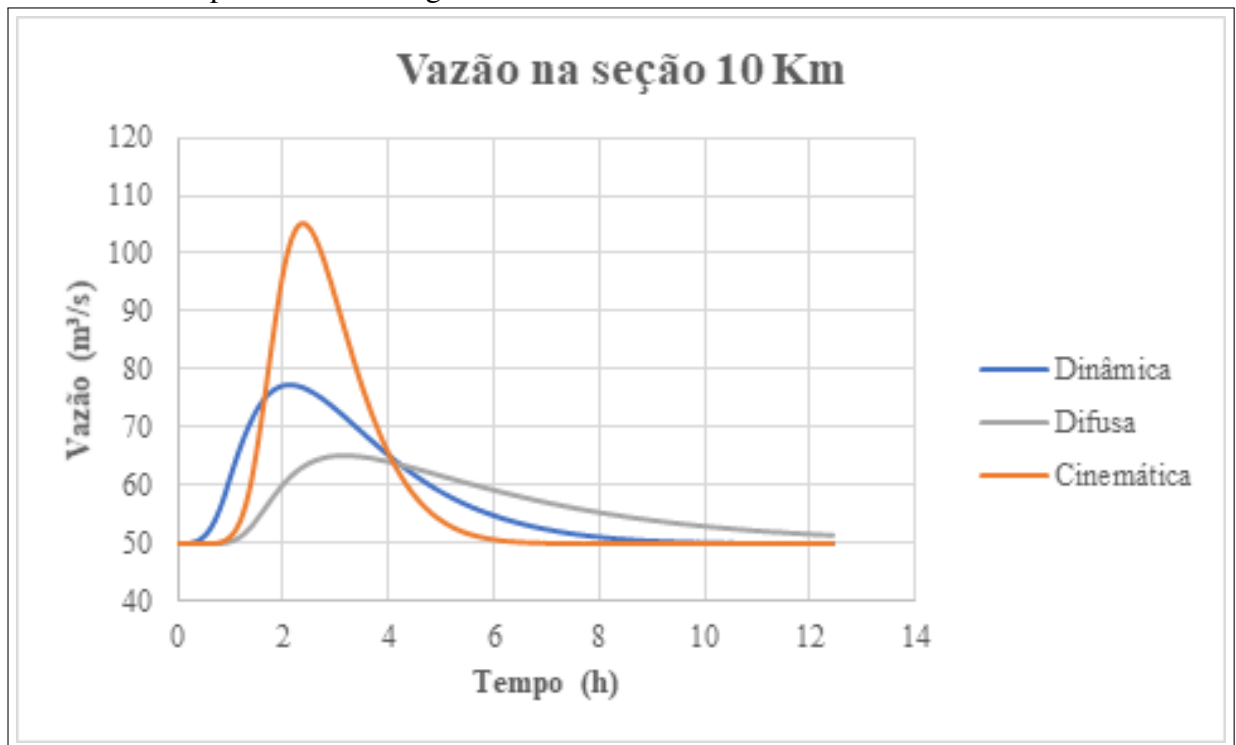


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

A Figura 22 mostra o comportamento da propagação da onda cinemática, com maior grau de pertinência, ao longo do canal para diferentes tempos. O modelo da onda cinemática foi tratado de forma não linear, ou seja, a celeridade da onda definida através da relação dQ/dA foi considerada em função da vazão em cada intervalo de tempo e em cada seção do canal. Através da figura, verifica-se que a onda cinemática se propaga com uma certa regularidade e uma simetria significativa.

Ao comparar as Figuras 20, 21 e 22, observa-se que a onda difusiva é a que mais se aproxima da onda dinâmica, do que a onda cinemática. Entretanto, deve-se observar que para outros cenários de propagação pode haver condições em que os modelos estudados apresentem resultados bem mais próximos dos resultados produzidos a partir da onda dinâmica.

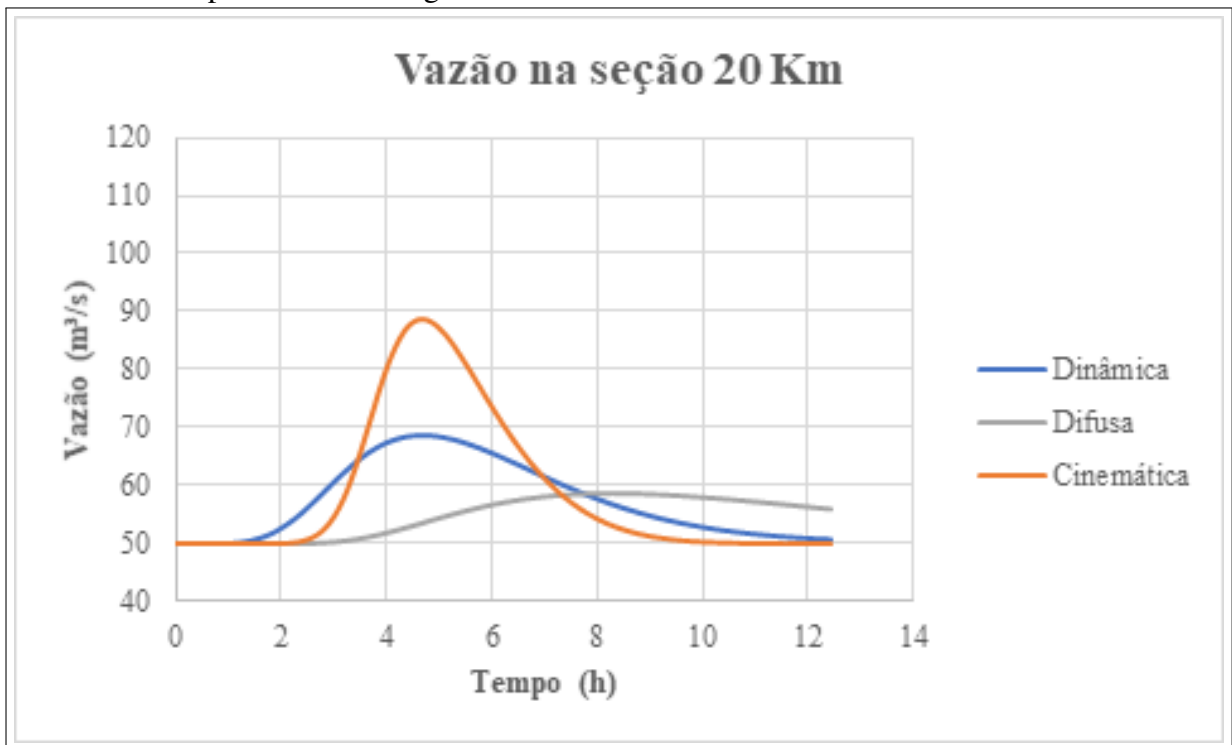
Figura 23 – Comparação entre as vazões das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 10km da origem



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

A Figura 23 mostra a propagação das ondas dinâmica, difusa e cinemática com maior grau de pertinência, a 10km da origem do canal em função do tempo. Os resultados desta figura mostram as hidrógrafas com valores máximos da vazão, considerando os três modelos de onda, correspondem a 77,27; 65,03; 105,41 m^3/s , cujos tempos de pico valem respectivamente 2:13 hora; 3:16 hora; 2:37 hora. Verifica-se que há, para os parâmetros hidráulicos considerados, uma redução na amplitude das ondas dinâmica e difusa no tempo, o que caracteriza uma dissipação de energia. Este fato é decorrente, principalmente, da presença do atrito na equação da hidrodinâmica. O modelo da onda cinemática, onde a função de atrito é controlada somente pelo fator gravitacional, tal dissipação é bem menor.

Figura 24 – Comparação entre as vazões das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 20km da origem

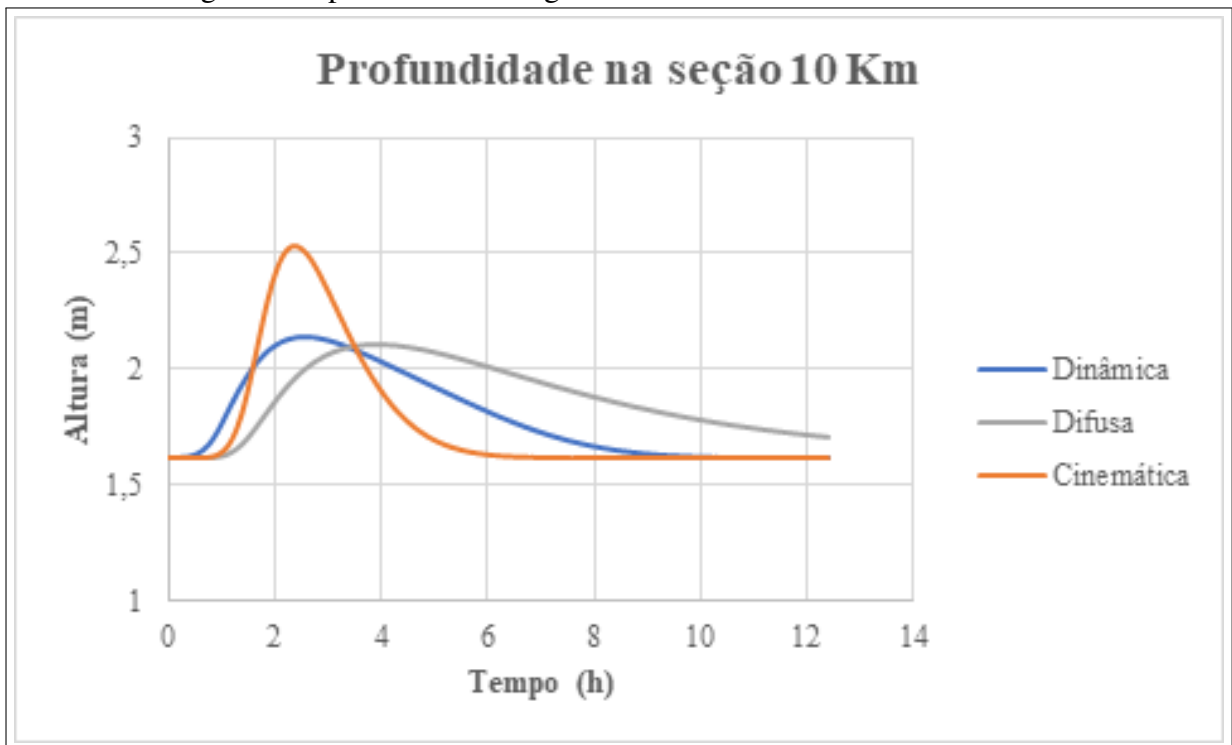


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

A Figura 24, mostra que na seção 20Km, além de ocorrer redução da amplitude dos picos das ondas, os picos se afastam mais da origem, quando comparado com a Figura 23. Isto é, o pico da vazão tende a diminuir. Com a passagem da onda, o pico vai diminuindo e o tempo de base aumentando, pois, a onda vai perdendo energia e se dissipando. Os valores máximos da vazão, considerando as hidrógrafas dos três modelos de onda, correspondem a 68,60; 58,48; 88,63 m^3/s , cujos tempos de pico valem respectivamente 4:45 h; 8:20 h; 4:42 h.

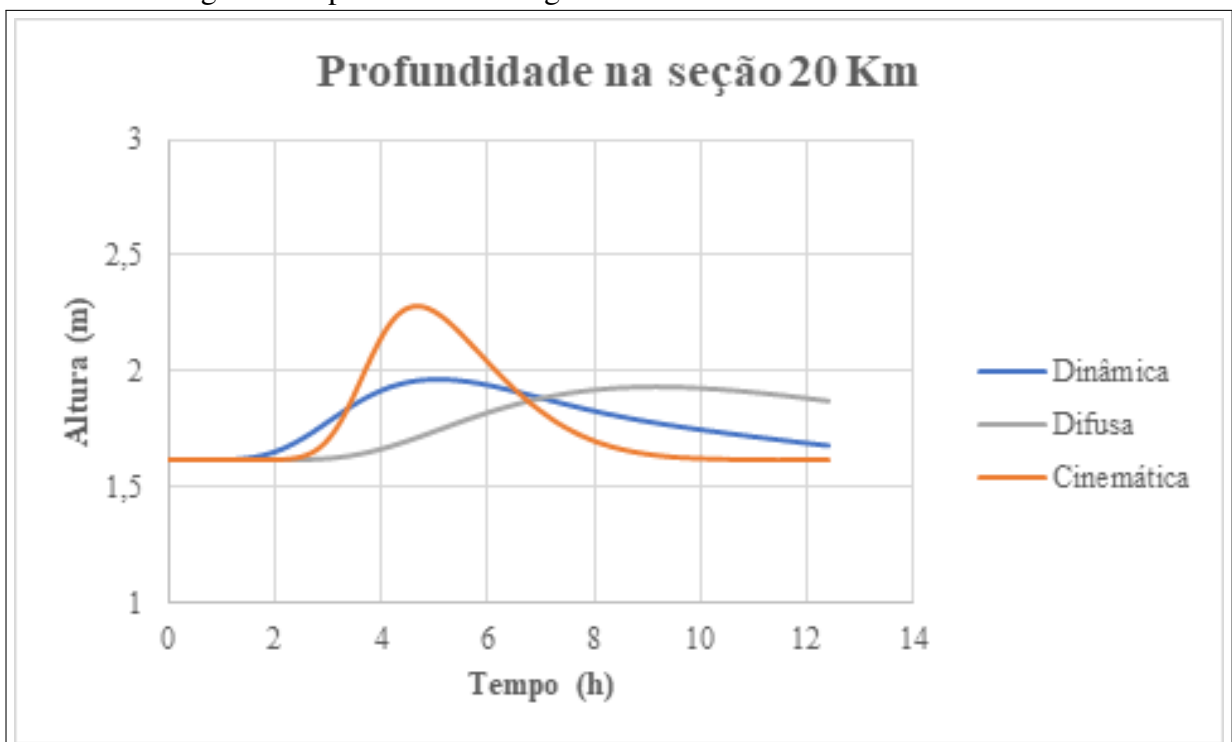
As Figuras 25 e 26 mostram as profundidades com maior grau de pertinência para os três modelos em estudo, em função do tempo e nas seções 10km e 20km da origem. Através da figura percebe-se que, como foi dito anteriormente, o efeito da difusividade sobre a onda difusiva e o efeito do atrito sobre a onda dinâmica, faz com que o pico de altura desses dois modelos seja bem menor quando comparado ao pico de altura da onda cinemática, já que para a onda cinemática, a função de atrito é controlada apenas pelo fator gravitacional.

Figura 25 – Comparação entre as profundidades das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 10km da origem



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

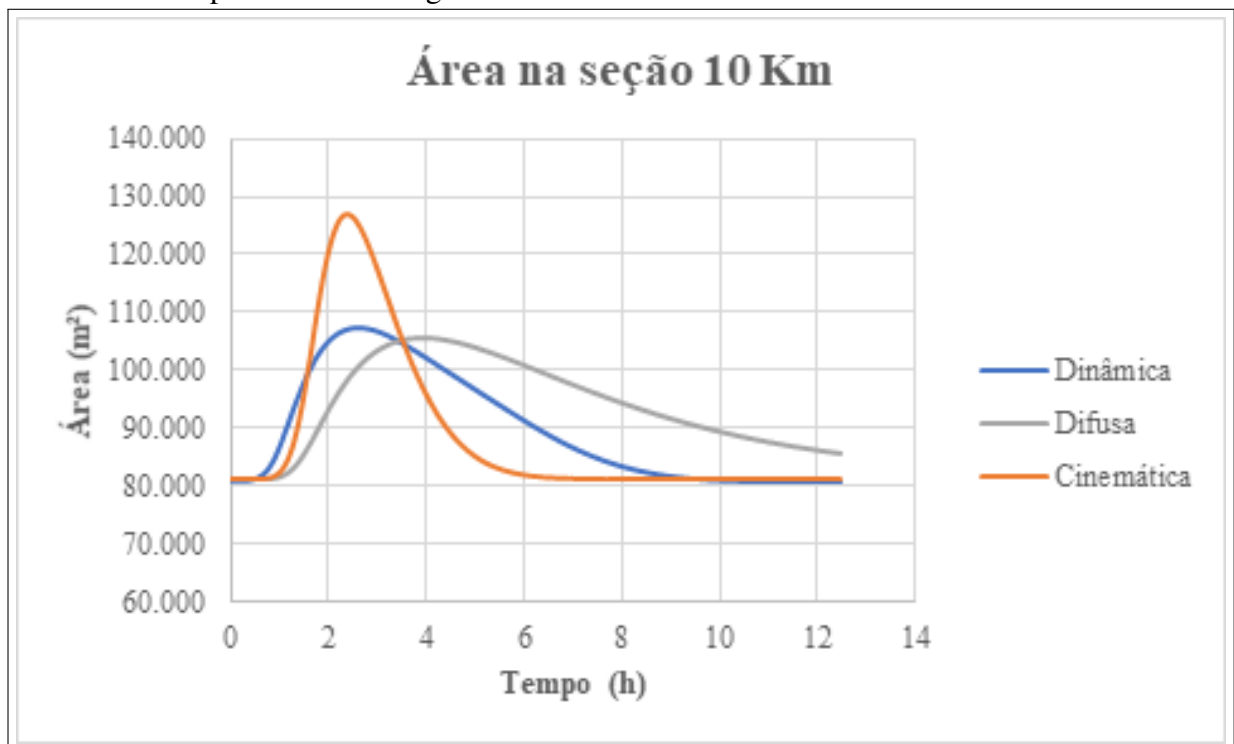
Figura 26 – Comparação entre as profundidades das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 20km da origem



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

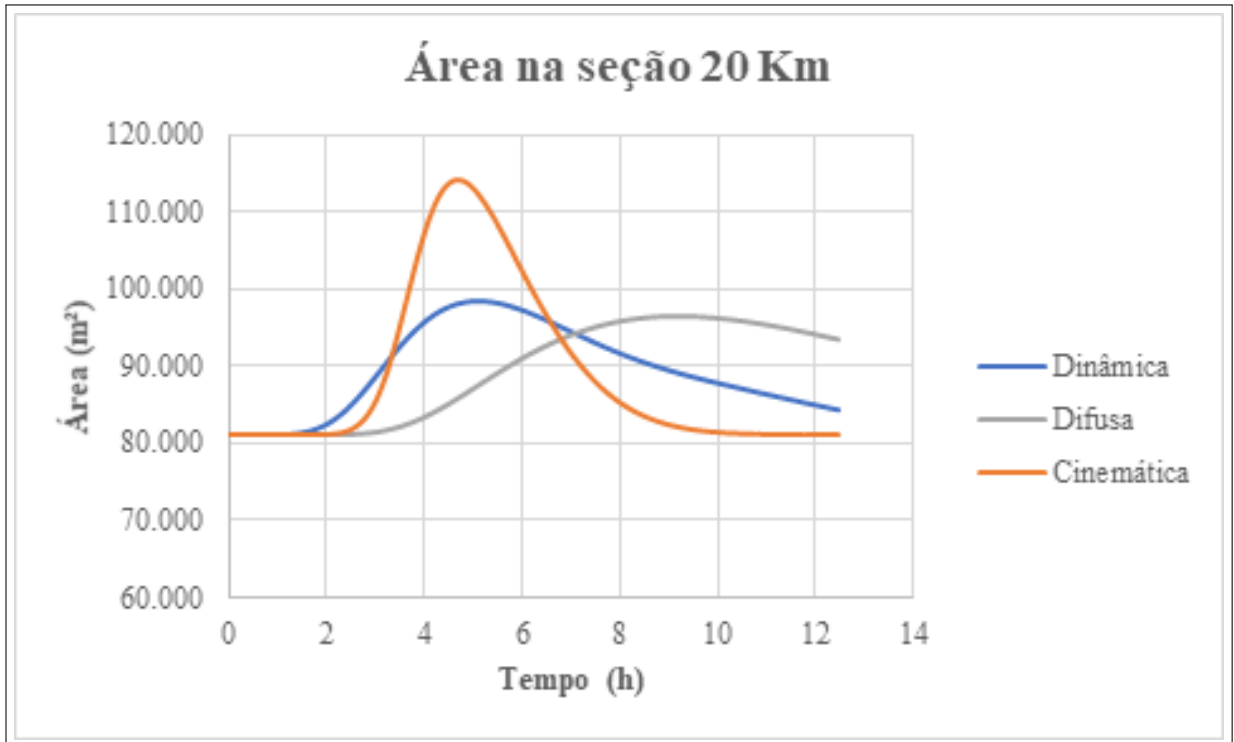
Uma outra observação importante, que pode ser percebida ao comparar as Figuras 25 e 26, reside no comportamento da transiência das profundidades ao chegar na seção de controle. Neste caso, observa-se que a onda cinemática tem uma transiência mais concentrada, simétrica e um tempo de passagem menor do que as ondas dinâmicas e difusivas. Onde, para estas, a mudança temporal da profundidade é irregular, devido a presença do termo atrito presente na equação do modelo da onda dinâmica e o termo difusivo presente na onda difusa.

Figura 27 – Comparação entre as áreas das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 10km da origem



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 28 – Comparação entre as áreas das ondas Dinâmica, Difusa e Cinemática ao longo do tempo a 20km da origem



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Observa-se a coerência entre as Figuras 27 e 28 com as Figuras 23 e 24, pois, para esta situação, onde os parâmetros hidráulicos foram mantidos constantes, há uma concordância entre as hidrógrafas de vazão com maior grau de pertinência e as hidrógrafas da área do escoamento no canal com maior grau de pertinência. Em outras palavras, se a vazão diminui, ou seja, se a quantidade de água que chega a uma determinada seção do canal é menor, a área da seção transversal molhada também tende a diminuir. Sabendo que a área da seção transversal molhada é função da largura e da profundidade, e a largura é fixa neste estudo, a área fica em função, apenas da profundidade. Também se nota, através das Figuras 27 e 28, que as áreas vão diminuindo à medida que a onda passa, com um pico de vazão menor.

4.2 Função de Pertinência *Fuzzy*

Para que seja compreendida a configuração da função de pertinência as Figuras 29, 30 e 31 ilustram para os três modelos, o comportamento da vazão ao longo do rio, quando o grau de pertinência for igual a 0,5 para um tempo de 4h.

Figura 29 – Hidrógrafo da vazão da onda Dinâmica ao longo do canal, correspondente ao nível de corte- $\alpha = 0,5$ e $t=4h$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 30 – Hidrógrafo da vazão da onda Difusa ao longo do canal, correspondente ao nível de corte- $\alpha = 0,5$ e $t=4h$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

A linha inferior e a linha superior ilustradas nas Figuras 29, 30 e 31 representam os

Figura 31 – Hidrógrafo da vazão da onda Cinemática ao longo do canal, correspondente ao nível de corte- $\alpha = 0,5$ e $t=4h$



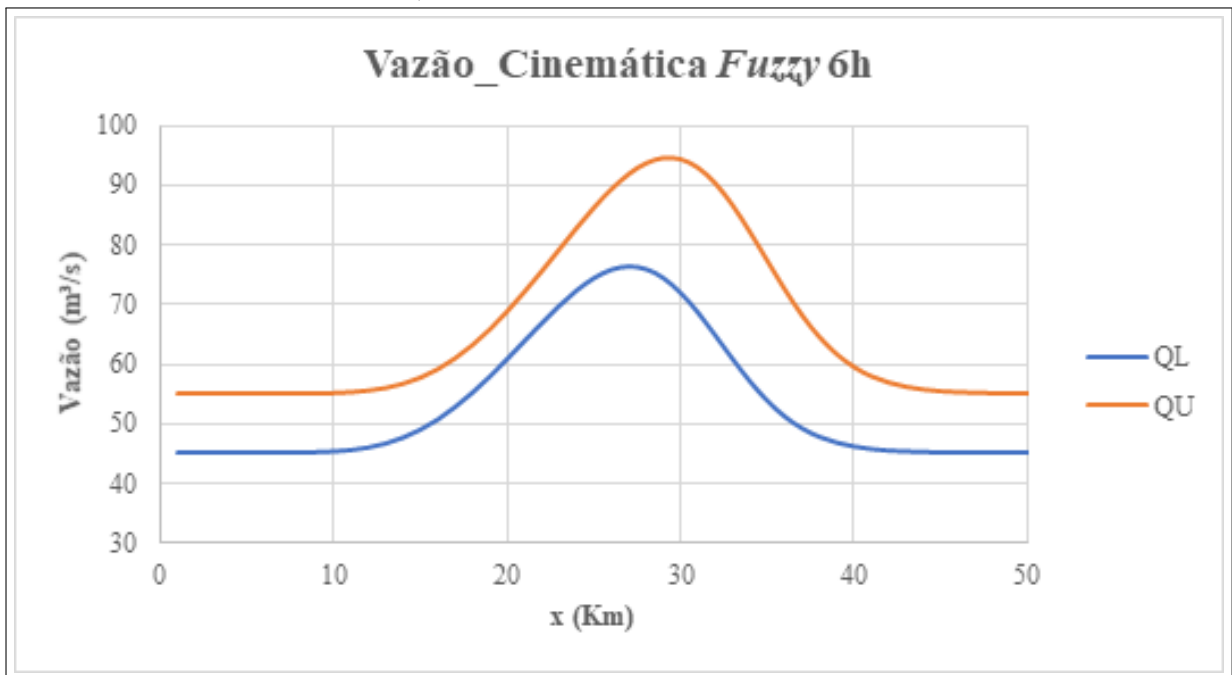
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

valores de vazão para o nível de pertinência igual a 0,5. Isto é, região de incertezas, qualquer valor de vazão presente entre estas duas linhas tem o grau de pertinência superior a 0,5, o que indica a região de maior possibilidade de ocorrência dos valores de vazão.

Ao comparar as figuras entre si, é verificado para os três modelos um processo de amortecimento ao longo do comprimento do rio. Através da Figura 31 é possível verificar que os picos da onda cinemática para um nível de corte- $\alpha=0,5$ é bem maior em relação aos picos da onda dinâmica e onda difusa para o mesmo corte- α , Figuras 29 e 30. Confirma-se a análise feita anteriormente para as simulações realizadas com nível de corte- $\alpha = 1$ apresentado na Figura 22.

Uma outra observação importante que pode ser percebida na comparação entre as Figuras 29 a 31, dos três modelos estudados, verifica-se o modelo da onda dinâmica apresenta maior região de incertezas quando comparada aos outros dois modelos, isto é, a distância entre os limites inferiores e superiores o modelo da onda dinâmica é maior quando comparada aos outros modelos de onda difusa e a onda cinemática. E o modelo que apresenta a menor região de incertezas é a onda cinemática.

Figura 32 – Hidrógrafo da vazão da onda Cinemática ao longo do canal, correspondente ao nível de corte- $\alpha = 0,5$ e $t=6h$.



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Ao comparar a Figura 32 com a Figura 31 verifica-se que a hidrógrafa da vazão da onda cinemática para $t=6h$ apresenta maior região de incertezas do que a hidrógrafa da vazão da onda cinemática para $t=4h$. Isto é, distância entre os limites inferiores e superiores para $t=6h$ é maior do que para $t=4h$, ou seja, quanto maior o tempo de passagem da onda cinemática ao longo do canal maior será a região de incertezas. Apresenta também um pico menor de vazão, isto é, em $t=6h$ há uma dissipação de energia da onda ao longo do canal, conforme já apresentado na Figura 22.

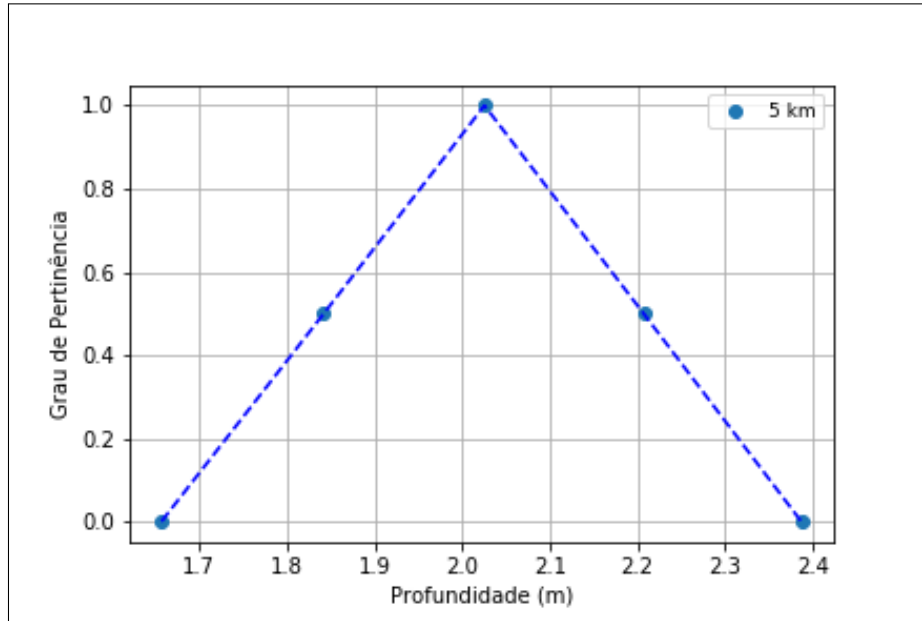
Os estudos se desenvolveram considerando uma sequência de variações dos diversos parâmetros hidráulicos, que foram transformados em funções de pertinência como dados de entrada para o modelo hidrodinâmico *fuzzy*. De sorte que a rugosidade, a declividade e a vazão de entrada foram transformadas em funções de pertinência, com o grau de pertinência 0 igual a 50% do grau de pertinência 1, para a direita e para a esquerda.

4.3 Função Marginal de Segurança

As Figuras 33, 34 e 35 mostram os resultados obtidos da propagação da onda dinâmica para as funções de pertinência da profundidade do escoamento, da vazão e da função de pertinência da margem de segurança em relação a profundidade da propagação da onda ao

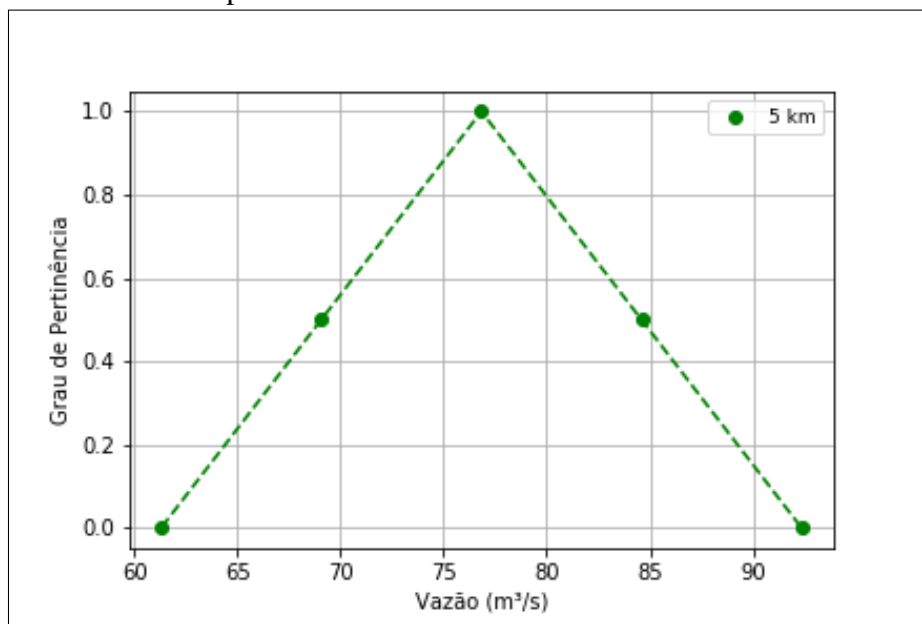
longo do canal. A partir de uma simulação, onde foi usado um canal de 50 km de comprimento, 50 m de largura, declividade do fundo do canal igual a 0,0005, coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,05, com uma função de pertinência para a resistência definida como sendo uma profundidade [1, 2, 4] em metros.

Figura 33 – Função de Pertinência da Profundidade Onda Dinâmica para o tempo de 2 horas



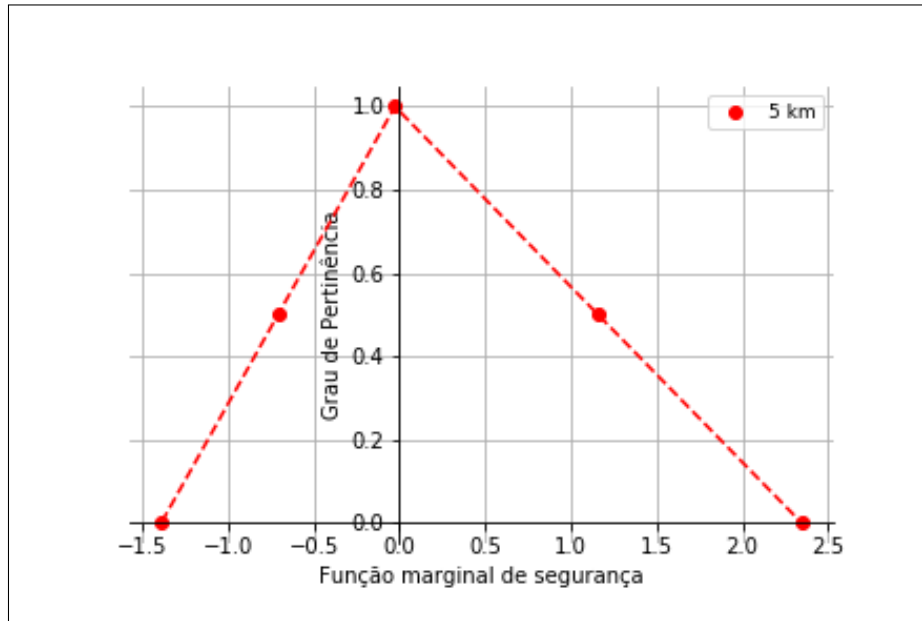
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 34 – Função de Pertinência da Vazão Onda Dinâmica para o tempo de 2 horas



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 35 – Representação *fuzzy* da função marginal de segurança para Onda Dinâmica no tempo de 2 horas, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$



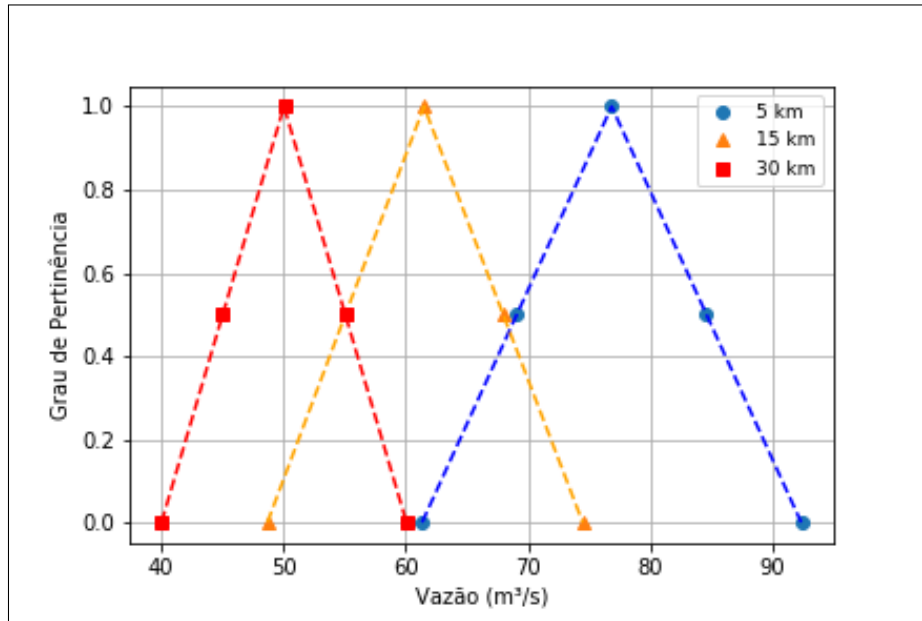
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 35, como já visto na metodologia, a função marginal de segurança é calculada a partir da diferença entre a resistência do rio para a profundidade e a equação completa do modelo da onda dinâmica na sua forma *fuzzy*. Assim é possível compreender como são calculados os valores do risco e da garantia *fuzzy*.

De acordo com a Figura 35 não se pode afirmar que o sistema terá falha de 100%, pois na seção 5km no tempo de 2hs, tem-se que uma parte da base da função encontra-se do lado esquerdo das ordenadas, negativo. E uma outra parte encontra-se do lado direito do eixo das ordenadas, positivo. Isto implica que, quanto mais para a esquerda estiver a função de pertinência, maior será o risco de cheia. Para este cenário o risco é de 37%.

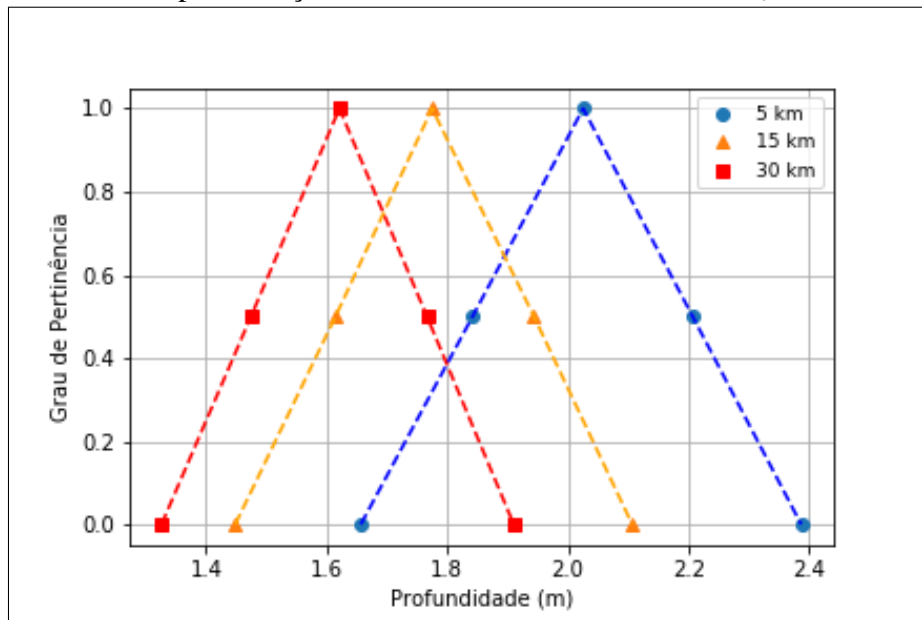
As Figuras 36, 37 e 38 mostram os resultados das mesmas funções anteriores para diferentes seções do canal. Através das referidas figuras, pode-se observar o caráter dinâmico das funções de pertinência para a onda dinâmica.

Figura 36 – Função de pertinência da vazão da onda dinâmica para 3 seções distintas, $t=2$ horas, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 37 – Função de pertinência da profundidade da onda dinâmica para 3 seções distintas, $t=2$ horas, $n= 0,05$ e $S_0=0,0005$

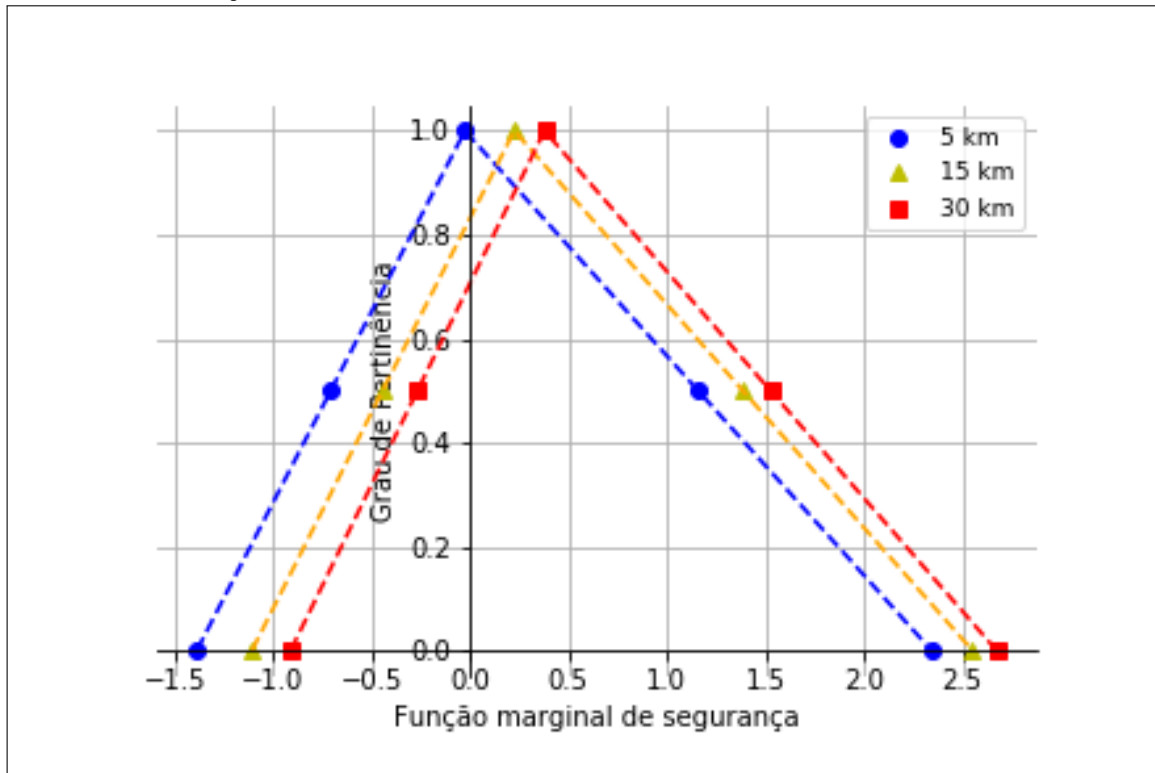


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

As figuras 36 e 37 mostram as funções de pertinência para vazão e profundidade, respectivamente. Este resultado mostra que a distribuição das funções de pertinência para vazão e profundidade pode ser calculada em qualquer tempo e seção do rio. Com isso é possível calcular o risco para diferentes seções, mostrando a capacidade computacional nas suas versatilidades.

É possível ser avaliado nas duas figuras acima a abertura de base da função de pertinência, onde quanto mais distante da origem da propagação da onda, maior será a abertura da função de pertinência. Estes resultados influenciam diretamente na função marginal de segurança, consequentemente no risco e na garantia *fuzzy*.

Figura 38 – Representação *fuzzy* da função marginal de segurança para onda dinâmica em 3 seções distintas, $t=2$ horas, $n=0,05$ e $S_0=0,0005$



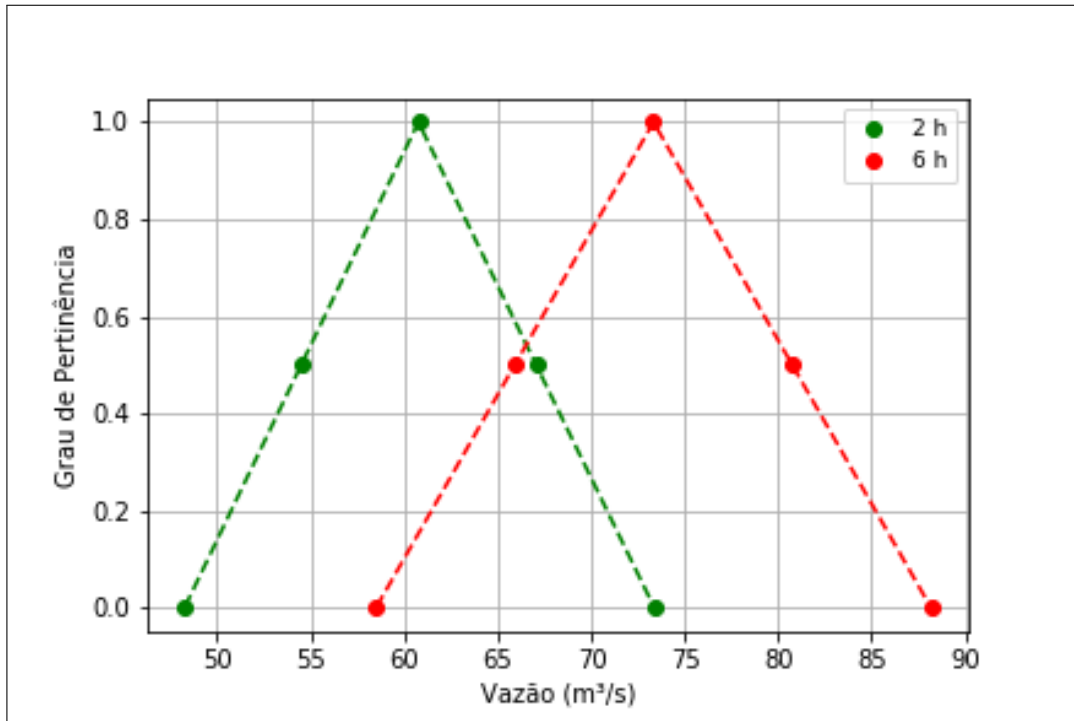
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Dando continuidade ao desenvolvimento da metodologia de determinação do risco e da garantia, a Figura 38 mostra o comportamento da função marginal de segurança para as seções 5, 10 e 30 km da origem. Como pode ser observada nas 3 seções, a uma parte de suas bases se encontra no eixo negativo das ordenadas e outra parte se encontra a direita do eixo das ordenadas, positivo. Induz a concluir que a falha no sistema, ou risco, é diferente de zero. Estes resultados serão verificados na quantificação do risco e da garantia *fuzzy*.

Os gráficos mostram ainda que, na seção a 5km, a função de pertinência possui profundidade e vazão maior, porque elas foram calculadas no momento da passagem de uma onda naquela seção, o que desloca a função de pertinência para a direita. É importante notar que, para a função marginal de segurança, o processo ocorre de forma contrária, isto é, quanto maior for a profundidade na seção, mais para a esquerda se desloca a referida função de pertinência, aumentando, assim, o risco.

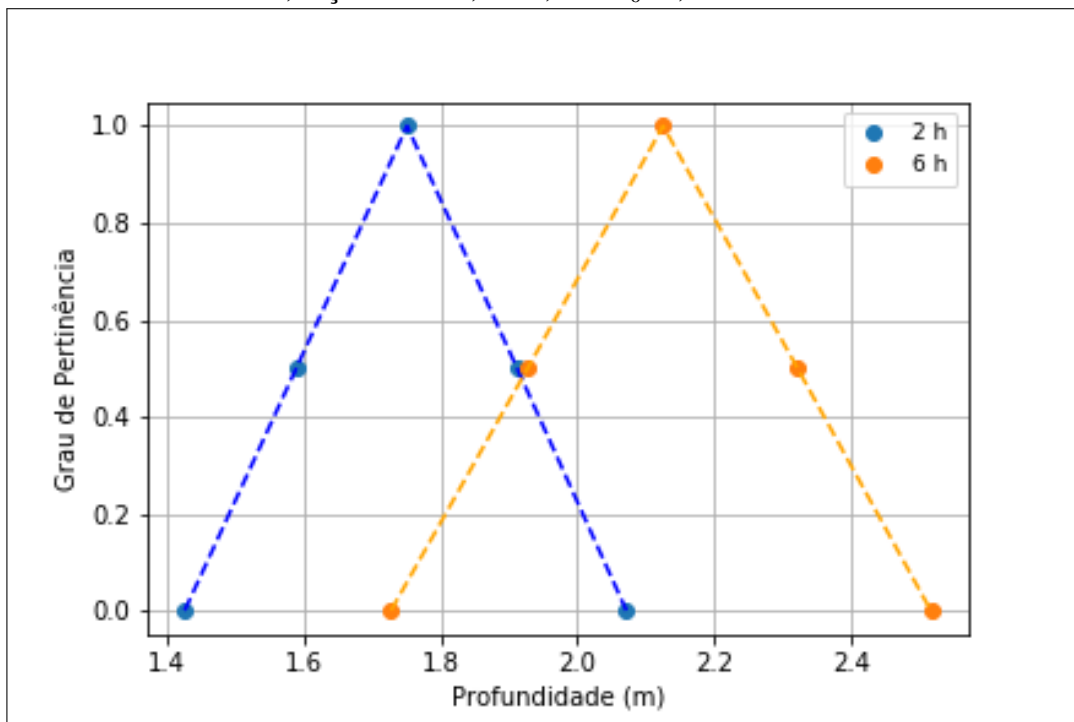
Na sequência estão dispostos o gráfico da função marginal para 2hs e 6hs.

Figura 39 – Função de pertinência da vazão da onda dinâmica para 2 tempos distintos, seção=10 km, $n=0,05$ e $S_0=0,0005$



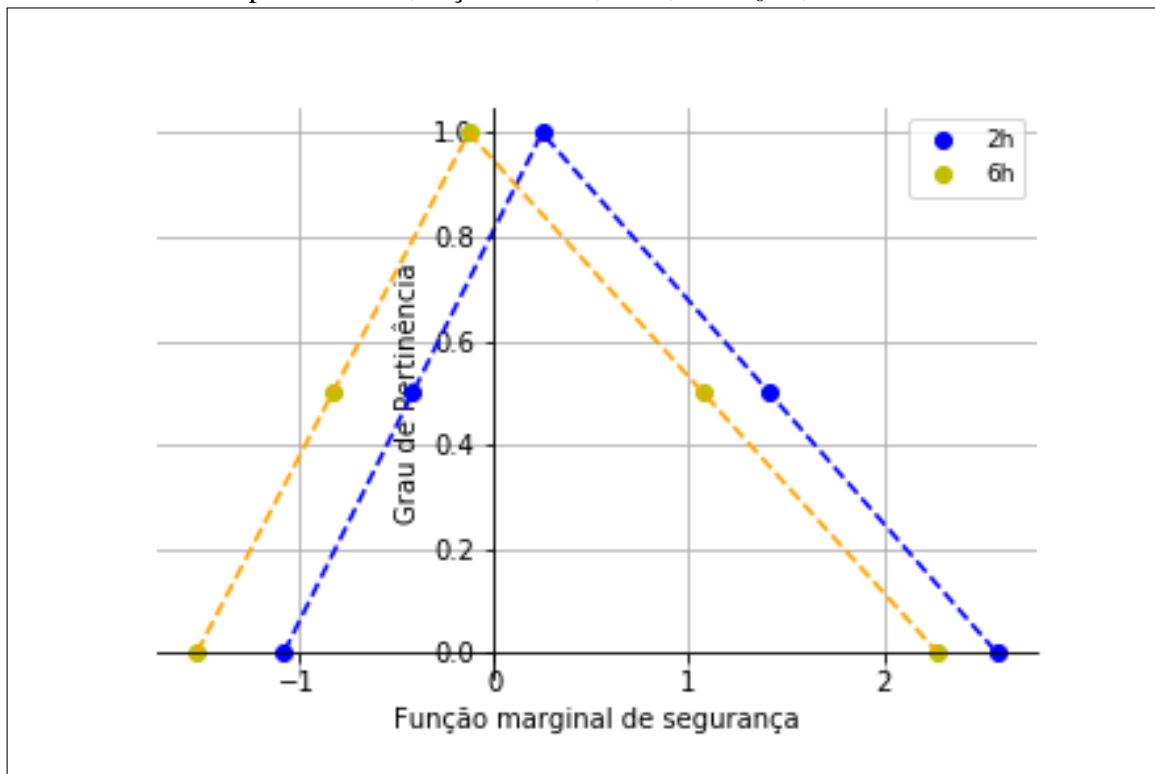
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 40 – Função de pertinência da profundidade da onda dinâmica para 2 tempos distintos, seção=10 km, $n=0,05$ e $S_0=0,0005$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 41 – Representação *fuzzy* da função marginal de segurança para onda dinâmica em 2 tempos distintos, seção=10 km, $n=0,05$ e $S_0=0,0005$

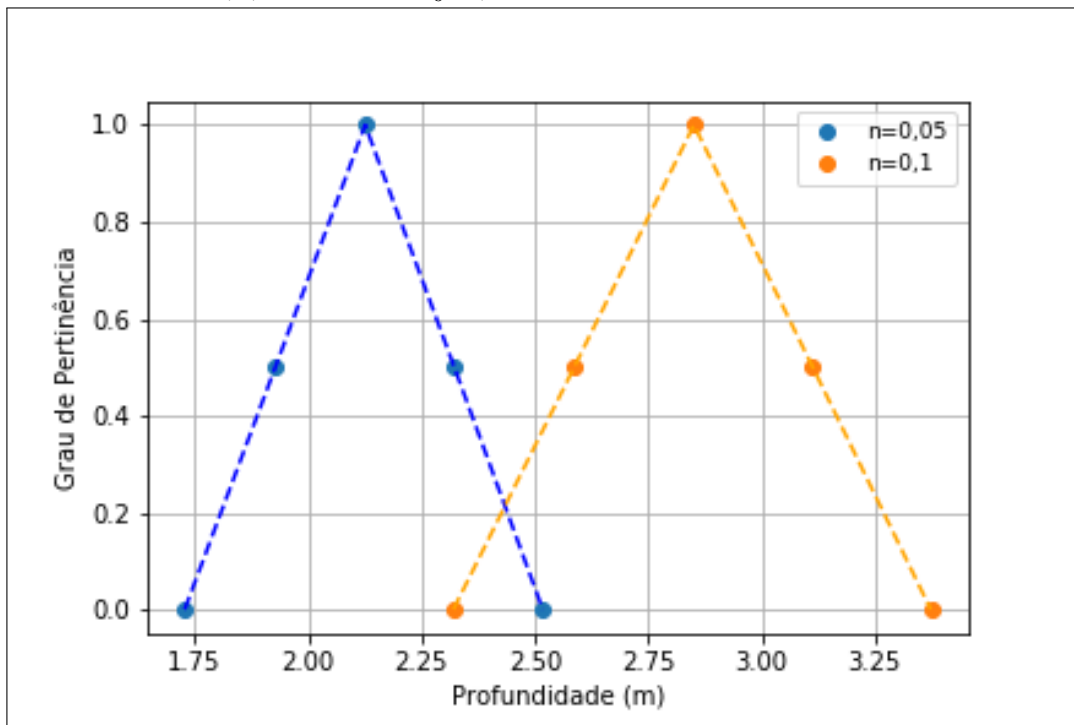


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

As Figuras 39, 40 e 41 mostram os resultados de uma simulação, para diferentes tempos, em uma seção a 10 km do início do canal. Os resultados confirmam a análise anterior. A função de pertinência profundidade e vazão, para um tempo de 6 horas, se encontra à direita da função de pertinência para o tempo de 2 horas. Isto é, em 2 horas, a onda de cheia está passando pela seção correspondente a 10 km da origem. Assim, tem-se que a função marginal de segurança se desloque para a esquerda, conforme mostrado na Figura 41, e os valores das vazões e das profundidades aumentem.

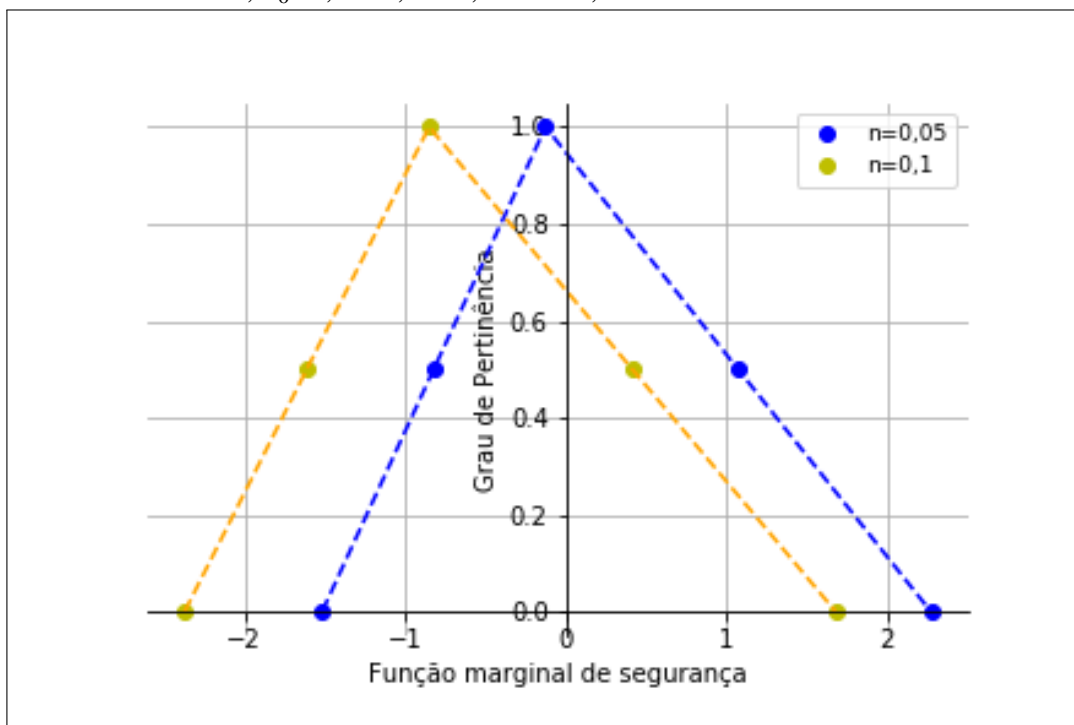
As Figuras 42 a 49 mostram os resultados de simulações para diferentes funções de pertinência para a rugosidade. Nestes casos, o coeficiente de rugosidade (n) teve os seus valores de maior grau de pertinência alterados de 0,05 para 0,1. Os resultados mostram a influência desta mudança nas variáveis de controle.

Figura 42 – Função de pertinência da profundidade da onda dinâmica para $n=0,05$ e $n=0,1$, $t=2$ horas e $S_0=0,0005$



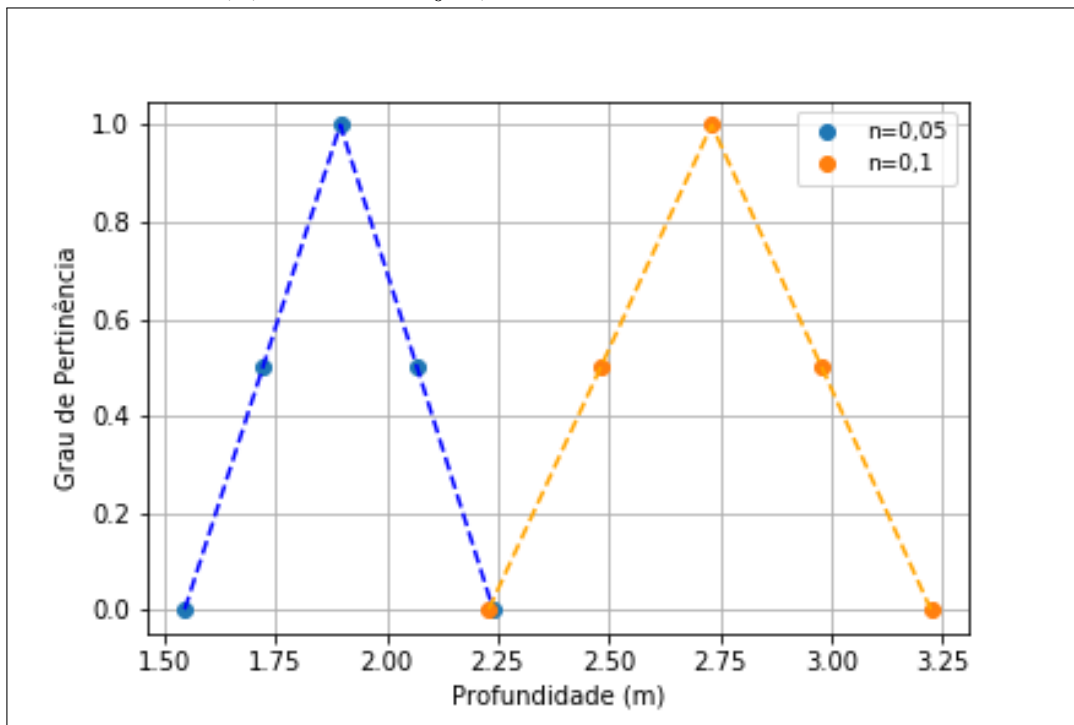
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 43 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança Onda Dinâmica para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$, $n=0,05$ e $n=0,1$



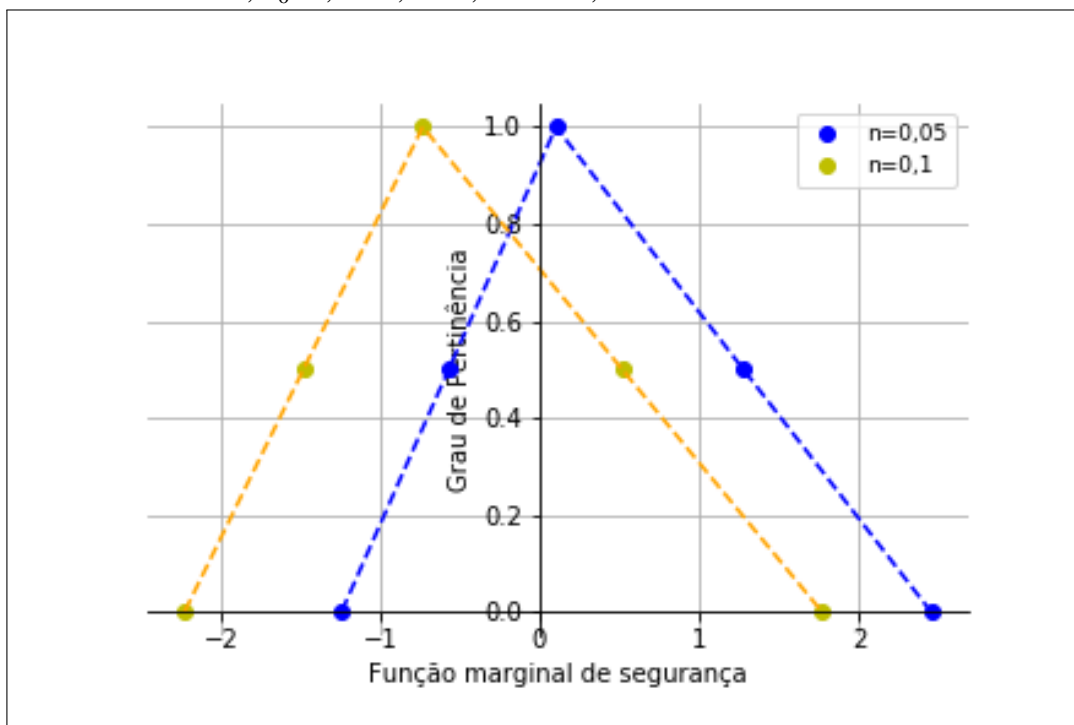
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 44 – Função de pertinência da profundidade da onda difusa para $n=0,05$ e $n=0,1$, $t=2$ horas e $S_0=0,0005$



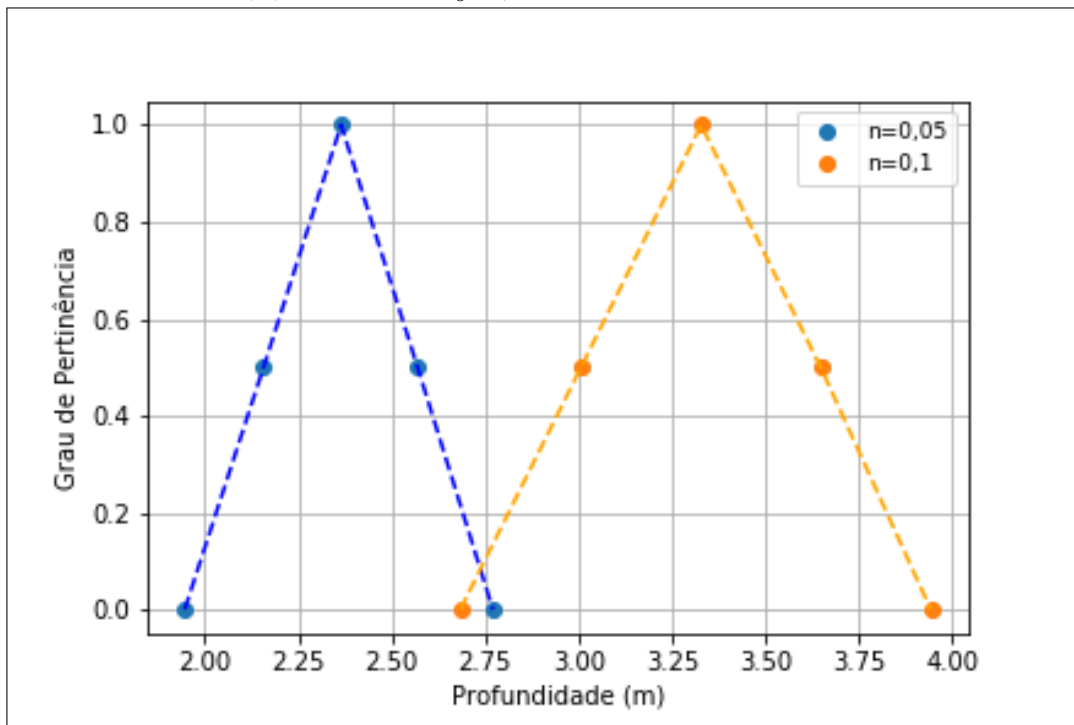
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 45 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança Onda Difusa para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$, $n= 0,05$ e $n=0,1$



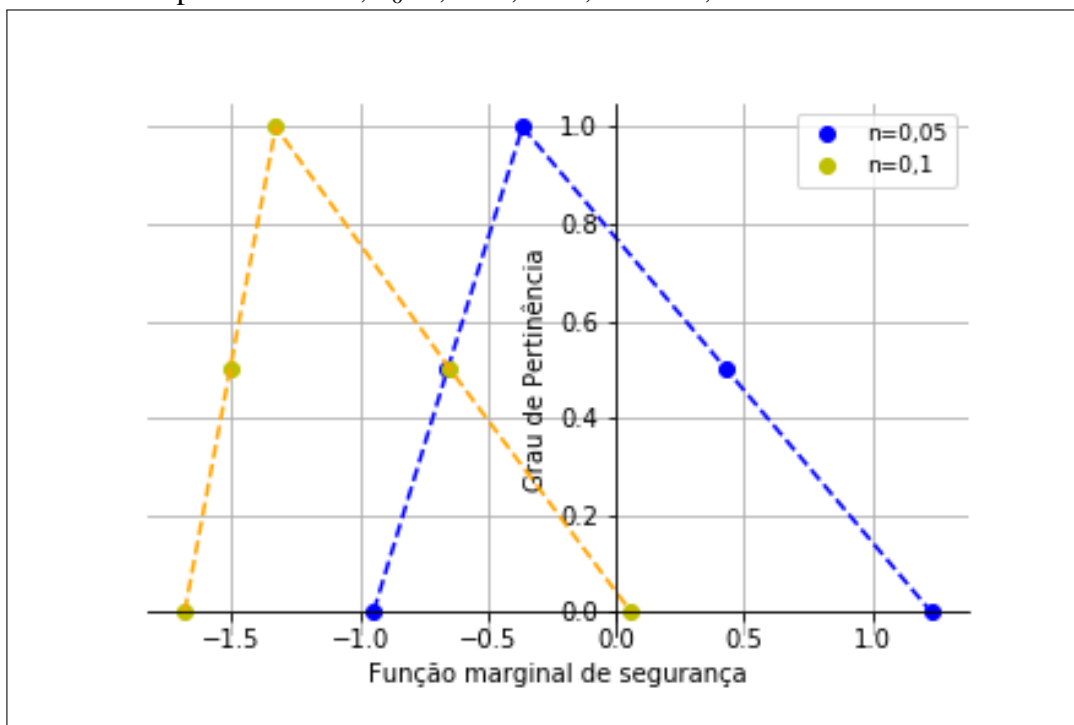
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 46 – Função de pertinência da profundidade da onda cinemática para $n=0,05$ e $n=0,1$, $t=2$ horas e $S_0=0,0005$



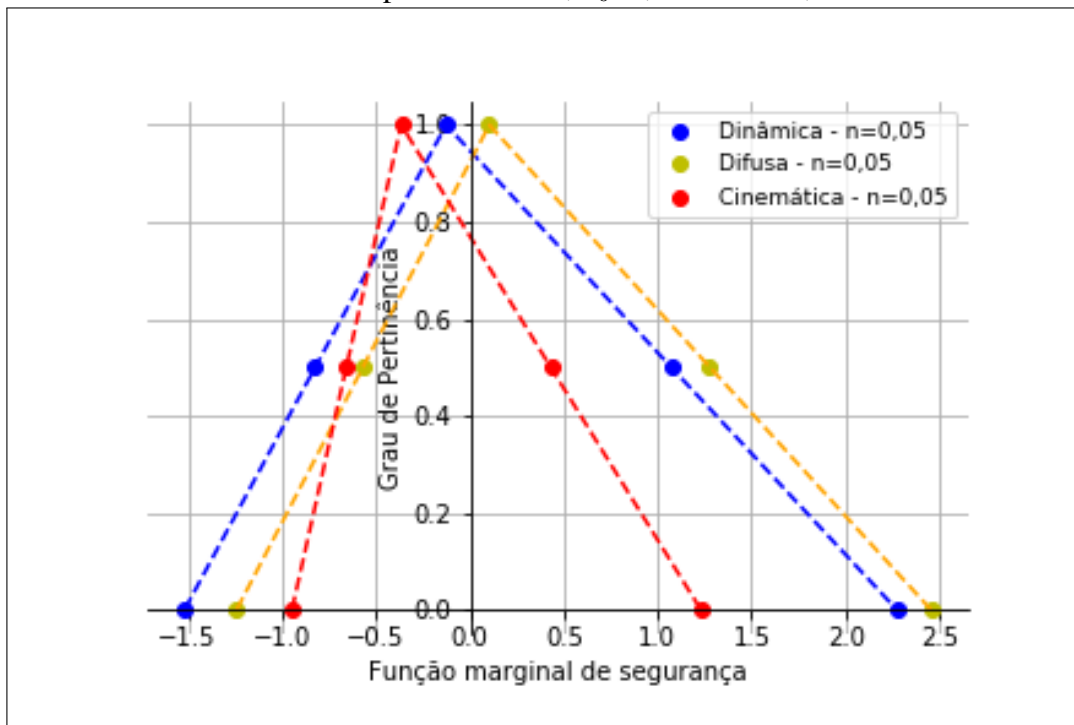
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 47 – Representação *fuzzy* da função marginal de segurança Onda Cinemática para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$, $n=0,05$ e $n=0,1$



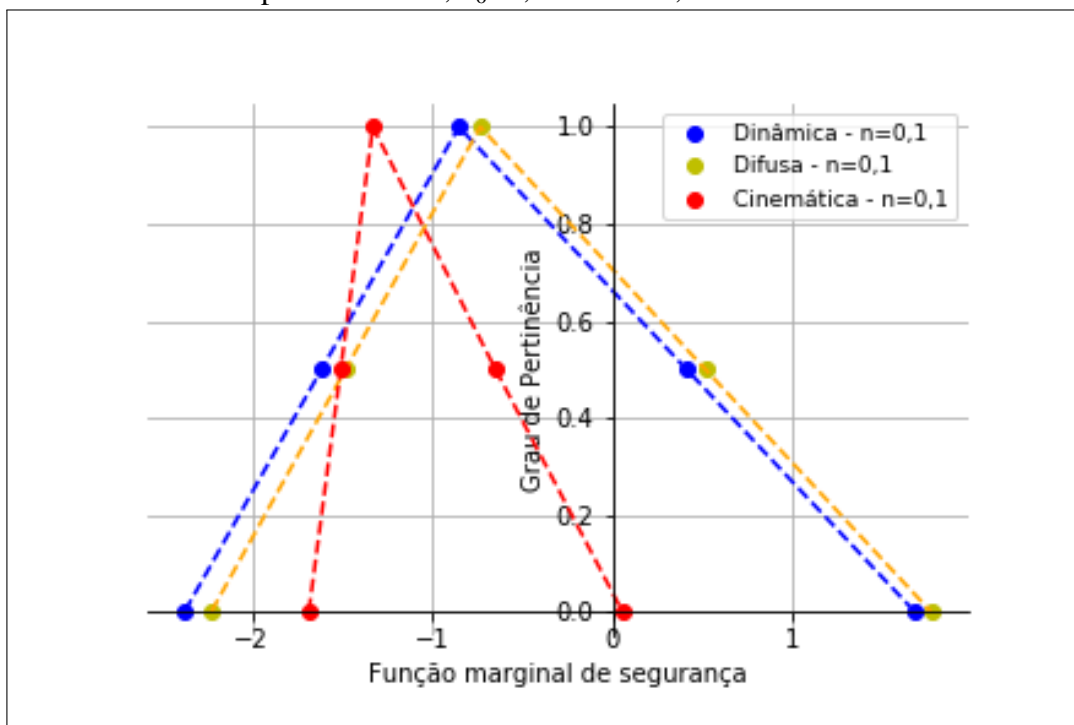
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 48 – Representação *fuzzy* da função marginal de segurança dos modelos hidrodinâmicos para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$ e $n=0,05$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 49 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança dos modelos hidrodinâmicos para $t=2$ horas, $S_0=0,0005$ e $n=0,1$

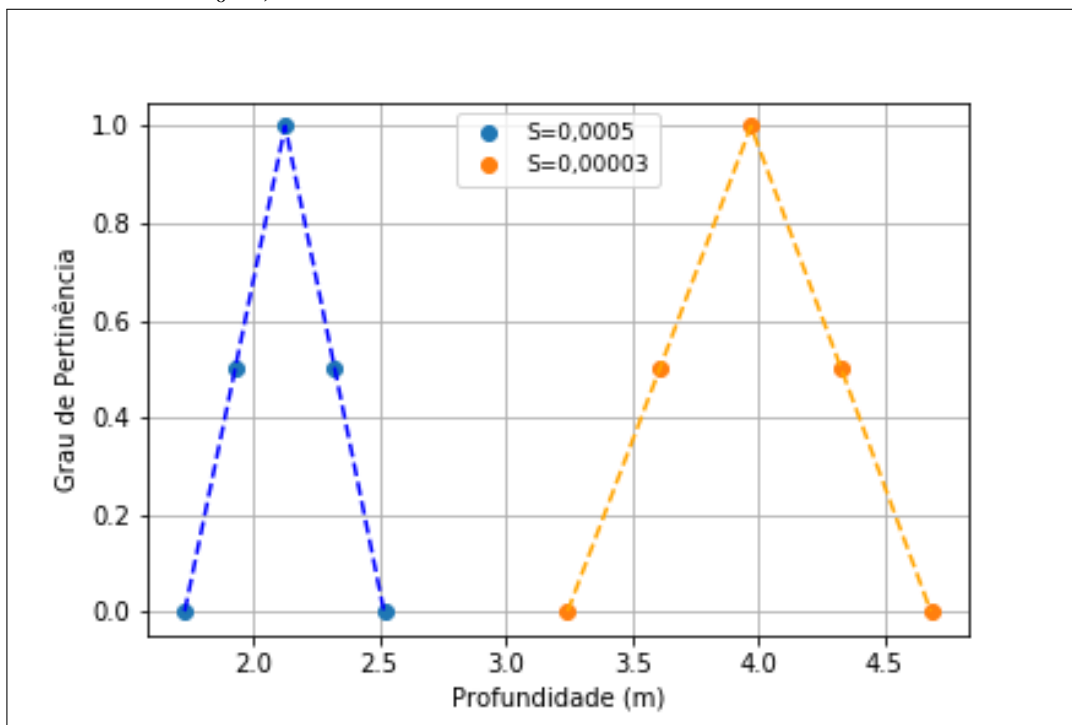


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Através das figuras referidas acima, pode-se, ainda, observar que, quando se altera o maior grau de pertinência da rugosidade, de $n = 0,05$ para $n = 0,1$, as funções de pertinência da profundidade sofrem um deslocamento para a direita, fazendo com que a função margem de segurança se desloque para a esquerda. O resultado induz à conclusão de que, quando se aumenta o n , se aumenta o risco. Este resultado está de acordo com as observações de campo, um vez que, quanto maior o n , maior é a tendência de armazenamento de água no canal, fazendo com que as profundidades cresçam rapidamente.

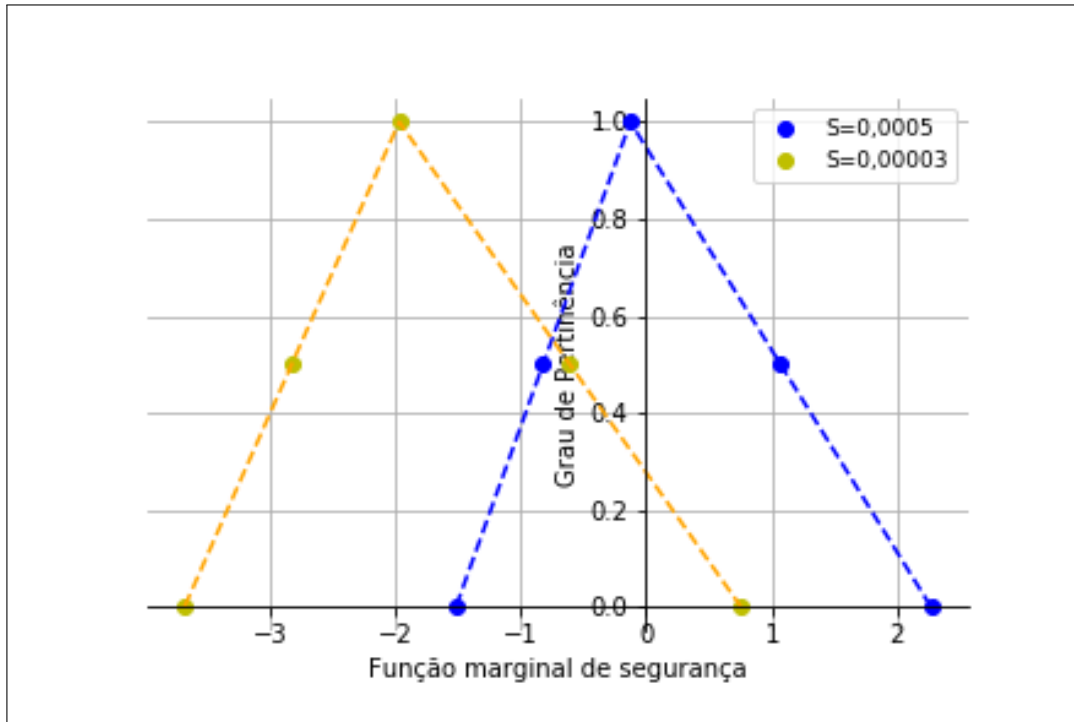
Semelhantes simulações de funções de pertinência foram realizadas para diferentes declividade. Nestes casos, os valores do maior grau de pertinência para estas funções mudaram de $S_0 = 0,0005$ para $S_0 = 0,00003$. As Figuras 50 a 57 mostram os resultados destas simulações para a profundidade, a vazão e a função margem de segurança.

Figura 50 – Função de pertinência onda dinâmica para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$



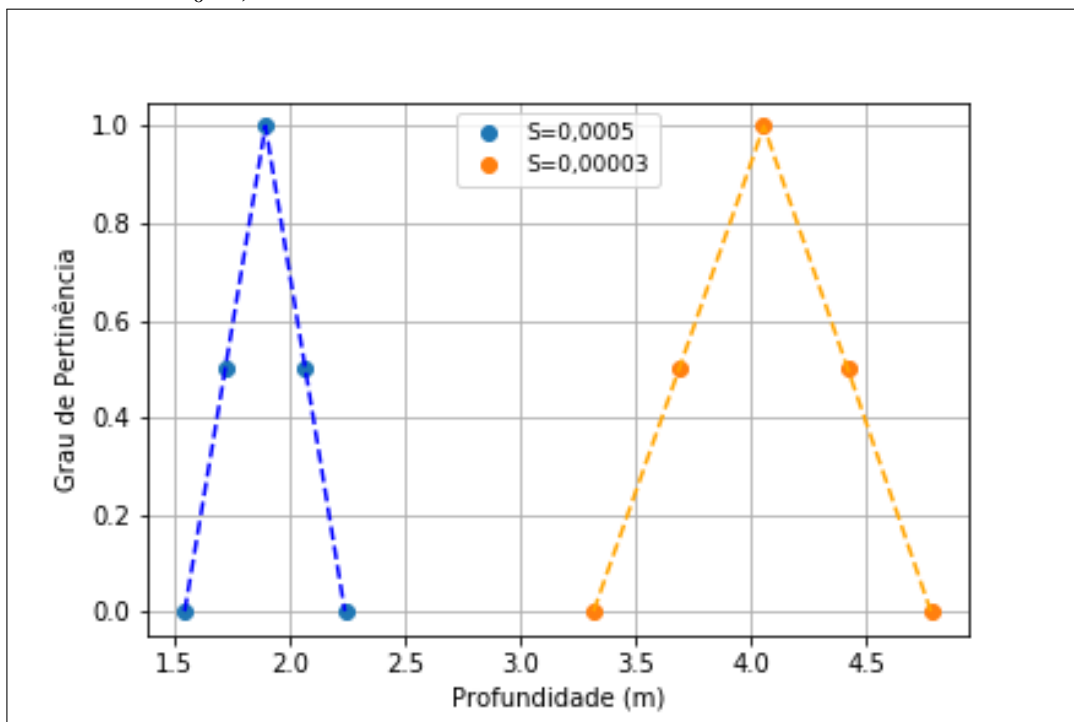
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 51 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança onda dinâmica para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$



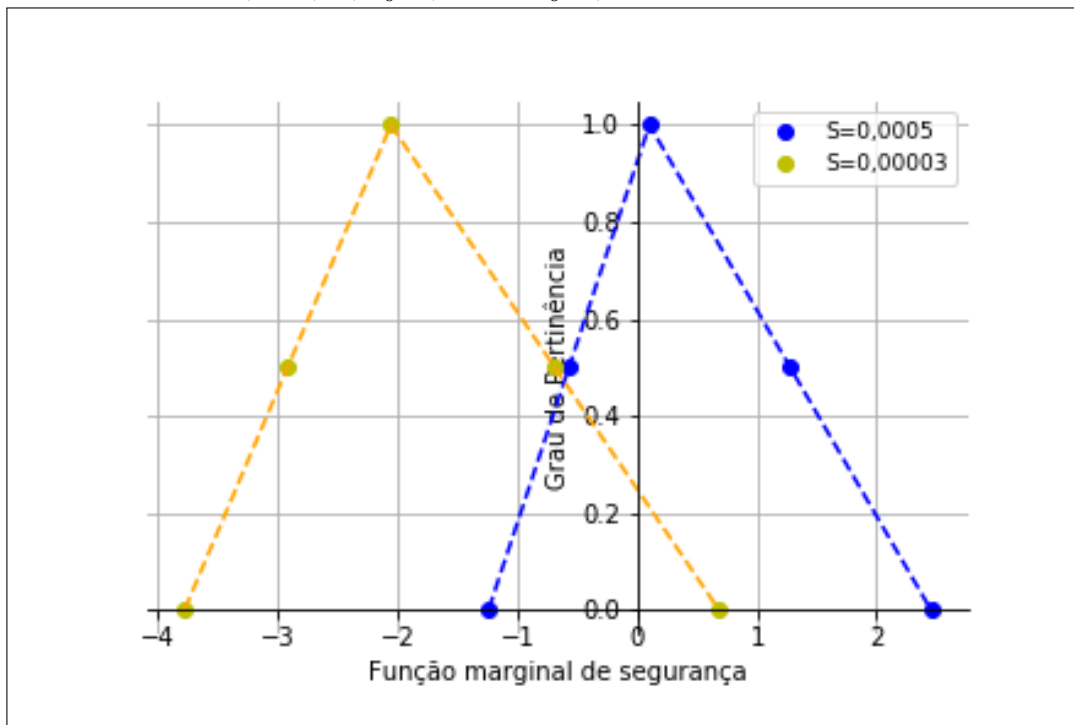
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 52 – Função de pertinência onda difusa para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$



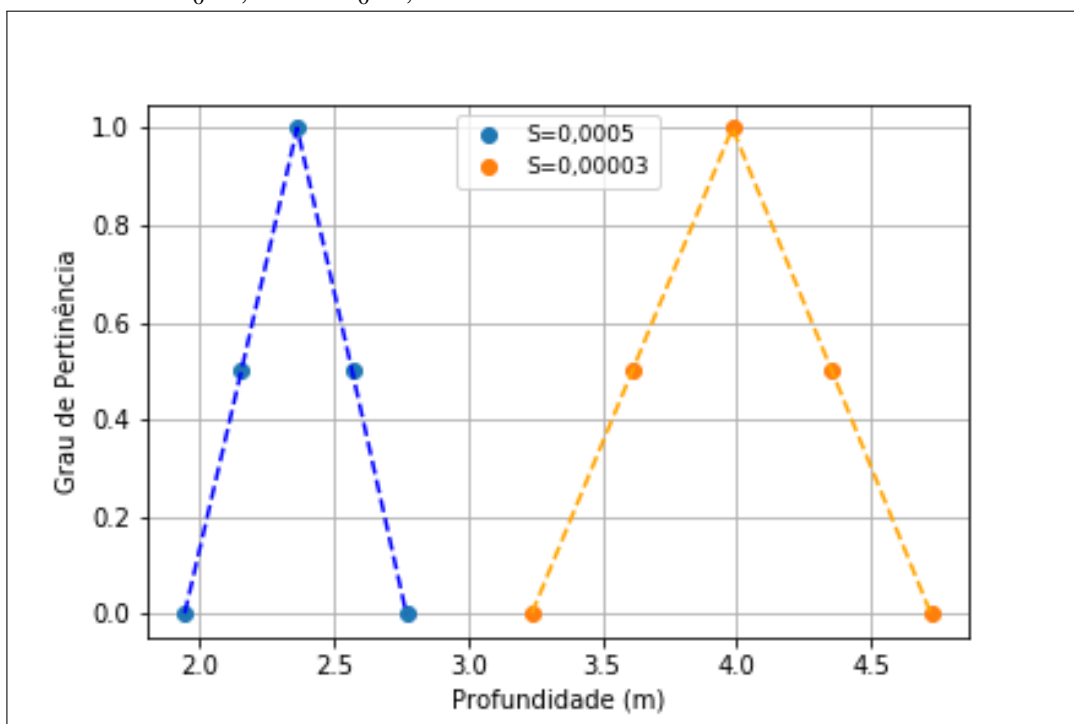
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 53 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança onda difusa para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$



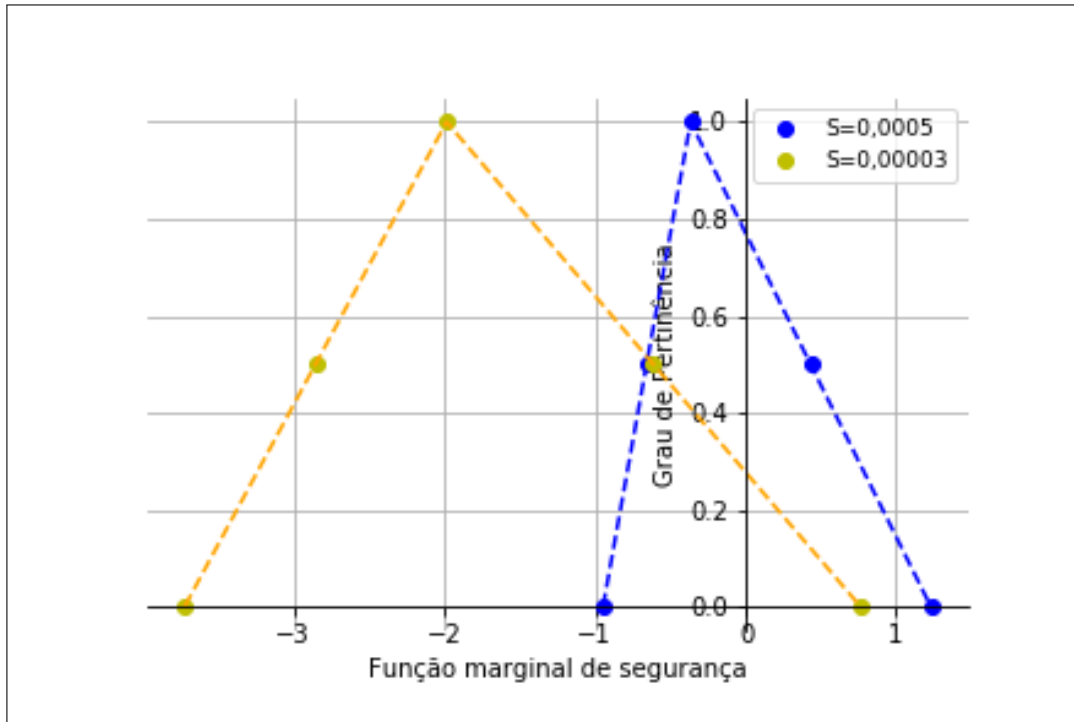
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 54 – Função de pertinência onda cinemática para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$



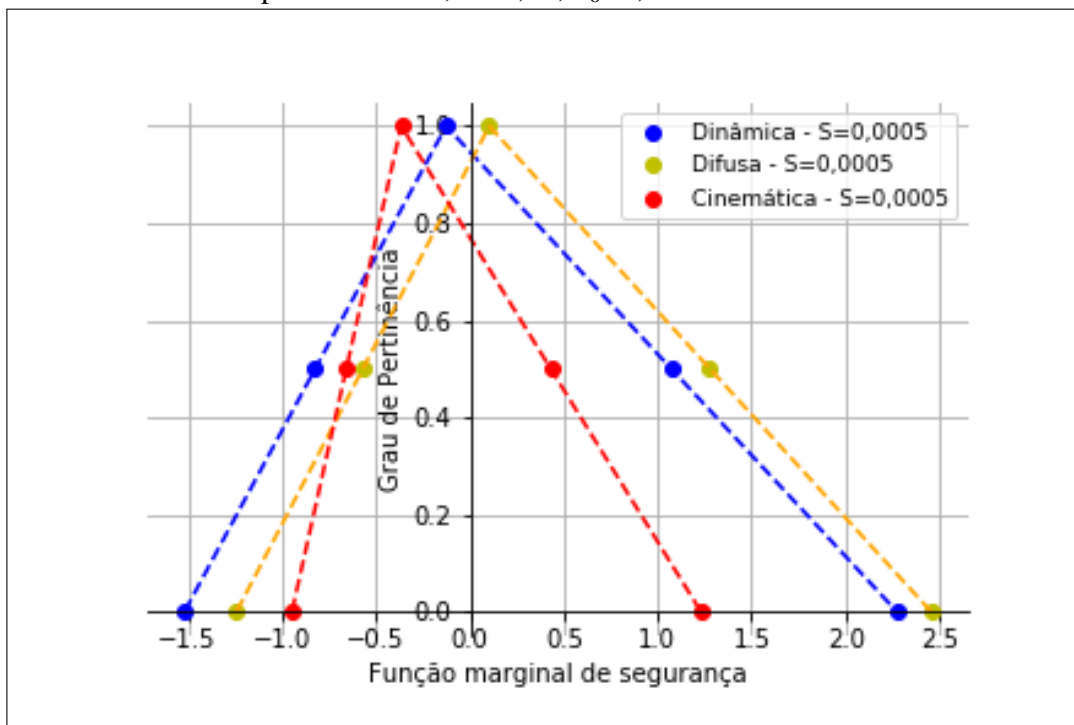
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 55 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança onda cinemática para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$ e $S_0=0,00003$



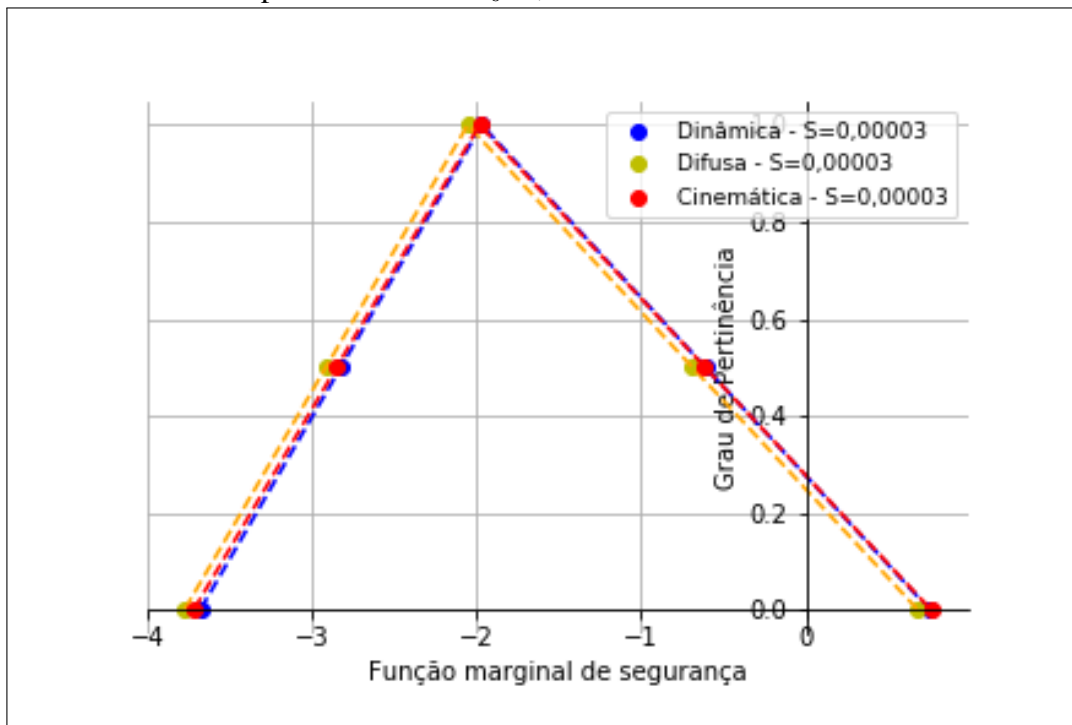
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 56 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança dos modelos hidrodinâmicos para $t=2$ horas, $n=0,05$, $S_0=0,0005$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 57 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança dos modelos hidrodinâmicos para $t=2$ horas e $S_0=0,00003$



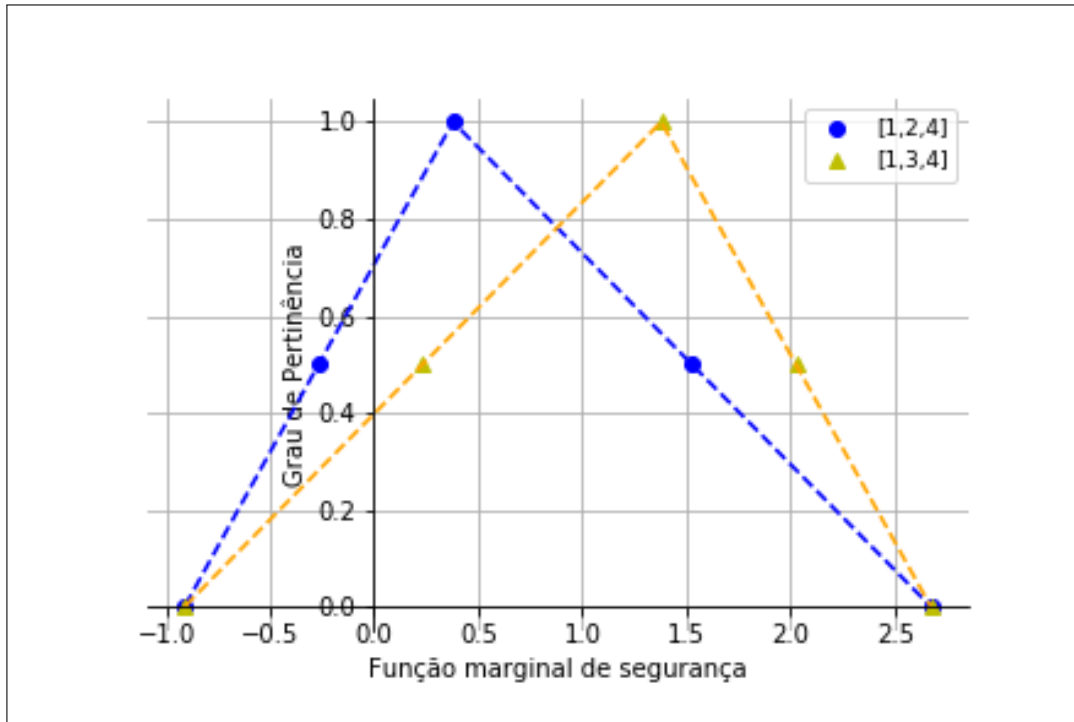
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Como anteriormente, os resultados mostram a influência da declividade no processo de escoamento, fazendo com que, à medida que S_0 cresce, a função de pertinência da profundidade se desloca para a esquerda, enquanto que a função margem de segurança se desloca para a direita. Em outras palavras, o resultado induz a concluir que, para uma mesma onda de cheia, à medida que cresce a declividade, diminui o risco. Estes resultados são inerentes aos modelos hidrodinâmicos.

Na Figura 57 os resultados dos modelos das ondas hidrodinâmicas para o cenário cujo o valor de $S_0=0,00003$ tem-se que tanto a onda difusa quanto a onda cinemática são bem próximos da onda dinâmica. Isto acontece pois para este cenário tanto a onda cinemática *fuzzy* e a onda difusa *fuzzy* se assemelham a onda dinâmica *fuzzy*, pois quanto menor a declividade menor será a capacidade de escoamento, maior será a capacidade de armazenamento de água no canal principal.

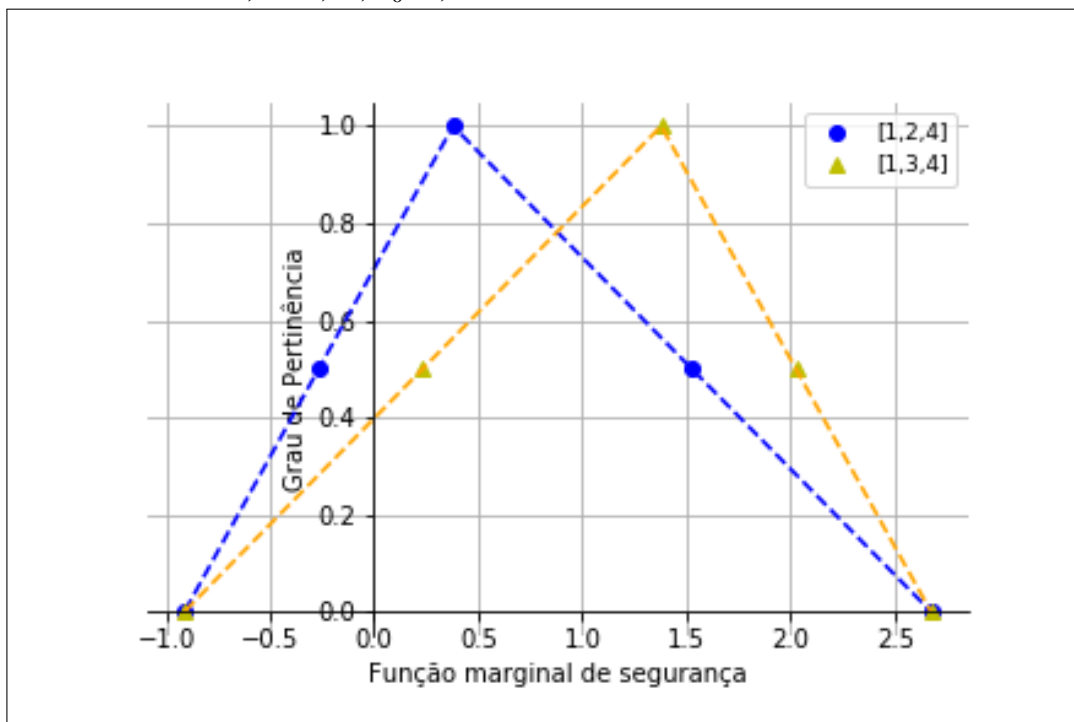
Nas Figuras 58 a 60, procurou-se desenvolver simulações para diferentes funções de resistência, com o objetivo de verificar a influência desta mudança no risco *fuzzy*.

Figura 58 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança onda dinâmica para $t=2$ horas, $n= 0,05$, $S_0=0,0005$



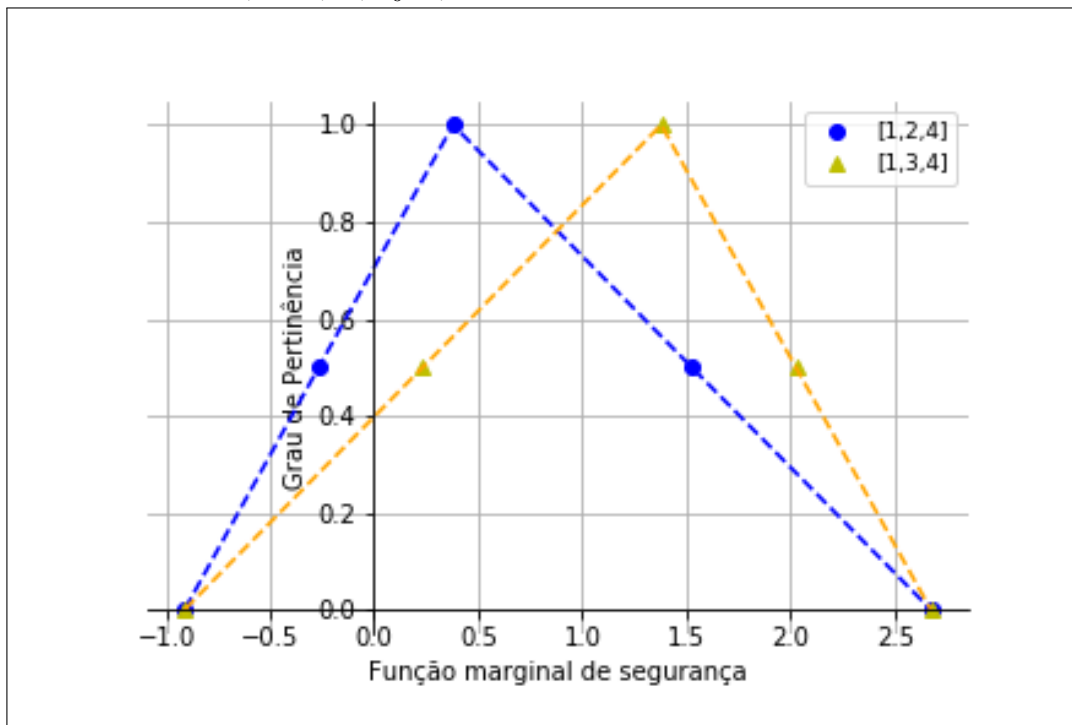
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 59 – Representação *fuzzy* da marginal de segurança onda difusa para $t=2$ horas, $n= 0,05$, $S_0=0,0005$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 60 – Representação *fuzzy* da margem de segurança onda cinemática para $t=2$ horas, $n= 0,05$, $S_0=0,0005$

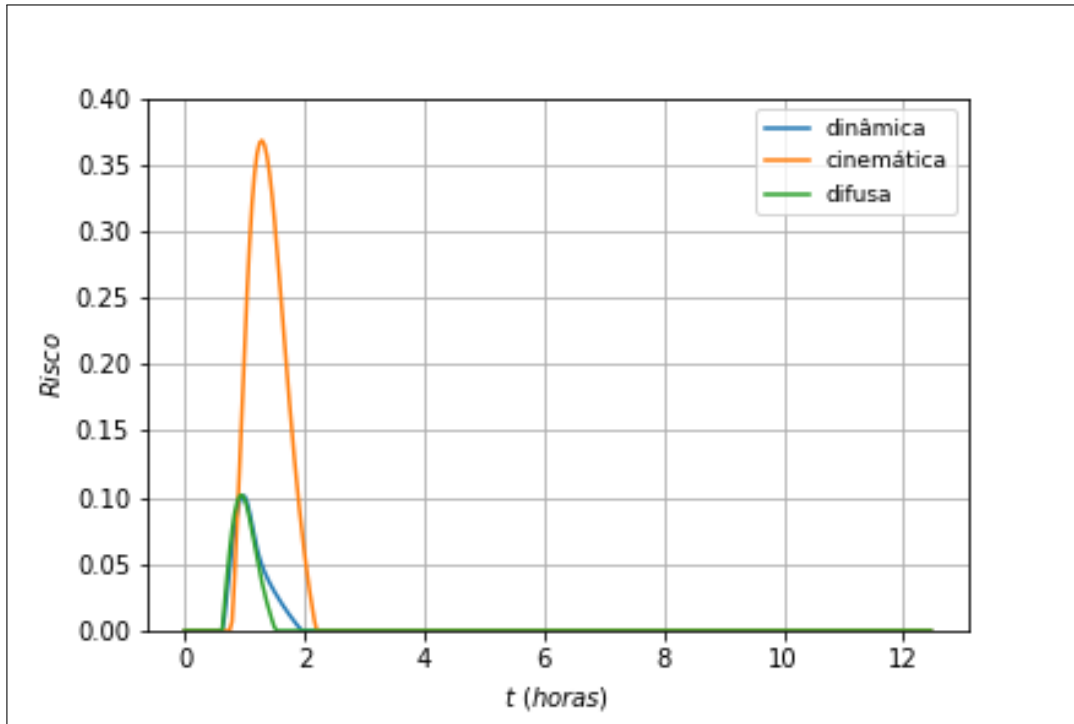


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Os resultados mostram que alterando a função de resistência de $[1, 2, 4]$ para $[1, 3, 4]$, a função marginal de segurança tem o seu grau de maior pertinência alterado de: 0,37932 para 1,379232 na onda dinâmica; 0,37934 para 1,379234 na onda difusa e 0,37934 para 1,379234 na onda cinemática, o que mostra a importância de uma correta definição para a função de pertinência de resistência. Isto é explicado pela própria definição da função marginal de segurança, onde a mesma depende fundamentalmente da resistência e da resposta do canal a uma possível onda de cheia.

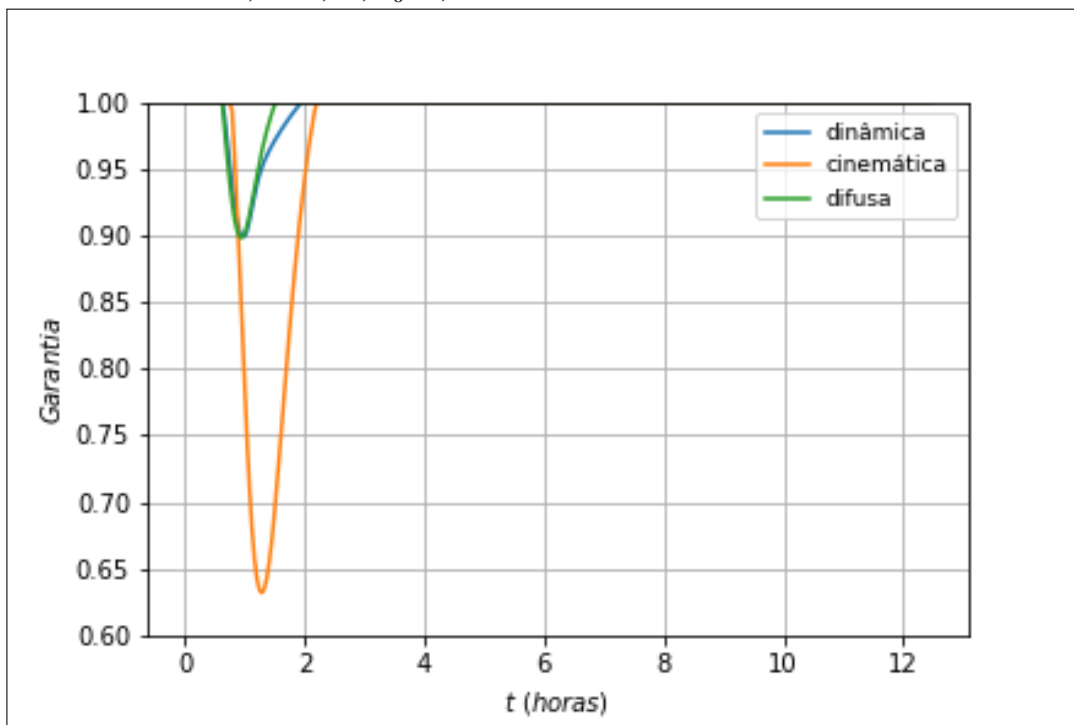
Os estudos, através da teoria *fuzzy*, permitiram o desenvolvimento de simulações com o objetivo de determinar o risco e a garantia de cheias, a partir de uma série de cenários. Estes funcionais da garantia e do risco foram calculados usando, para tal, a função margem de segurança, definida no capítulo de fundamentação teórica, através da Equação 2.16. É importante lembrar que a função margem de segurança é determinada a partir da solução das equações diferenciais *fuzzy* da hidrodinâmica. As Figuras 61 a 63 mostram o comportamento do risco e da garantia *fuzzy* para um cenário, onde uma onda de cheia dinâmica, difusa e cinemática se apresentam com seu pico 5 vezes maior de que a vazão normal, ou seja, tem $CQ = 4$, em um canal de 50 km de comprimento e 50 m de largura, para $n= 0,01$ e $S_0=0,0001$.

Figura 61 – Representação do risco *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n= 0,01$, $S_0=0,0001$



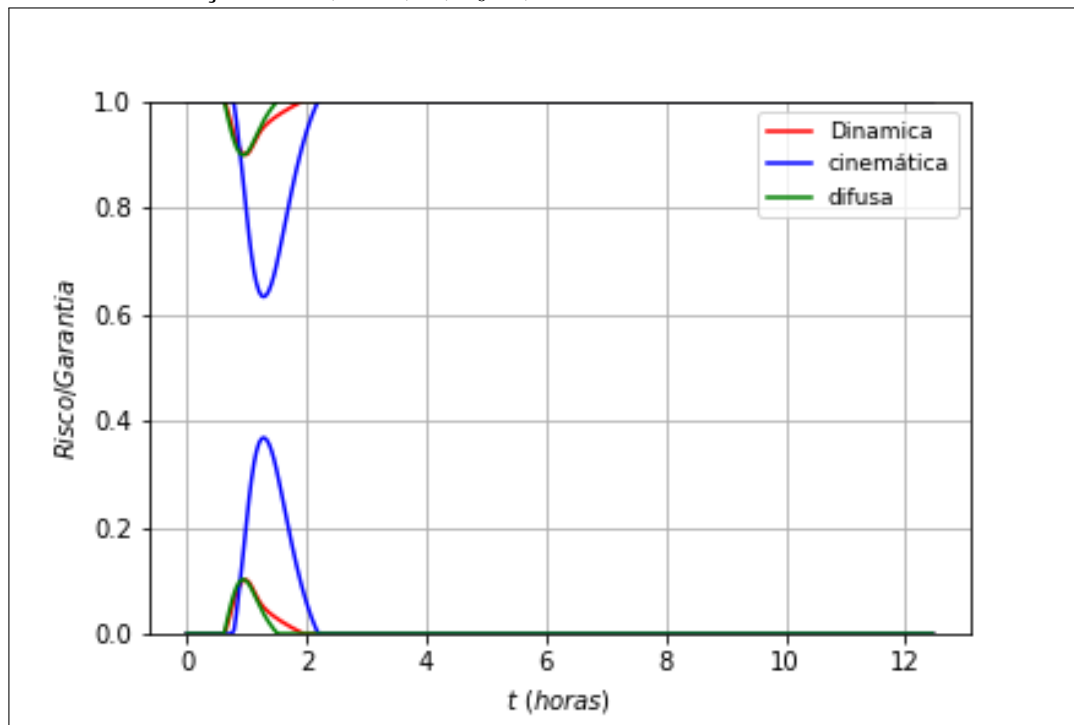
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 62 – Representação da garantia *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n= 0,01$, $S_0=0,0001$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 63 – Representação do risco e garantia *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n= 0,01$, $S_0=0,0001$



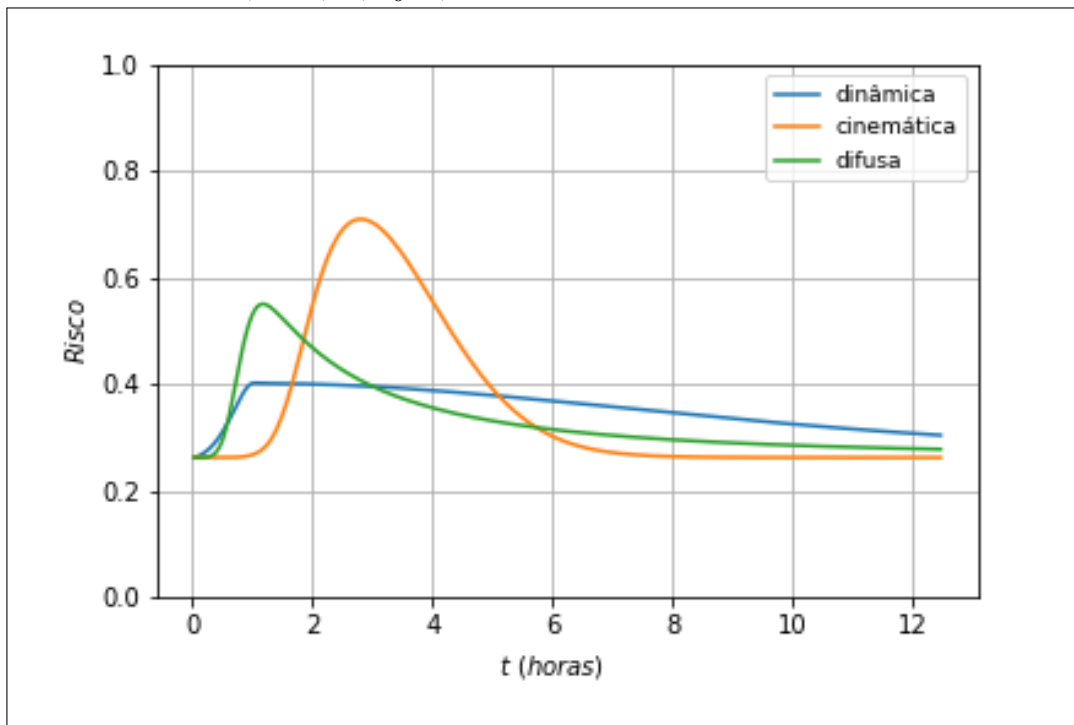
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

As Figuras 61 a 63 mostra o comportamento do risco e da garantia para uma seção a 10 km do início do canal, ao longo do tempo. Através das figuras referidas acima, observa-se, risco das ondas dinâmica e difusa aumentando a partir de 1,1 hora e para a onda cinemática a partir de 1,5 h, onde corresponde exatamente à chegada da onda de cheia no canal.

Em outras palavras, as figuras mostram o aspecto dinâmico do risco para os modelos hidrodinâmicos, onde até 1,3 hora (as ondas dinâmica e difusa) e até 1,5 hora (onda cinemática), é o tempo necessário para a onda chegar na seção de observação. Até esse momento não se verifica nenhuma alteração no risco, mas a partir desse momento, com a chegada da onda, o risco começa a crescer em função da dimensão da onda de cheia. O intervalo da passagem da onda dinâmica é de 1,1 h até 1,8 h, para a onda difusa de 1,1h até 2h e para a onda cinemática é de 1,5h até 2,4h.

A pesquisa também analisou o comportamento do risco e da garantia, variando as funções de pertinência da rugosidade e da declividade. O objetivo é verificar de que forma estes parâmetros influenciam no cálculo do risco e da garantia. Para esta simulação, as funções de pertinência para a rugosidade utilizadas foram as seguintes: [0,0225; 0,03; 0,0375] e [0,0075; 0,01; 0,0125].

Figura 64 – Representação do risco *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n= 0,03$, $S_0=0,0001$

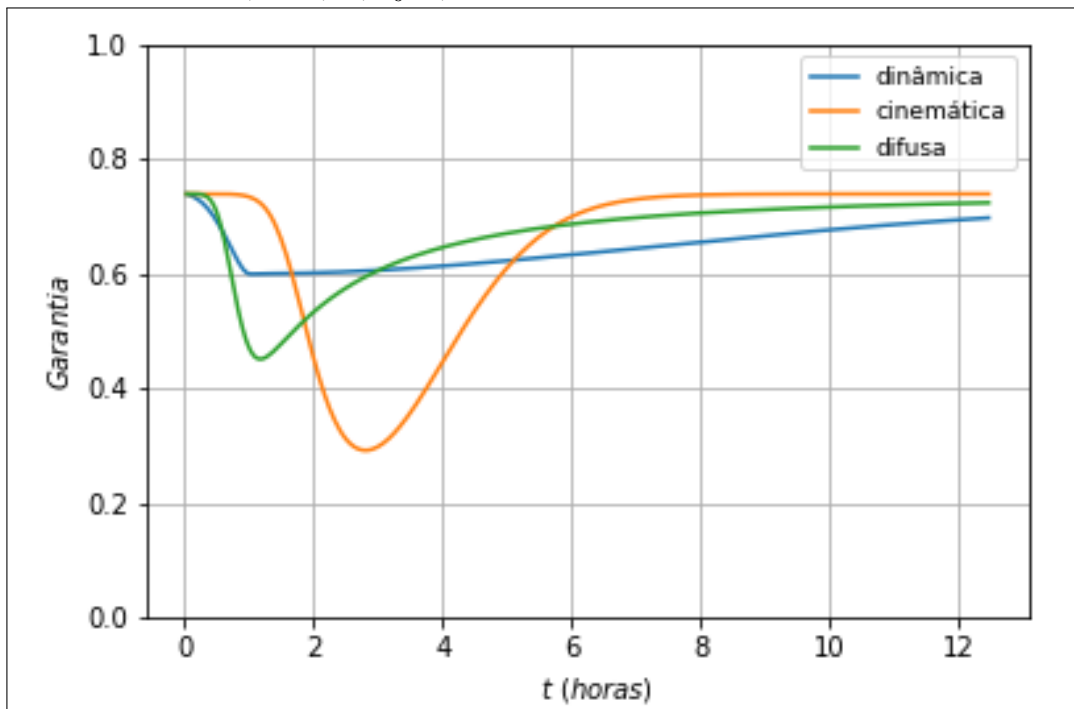


Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

As Figuras 61 e 64 comparam os resultados do risco para diferentes valores da rugosidade n , ao longo do tempo, permitindo, assim, comprovar a análise anterior. Aumentando o valor de n , aumenta o risco. Quando o coeficiente de rugosidade n passa de 0,01 para 0,03, o risco aumenta significativamente. Como a garantia tem um comportamento inverso do risco, seus valores se alteram de forma contrária ao risco, conforme apresentado na Figura 65.

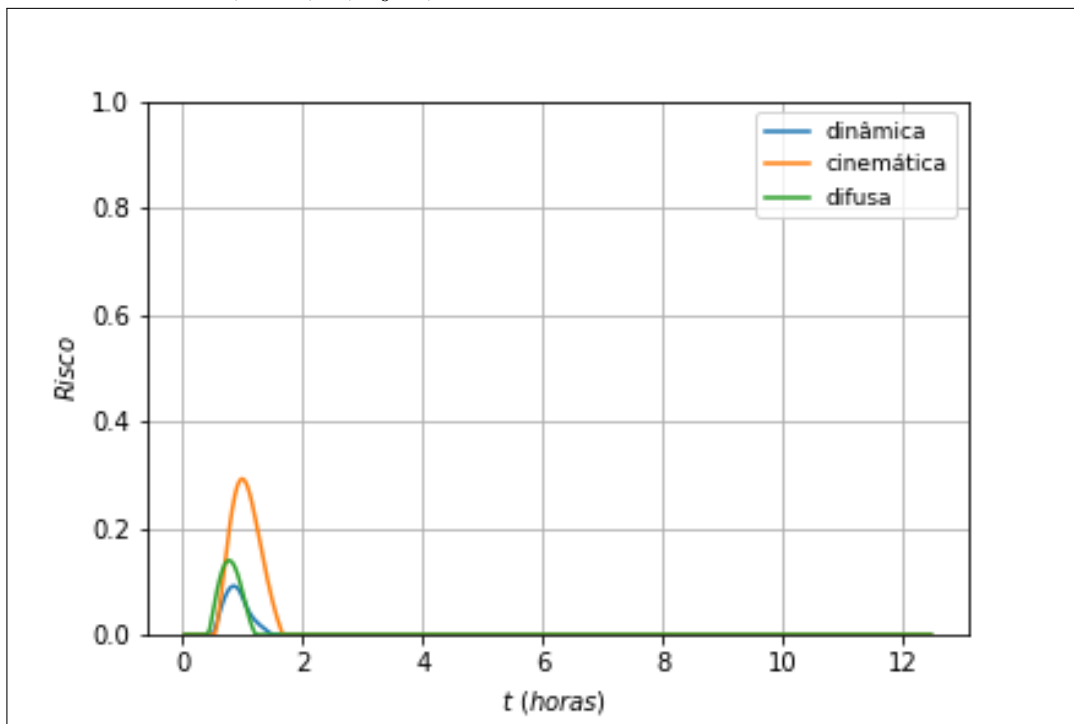
Com relação à declividade, foram também realizadas simulações para duas funções de pertinência diferentes, onde seus valores são [0,00075; 0,0001; 0,00125] e [0,0000375; 0,00005; 0,0000625]. Os resultados permitem afirmar que a declividade desempenha um papel igualmente importante no comportamento do risco e da garantia. Pelas Figuras 66 e 67, pode-se verificar que, quanto maior é a declividade, menor é o risco e maior é a garantia. Estes resultados obedecem, como na análise anterior, ao comportamento da declividade do canal principal.

Figura 65 – Representação da garantia *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 10km, $n= 0,03$, $S_0=0,0001$



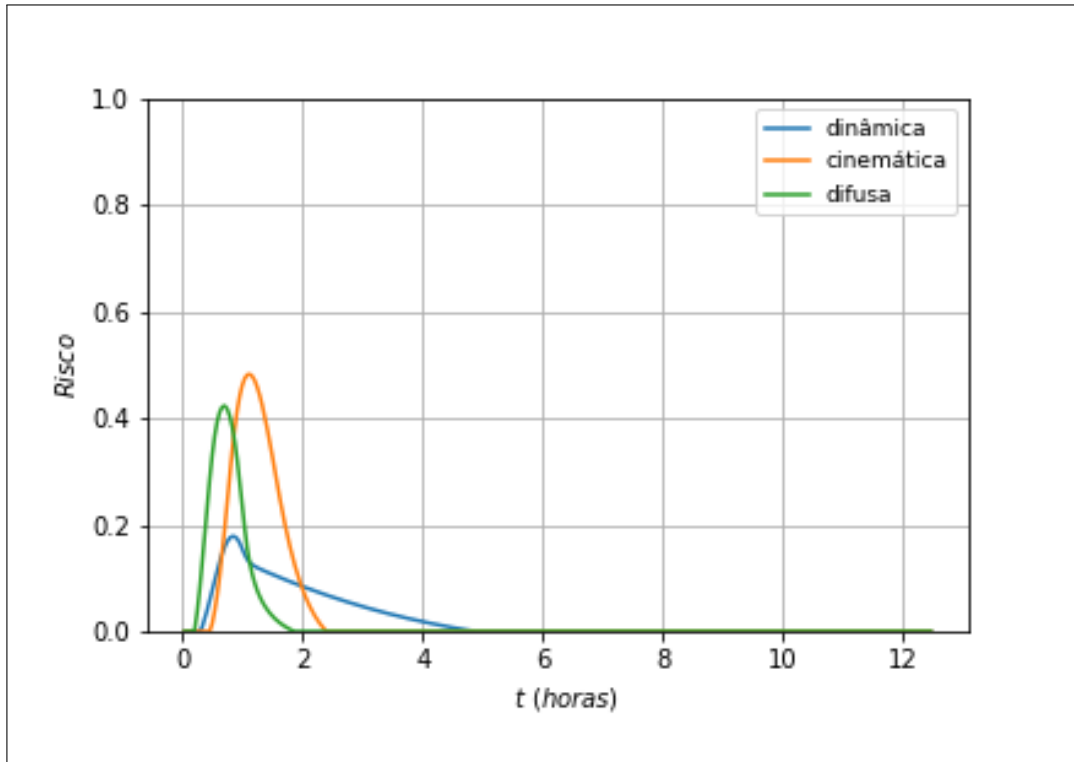
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 66 – Representação do risco *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 5km, $n= 0,01$, $S_0=0,0001$



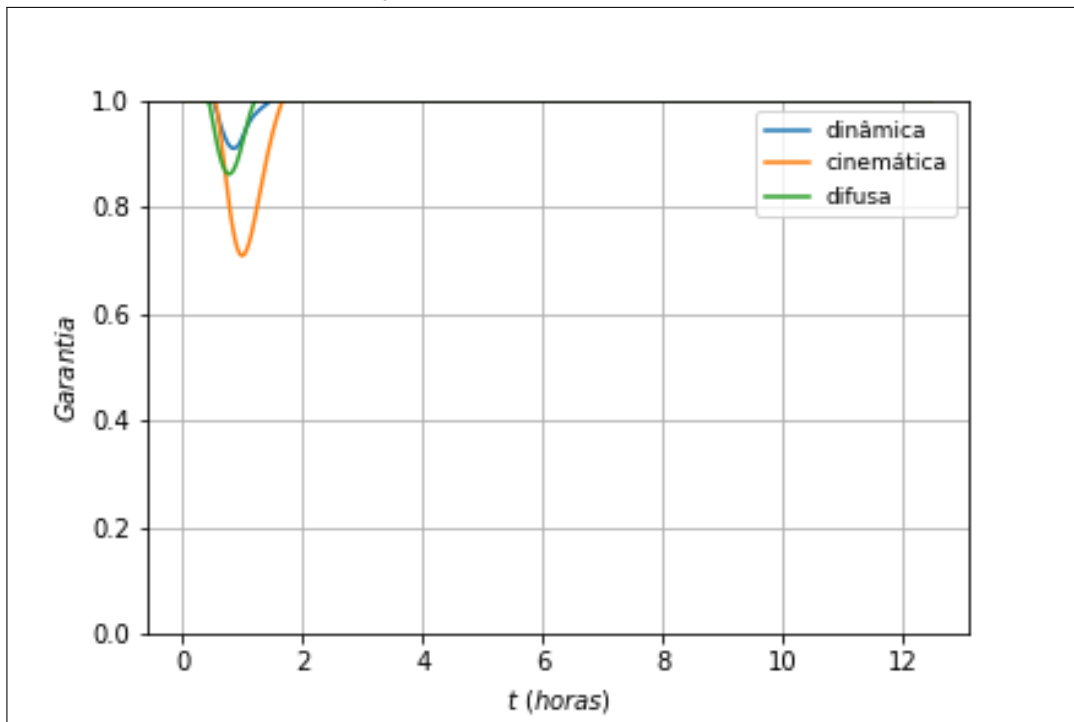
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 67 – Representação do risco *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 5km, $n= 0,01$, $S_0=0,00005$



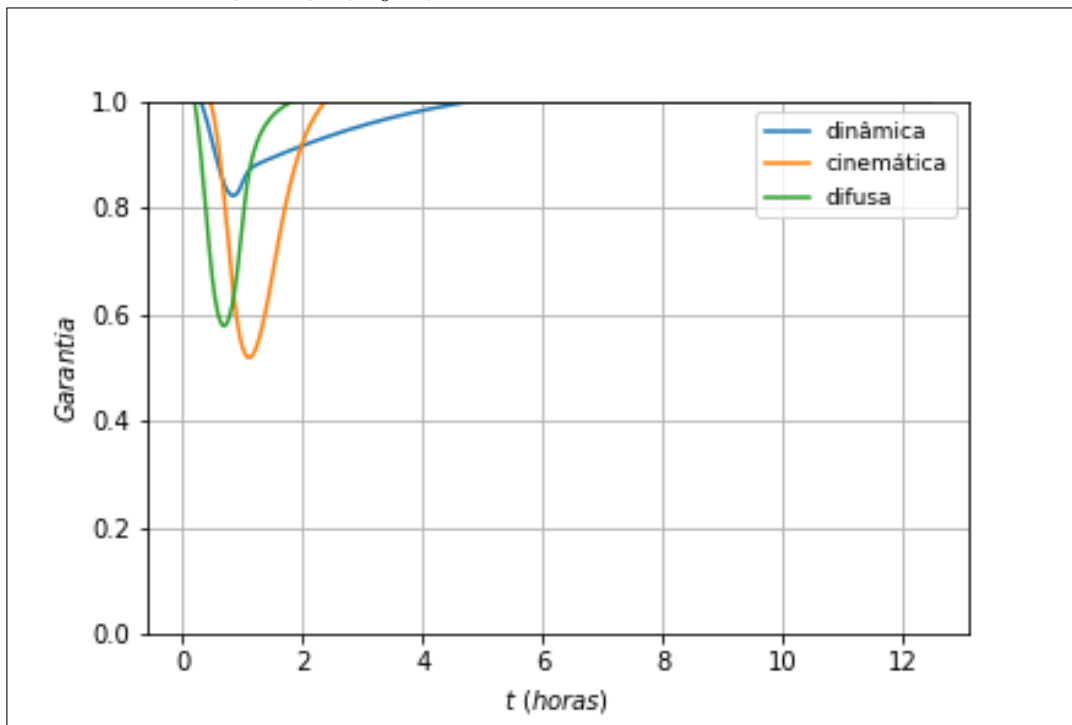
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 68 – Representação da garantia *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 5km, $n= 0,01$, $S_0=0,0001$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 69 – Representação da garantia *fuzzy* dos modelos hidrodinâmicos na seção 5km, $n= 0,01$, $S_0=0,00005$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

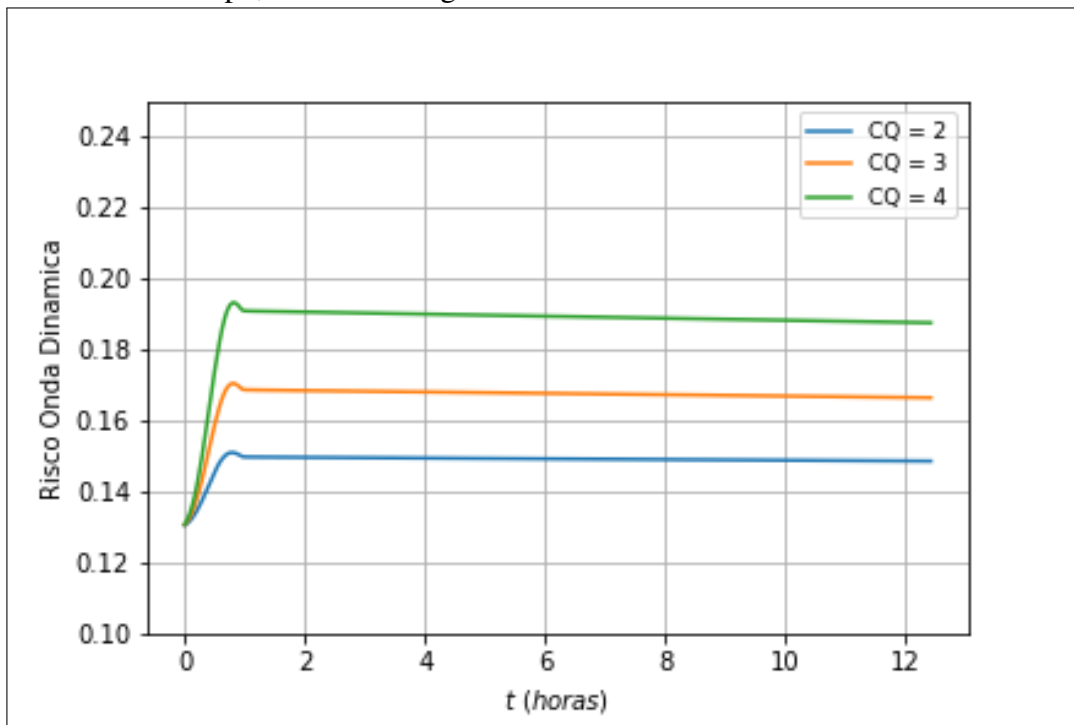
Neste caso, quanto maior é a declividade, maior a capacidade de escoamento e menor é a capacidade de armazenamento de água no canal principal.

4.4 Potencial de Aplicação em Escala Real

O estudo fez também simulações tomando como base os dados do Rio Cocó na Região Metropolitana de Fortaleza. Admitiu-se uma função de resistência para uma cota média de 3 m em relação ao fundo do canal, como valor mais provável para a altura da superfície da água em relação ao fundo. Como a vazão de escoamento uniforme foi considerada uma vazão média de $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

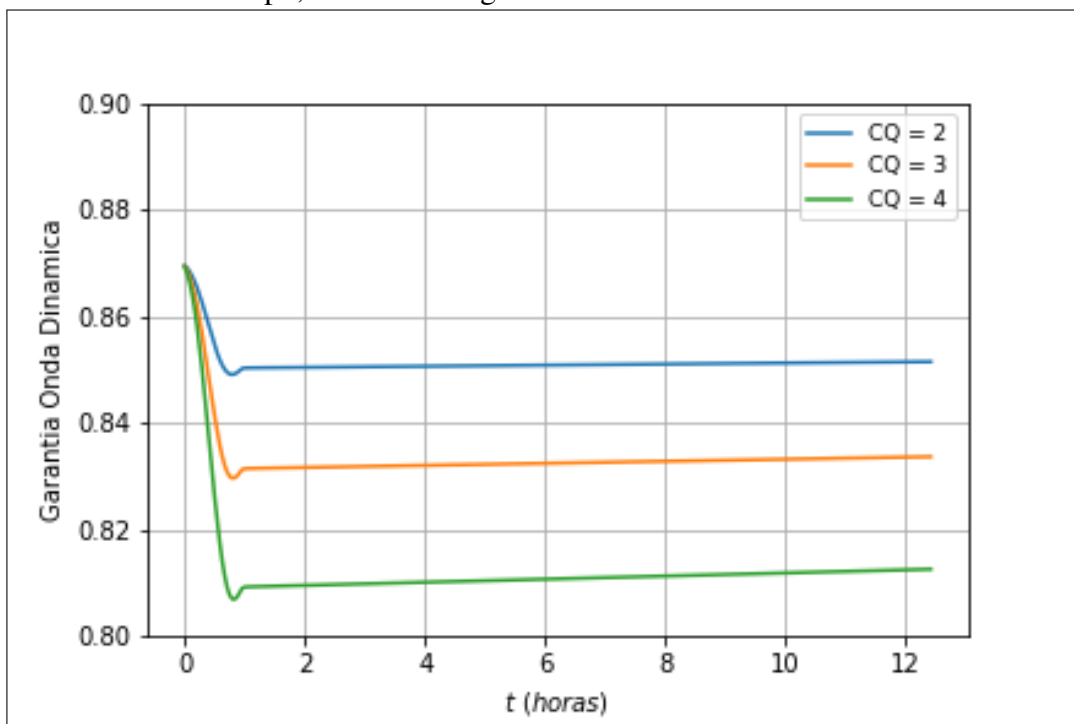
As Figuras 70 e 71, em uma seção distante 5 km da origem do segmento, mostram os resultados da simulação para picos de onda dinâmica: 3 vezes ($CQ=2$), 4 vezes ($CQ=3$) e 5 vezes ($CQ=4$) maior que de vazão inicial.

Figura 70 – Campos de risco para diferentes picos de onda dinâmica, ao longo do tempo, a 5 km da origem



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 71 – Campos de garantia para diferentes picos de onda dinâmica, ao longo do tempo, a 5 km da origem



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

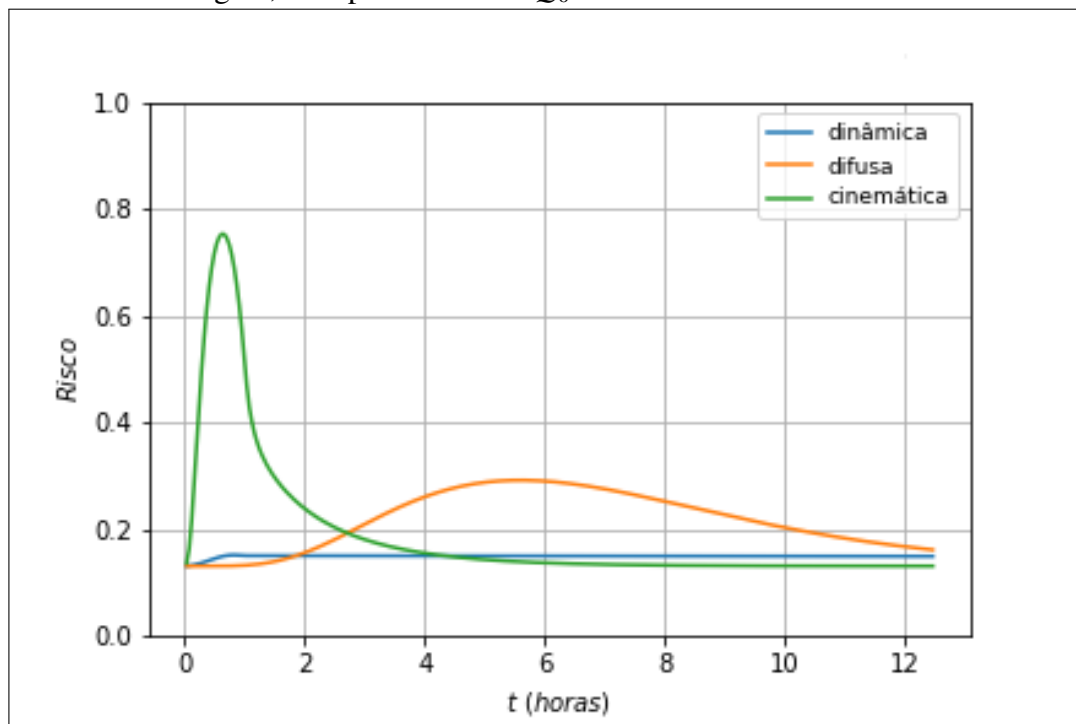
De acordo com os resultados, observa-se que o risco máximo ocorre aproximadamente 0,8 hora após a entrada da onda, sendo o seu valor de aproximadamente 19 % quando o

pico da onda é 5 vezes maior do que a vazão média.

Os resultados mostram que o risco de enchente, para estes dados do Rio Cocó, é significativo, tendo a sua garantia um valor de aproximadamente 81%, mostrando, assim, uma certa fragilidade para esta bacia quando sujeita a chuvas intensas.

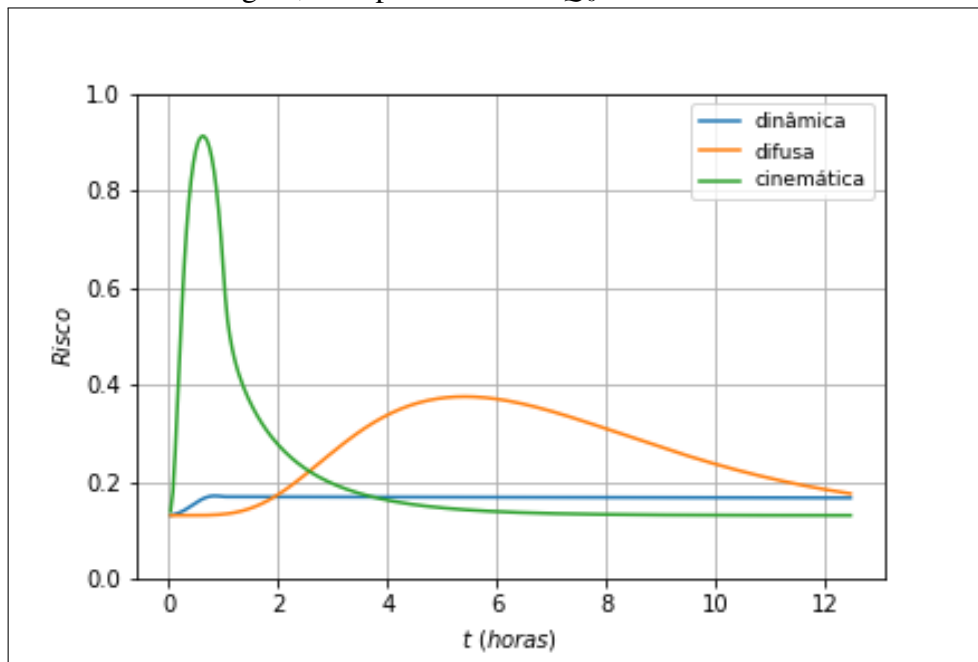
As figuras seguintes mostram uma comparação direta entre os riscos de cada modelo de propagação de cheia para os diferentes picos de onda, tomando como base os dados do rio Cocó utilizados na simulação anterior.

Figura 72 – Campos de risco de cheias para modelos hidrodinâmicos, a 5 km da origem, com pico de onda $3Q_0$



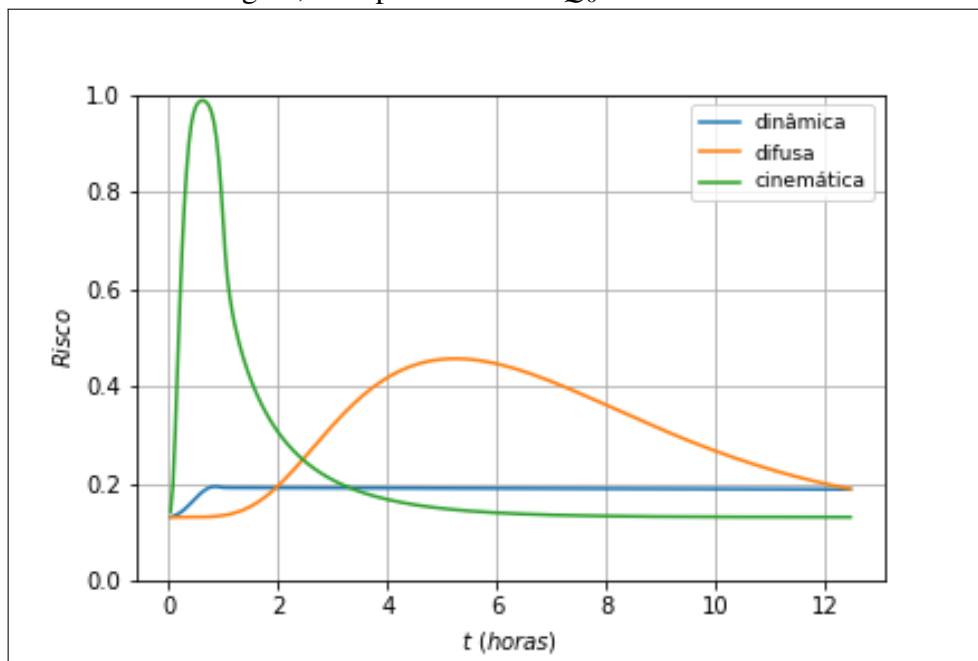
Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 73 – Campos de risco de cheias para modelos hidrodinâmicos, a 5 km da origem, com pico de onda $4Q_0$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

Figura 74 – Campos de risco de cheias para modelos hidrodinâmicos, a 5 km da origem, com pico de onda $5Q_0$



Fonte: Elaborada pela Autora, 2019.

De acordo com os resultados, o risco aumenta de acordo com o aumento da pico da onda de cheia para os modelos hidrodinâmicos. Para estes dados do rio Cocó, a onda difusa e cinemática apresentam um aumento significativo no risco quando comparado ao modelo da onda dinâmica.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Após uma série de simulações para diferentes cenários propostos, realizadas através da aplicação do programa computacional desenvolvido especialmente para o estudo, os resultados permitem concluir:

- O programa matemático-computacional desenvolvido para resolver equações Hidrodinâmicas respondeu com eficiência aos objetivos da pesquisa, apresentando excelentes resultados para as mais diversas situações práticas encontradas no seu campo de trabalho;
- A Teoria *Fuzzy* em modelos hidrodinâmicos, quando tratado adequadamente, permitiu obter Funções de Pertinências para as variáveis de controle. Desta forma, a metodologia proposta permitiu determinar os campos de vazão, área e profundidade, em sua forma *fuzzy*, onde as incertezas podem ser medidas. Tornando possível, assim, que campos de risco possam ser determinados com o auxílio de sub-rotinas apropriadas;
- Na modelagem hidrodinâmica *fuzzy* foi verificado por meio das simulações as zonas de maiores graus de pertinência. Isto é fundamental para mostrar a diferença entre os modelos determinísticos, onde não há incorporação de incertezas, e os modelos *fuzzy*, onde a incerteza pode ser mostrada e calculada. Os resultados mostraram que essas zonas de possibilidades com diferentes graus de pertinência são determinantes para análise de incertezas, e para o cálculo do risco;
- A comparação realizada entre os modelos da onda dinâmica, difusa e cinemática, mostrou que, para o cenário considerado, a onda difusa é a que mais se aproxima da onda dinâmica. Isto não quer dizer que o resultado seja aplicável para qualquer cenário, ao contrário, é possível haver situações em que as forças de inércia e de pressão não exerçam papéis relevantes o que fará com que os três modelos sejam equivalentes;
- Com base nos resultados gerados pelo modelo hidrodinâmico *fuzzy*, foi possível determinar o comportamento da vazão, área e profundidade para as seções 10km e 20km do canal natural, para diferentes níveis de pertinência, permitindo assim avaliar a influência dos parâmetros hidrodinâmicos em sua forma *fuzzy* e quantificar as incertezas presentes ao longo da propagação das ondas dinâmica,

difusa e cinemática;

- Os resultados mostraram que o modelo da onda dinâmica apresenta maior região de incertezas quando comparada aos outros dois modelos, isto é, a distância entre os limites inferiores e superiores o modelo da onda dinâmica é maior quando comparada aos outros modelos de onda difusa e a onda cinemática. E o modelo que apresenta a menor região de incertezas é a onda cinemática;
- As funções de pertinência da profundidade, com maior grau de pertinência, para um número *fuzzy* triangular, se deslocam para a direita à medida que aumenta o maior grau da função de pertinência para a rugosidade(n). Este resultado fez com que a função marginal de segurança se desloque para a esquerda, aumentando o risco de cheia e reduzindo a garantia para os três modelos de propagação de cheia;
- Para a avaliação da influência da declividade no processo de escoamento, as simulações mostraram que, com o aumento do maior grau de pertinência para S_0 , há um deslocamento do maior grau da função de pertinência da profundidade para a esquerda, fazendo com que a função marginal de segurança se desloque para a direita. Para os três modelos de propagação de cheia, o resultado induz a concluir que a medida que a declividade aumenta, o risco de cheia diminui;
- O modelo proposto mostrou perfil do risco da propagação de cheia dos três modelos hidrodinâmicos para diferentes tempos durante a passagem de uma onda de cheia. O resultado mostrou que é possível, através desta metodologia calcular o risco de cheia ao longo do canal, para diferentes tempos;
- Com base nos resultados gerados pelo modelo hidrodinâmico *fuzzy* foi feita uma análise da influência da declividade e rugosidade na avaliação do risco e da garantia de cheias. Os testes mostraram que quanto maior a rugosidade maior o risco e menor a garantia;
- O uso do modelo *fuzzy* proposto aplicado no rio Cocó foi possível calcular o risco e a garantia, mesmo com dados escassos. Nesta simulação foi possível calcular o risco para diferentes cenários, verificar a influência dos parâmetros hidráulicos quanto ao risco.

Como recomendações propõe-se que:

- Estudos sejam realizados através de um modelo composto de uma combinação

da Teoria *Fuzzy* e da teoria probabilística, sendo os parâmetros hidrológicos, com comportamento aleatório, tratados probabilisticamente, enquanto que, os parâmetros hidráulicos, sejam tratados com base na Teoria *Fuzzy*;

- Adaptar o modelo para um sistema rio-estuário e estudar a interação deste conjunto quando sujeito a grandes variabilidades hidrológicas;
- Aplicar o modelo para importantes rios urbanos do Estado do Ceará. Neste caso, um processo completo de calibração e validação do modelo deverá ser definida para que se possa desenvolver um plano de uso e aproveitamento dos rios.

REFERÊNCIAS

- ABEBE, Y.; KABIR, G.; TESFAMARIM, S. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using gis applications and bayesian belief network model. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 1629–1641, 2018.
- AMEIN, M.; CHU, H. L. Implicit numerical modeling of unsteady flows. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 101, p. 717–731, 1974.
- ANDERSON, D. A.; TANNEHIL, J.; PLETCHER, R. H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**. 3. ed. [S.l.]: Series in Computational and Physical Processes in Mechanics and Thermal Sciences CRC Press, 2012. 774 p.
- ANDRADE, M. M. N.; SZLAFSZTEIN, C. F. Vulnerability assessment including tangible and intangible components in the index composition: an amazon case study of flooding and flash flooding. **Science of the Total Environment**, v. 630, p. 903–912, 2018.
- AUDUSSE, E.; BRISTEAU, M. O. Finite-volume solvers for a multilayer saint-venant system. **International Journal of Applied Mathematics and Computer Science**, v. 17, n. 3, p. 311–320, 2007.
- BARRETO, J. M. **Inteligência artificial no limiar do século XXI**. [S.l.]: 3edição. Rô Rô Rô Editora. Florianópolis, 2001. 392 p.
- BATES, P. D.; WILSON, C. A. M. E.; M., H. J.; STEWART, M. D. Two dimensional finite element modelling of floodplain flow. **La Houille Blanche**, v. 4, n. 3, p. 82–88, 1999.
- BAUTZER, T. **Uma das piores enchentes da história do rio Mississipi afeta culturas em todo o sul dos Estados Unidos**. 2011. Disponível em: <<http://revistadinheirorural.terra.com.br/secao/agronegocios/plantacoes-afogadas.htm>>. Acesso em: 8 out. 2017.
- BISC. **Internal Communications**. [S.l.]: University of California, Berkeley. CA. USA, 2014. 82–88 p.
- BRASIL. Lei nº 12.608, de 12 de abril de 2012. Institui a política nacional de proteção e defesa civil-PNPDEC; dispõe sobre o sistema nacional de proteção e defesa civil-SINPDEC e o conselho nacional de proteção e defesa civil-CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 13 abr. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Acesso em: 20 jan. 2018.
- CARVALHO, P. S. R. **Estudo de propagação de ondas de cheia no Ribeirão José Pereira, em Itajubá, utilizando HEC-RAS**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal de Itajubá, Programa de pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Itajubá, 2012.
- CASTIEL, L. D.; GUILIAM, M. C. R.; FERREIRA, M. S. Correndo o risco: uma introdução aos riscos em saúde. Rido de Janeiro: Fio Cruz, v. 1, 2010.
- CHAGAS, P. F. **Perspectivas da Aplicação da Teoria Fuzzy para Cálculo de Risco em Sistemas Hidrodinâmicos** 2005. 252 f. Tese (Thesis Ph. D.) — Universidade Federal do Ceará,

Programa de pós-graduação em Engenharia Civil Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2005.

CHAPRA, S. C. **Surface Water-Quality Modeling**. [S.l.]: New York: McGraw-Hill, 1997. v. 1. 844 p.

CHAUDHRY, F. H. **Recursos Hídricos – Aspectos Quantitativos**. [S.l.]: EESC – USP São Carlos, 2001.

CHEN, C. L.; CHOW, V. T. Formulation of mathematical watershed-flow model. **Journal of the Engineering Mechanics Division**, p. 809–828, 1971.

CHOW, V. T. **Applied Hydrology**. [S.l.]: New York: McGraw-Hill, 1988. v. 1. 572 p.

COKLJAT, D.; KRALJ, C. On choice of turbulence model for prediction of flows over river bed forms. **Journal of Hydraulics Research**, v. 35, n. 3, p. 355–361, 1997.

CUNGE, J. A.; HOLLY, F. M. J.; VERWEY, A. **Practical Aspects of Computational River Hydraulics**. [S.l.]: Pitman Publishing Ltd., London, UK., 1980. ISBN 0273084429.

ELMOUSTAFA, A. M.; MOHAMED, M. M. Flash flood risk assessment using morphological parameters in Sinai. **Open Journal of Modern Hydrology**, v. 3, n. 3, p. 122–129, 2013.

FENTON, J. D. Flood routing methods. **Journal of Hydrology**, v. 570, p. 251–264, 2019.

GANOULIS, J. **Risk Analysis of Water Pollution: Probabilities and Fuzzy Sets**. [S.l.]: VCH-Weinheim-Oxford-NY, 1994. v. 1. 306 p.

GOMES-PEREIRA, L. M.; WICHERSON, R. J. Suitability of laser data for deriving geographical data: a case study in the context of management of fluvial zones. **Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 105–114, 1999.

GOMES, V. U. **Estudo comparativo dos modelos da onda cinemática e da onda difusiva na análise de propagação de cheias, em função dos parâmetros hidráulicos da bacia**. 2006. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Ceará, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2006.

HICKS, F. E. **Finite element modeling of open channel flow**. [S.l.]: University of Alberta, 1990.

HORRITT, M. S. Calibration and validation of a 2-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. **Water Resources Research**, v. 36, n. 11, p. 3279–3291, 2000.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. **Hydrological Processes**, John Wiley & Sons Ltd, v. 15, p. 825–842, 2001.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1-d and 2-d numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, v. 268, p. 87–99, 2002.

HSIEH, P.-C.; WANG, D.-Y.; WU, M.-C. Analytical solution to a diffusion wave equation with variable coefficients for overland flow. **Journal of Hydrology**, v. 557, 2019.

HUNTER, N. M.; BATES, P. D.; NEELZ, S.; PENDER, G.; VILLANUEVA, I.; WRIGHT, N. G.; LIANG, D.; FALCONER, R. A.; LIN, B.; WALLER, S.; CROSSLEY, A. J.; MASON, D. Benchmarking 2d hydraulic models for urban flooding. **Water Management**, v. 161, p. 13–30, 2008.

JIANG, Z.; WU, W.; QIN, H.; ZHOU, J. Credibility theory based panoramic fuzzy risk analysis of hydropower station operation near the boundary. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 474–488, 2018.

KESKIN, M. E. **Investigation of flood routing by a dynamic model with dependent variable parameters**. 1994. 144 f. Dissertação (Civil Engineering Master) — Civil Engineering Department Technical, University of Istanbul, Istanbul, 1994.

KESKIN, M. E.; AĞIRALIOĞLU, N. A simplified dynamic model for flood routing in rectangular channels. **Journal of Hydrology**, v. 202, n. 1–4, p. 302–314, 1997.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications**. [S.l.]: Prentice Hall, 1995. 591 p.

KONSTANTINOS, K.; THOMAS, T.; MICHA, H.; JOHANNES, H.; SVEN, F. Integrated flash flood vulnerability assessment: insights from east attica, greece. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 553–562, 2016.

LI, Q.; ZHOU, J. Z.; LIU, D. H.; W., J. X. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion. **Safety Science**, v. 50, n. 5, p. 1275—1283, 2012.

LIN, B.; SHIONO, K. Numerical modelling of solute transport in compound channel flows. **Journal Hydraulic Research**, v. 33, n. 6, p. 773—787, 1995.

LIU, S.-h.; ZHAO, Q.-y.; LUO, Q.-s. On the total flow control equations and characteristics of unsteady gradually varied flow in open channels. **Journal of Hydrodynamics**, v. 31, n. 1, p. 177–185, 2018.

MENDES, B. V. M. **Modelagem do risco financeiro**. [S.l.]: Instituto COPPEAD de Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) Relatórios, 2016.

MOUSSA, R.; BOCQUILLON, C. Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. **Journal of Hydrology**, v. 186, n. 1–4, p. 1–30, 1996.

MOUSSA, R.; MAJDALANIB, S. Evaluating lateral flow in an experimental channel using the diffusive wave inverse problem. **Advances in Water Resources**, v. 127, p. 120–133, 2019.

OSTAD-ALI-ASKARI, K.; SHAYANNEJAD, M.; ESLAMIAN, S.; NAVABPOUR, B. Comparison of solutions of saint-venant equations by characteristics and finite difference methods for unsteady flow analysis in open channel. **Int. J. Hydrology Science and Technology**, v. 8, n. 3, p. 229–243, 2018.

PONCE, V. M. Generalized diffusive wave equation with inertial effects. **Water Resources Research**, v. 26, p. 1099–1101, 1990.

RADMEHR, A.; ARAGHINEJAD, S. Flood vulnerability analysis by fuzzy spatial multi criteria decision making. **Water Resources Management**, v. 29, n. 12, p. 4427—4445, 2016.

RAHIMPOUR, M.; TAVAKOLI, A. Multigrid beam and warming scheme for the simulation of unsteady flow in an open channel. **Water SA**, v. 37, p. 229–235, 2011.

RIBEIRO, R. S. **Intercomparação entre modelos hidrodinâmicos e hidráulicos no estudo de rio estuarino**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

RITCHIE, J. C. Airborne laser altimeter measurements of landscape topography. **Remote Sensing of the Environment**, v. 53, p. 91–96, 1995.

RITCHIE, J. C.; MENENTI, M.; WELTZ, M. A. Airborne laser altimeter measurements of landscape topography. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 18, p. 3705–3724, 1996.

ROSS, T.; BOOKER, J.; PARKINSON, W. J. **Fuzzy Logic and Probability Applications: Bridging the Gap**. [S.l.]: SA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. 429 p.

ROSS, T. J. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**. [S.l.]: McGraw-Hill, New York, 1995. 607 p.

RUTSCHMANN, P.; HAGER, W. Diffusion of floodwaves. **Journal of Hydrology**, v. 178, p. 19–32, 1996.

SCHROEDER, A. J.; GOURLEY, J. J.; HARDY, J.; HENDERSON, J. J.; PARHI, P.; RAHMANI, V.; REED, K. A.; SCHUMACHER, R. S.; SMITH, B. K.; TARALDSEN, M. J. The development of a flash flood severity index. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 523–532, 2016.

SHRESTHA, B. P.; REDDY, R. K.; DUCKSTEIN, L. Fuzzy reliability in hydraulics. *In: FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UNCERTAINTY MODELING AND ANALYSIS. Proceedings*. University of Maryland, USA, 1990.

SMITH, A. A. A generalized approach to kinematics flood routing. **Journal of Hydrology**, v. 45, p. 71–896, 1980.

SOFIALIDIS, D.; PRINOS, P. Numerical study of momentum exchange in compound open channel flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 2, p. 152—165, 1999.

SOUSA, L. B.; ZANELLA, M. E. **Percepção de riscos ambientais: teoria e aplicações**. Ufc. [S.l.]: Fortaleza: edições UFC, 2009. 2009 p.

SOUZA, A. R.; CASTRO, M. P. S.; VIDAL, T. F.; SOUZA, R. O. Influência da declividade e do número de manning no comportamento da propagação da onda difusiva. *In: XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE*, 2014, natal. **Anais**. Natal, RN, 2014.

STEPIEN, I. On the numerical solution of the saint–venant equations. **Journal of Hydrology**, v. 67, p. 1–11, 1984.

STRELKOFF, T. One dimensional equations of open–channel flow. **Journal of Hydrology**, v. 67, p. 861—876, 1969.

STURM, T. W. **Open Channel Hydraulics**. 2. ed. [S.l.]: McGraw Hill, 2001. ISBN 978-0-07-339787-0.

SZYMKIEWICZ, R. Finite element method for the solution of the saint-venant equation in the open channel network. **Journal of Hydrology**, v. 122, p. 275–287, 1991.

TANSCHKEIT, R.; SHARF, E. M. Controle de um braço mecânico através de um controlador nebuloso self-organising. *In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA*, 8., PA. **Anais**. Belém, PA, 1990.

THOMAS, T. G.; WILLIAMS, J. J. R. Large eddy simulation of turbulent flow in an asymmetric compound channel. **Journal Hydraulic Research**, v. 33, n. 1, p. 27—41, 1994.

TRAPP, A. C. G.; CORRAR, L. J. Avaliação e gerenciamento do risco operacional no brasil: análise de caso d euma instituição financeira de grande porte. **Revista Contabilidade e Finanças**, v. 16, n. 37, 2005.

VIEIRA, R. C.; LIBOS, M.; HORA, M. A. M. da. **Estudos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Cuiabá, Relatório de Pesquisa**. [S.l.]: COPPE – UFRJ, 2004.

VIEIRA, V. P. P. b. **Análise de Risco em Recursos Hídricos**. [S.l.]: ABRH, 2005.

WILSON, M. D. **Evaluating the effect of data and data uncertainty on predictions of flood inundation** 2004. 252 f. Tese (Thesis Ph. D.) — Faculty of Engineering, Science and mathematics, University of Southampton, UK, 2004.

XIAO, Y. F.; YI, S. Z.; TANG, Z. Q. A spatially explicit multi-criteria analysis method on solving spatial heterogeneity problems for flood hazard assessment. **Water Resources Management**, v. 32, n. 10, p. 3317—3335, 2018.

YE, J.; MCCORQUODALE, J. A. Simulation of curved open channel flow by 3d hydrodynamic model. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 124, n. 7, p. 687–698, 1998.

YEN, B. C. Open-channel flow equations revisited. **Water Resources**, n. 51, p. 979—1009, 1973.

YEVJEVICH, V. Introduction unsteady flow in open channels. **Water Resources Publications**, v. 1, p. 1–24, 1975.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Journal Fuzzy Sets System**, v. 8, p. 338–353, 1965.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. **Information Sciences**, v. 8, p. 43–80, 1975.

ZIMMERMANN, H. J. **Fuzzy Sets Theory and its Application**. [S.l.]: Martinus Nijhoff, Dordrecht, 1985. 363 p.

ZOU, Q.; ZHOU, J. Z.; ZHOU, C.; GUO, J.; DENQ, W. P.; YANQ, M. Q.; LIAO, L. Fuzzy risk analysis of flood disasters based on diffused-interior-outer-set model. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 39, n. 6, p. 6213–6220, 2012.