

UNIVERSIDADE FEDERAL DO GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
EM ENGENHARIA DE MEIO AMBIENTE - PPGEMA

RÁVILA MARQUES DE SOUZA

**MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO UNIDIMENSIONAL PARA BACIAS
HIDROGRÁFICAS PERI-URBANAS**

Rávila Marques de Souza
Orientador: Prof. Dr. Klebber T. M. Formiga

Goiânia

2014

RÁVILA MARQUES DE SOUZA

**MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO UNIDIMENSIONAL PARA BACIAS
HIDROGRÁFICAS PERI-URBANAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Klebber T. M. Formiga

Goiânia

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)

S731m Souza, Rávila Marques.
Modelo hidrológico unidimensional para bacias hidrográficas peri-urbanas [manuscrito] / Rávila Marques de Souza. - 2014.
xv, 84 f. : il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Klebber T. M. Formiga.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2014.

Bibliografia.

Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.

Apêndices.

1. Bacias hidrográficas – Modelos hidrológicos distribuídos 2. Bacia hidrográfica – Drenagem 3. Bacias hidrográficas peri-urbanas I. Título.

CDU: 556.51

RÁVILA MARQUES DE SOUZA

**MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUÍDO UNIDIMENSIONAL PARA
BACIAS HIDROGRÁFICAS PERI-URBANAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

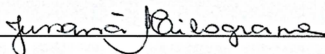
Dissertação defendida e aprovada em 30 de abril de 2014, pela banca examinadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Alexandre Kepler Soares
Presidente da Banca - UFG



Prof. Dr. Joel Vasco
Examinador interno - UFG



Prof. Dra. Jussanã Milograna
Examinador externo - IFG

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade que nos foi dada em compartilhar experiências, por me proporcionar saúde, sabedoria e perseverança para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga, pelo apoio, paciência, incentivo e presteza no auxílio às leituras sobre o andamento e normatização desta Dissertação de Mestrado.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente pela constante dedicação e disposição.

Aos colegas do programa de mestrado que sempre me acompanharam nessa importante jornada, auxiliando, apoiando e sempre acreditando no potencial do trabalho.

À cidade de Goiânia, pela bela acolhida.

Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo incondicionais dedicados durante todo o meu percurso acadêmico, principalmente nos momentos de maior dificuldade.

E por último, e não menos importante, ao Povo Brasileiro, cujo apoio técnico e financeiro, por meio de diversas instituições, foi indispensável na minha pesquisa e formação, especialmente aqui, personificado na Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás e no CNPq.

“Se você encontrar um caminho sem obstáculos, ele provavelmente não leva a lugar nenhum.”

Frank Clark

RESUMO

SOUZA, R. M. **Modelo Hidrológico Distribuído Unidimensional para Bacias Hidrográficas Peri-Urbanas**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

O presente trabalho propôs desenvolver e calibrar um modelo hidrológico distribuído unidimensional aplicado a drenagem de uma bacia hidrográfica peri-urbana utilizando o método de otimização multi-objetivo *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II) para a calibração do modelo. Para tornar possível a realização deste trabalho foram adotadas rotinas computacionais desenvolvidas em ambiente MATLAB. O modelo desenvolvido permite, para um evento de precipitação, determinar o hidrograma de escoamento superficial em qualquer posição da bacia hidrográfica (planos ou canais) considerando o efeito da infiltração e das características físicas do solo. Foram definidas funções objetivo e aplicadas simultaneamente na calibração do modelo. Da análise de sensibilidade realizada, verificou-se que o modelo é mais impactado pelos parâmetros relativos às áreas permeáveis. O ajuste do modelo foi muito bom, ilustrando a aplicabilidade da calibração multi-objetivo em explorar a região ideal e obter soluções ideais. A validação comprovou a eficiência do modelo, aplicada a outros eventos chuvosos diferentes ocorridos na bacia do córrego Samamabaia, gerando saídas com acurácia satisfatória e resultados para os coeficientes de eficiência Nash & Sutcliffe próximos à região do valor ótimo teórico.

Palavras-chave: modelos hidrológicos distribuídos, calibração multi-objetivo, bacia hidrográfica peri-urbana.

ABSTRACT

SOUZA, R. M. **Distributed Hydrological Model for One-Dimensional Peri-Urban Watersheds**. 2014. Dissertation (Masters in Environmental Engineering) - School of Civil Engineering, Post-Graduation *Stricto Sensu* Program in Environmental Engineering, Federal University of Goiás , Goiânia , 2014.

This study aimed to develop and calibrate a distributed hydrological model used for a one-dimensional drainage of a peri-urban catchment using the optimization multi-objective method *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA - II) for model calibration. Computational algorithms developed in MATLAB environment were adopted to make this study possible. This model allows a precipitation event to set the surface runoff hydrograph at any position of the watershed (planes or channels) regarding infiltration effect and soil physical characteristics. Objective functions were defined and used simultaneously to calibrate the model. From sensitivity analysis performed, it was found that the model is more affected by the parameters related to permeable areas. The model fit was very good, illustrating the applicability of multi-objective calibration in exploring ideal area and to obtain ideal solutions. Validation proved the efficiency of the model used for other different rainfall events in Samambaia stream basin, generating outputs with good accuracy and optimal theoretical value results for Nash & Sutcliffe coefficients of efficiency near the area region.

Keywords: distributed hydrological models, multi-objective calibration, peri-urban watershed.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	Modelagem Matemática de Cheias.....	5
3.1.1	Equação da continuidade	7
3.1.2	Equação da conservação de movimento	10
3.2	Discretização Espacial e Propriedades do Terreno.....	13
3.2.1	Discretização espacial.....	13
3.2.2	Propriedades do terreno	17
3.3	Modelos Distribuídos de Bacias Hidrográficas	19
3.3.1	SHE - Système Hydrologique Européen	19
3.3.2	TOPMODEL - Topography Based Hydrological Model	21
3.3.3	MGB-IPH - Modelo Hidrológico para Grandes Bacias	23
3.3.4	WEHY - Watershed Environmental Hydrology.....	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	Desenvolvimento do Modelo.....	27
4.1.1	Cálculo da Infiltração	28
4.1.1.1	Equação de Horton modificada por Bauer	28
4.1.2	Propagação do escoamento superficial.....	30
4.1.2.1	Equações governantes do modelo	31
4.1.2.1.1	Escoamento no plano	31
4.1.2.1.1.1	Processo de solução do modelo onda cinemática para o escoamento no plano.....	32
4.1.2.1.2	Escoamento no Canal.....	34
4.1.2.1.2.1	Processo de solução do modelo onda cinemática para o escoamento no canal	36
4.2	Avaliação do modelo	38
4.2.1	Área de Estudo.....	38
4.2.1.1	Aspectos gerais da bacia hidrográfica do córrego Samambaia	39
4.2.1.1.1	Pedologia.....	40
4.2.1.1.2	Geologia.....	41
4.2.1.1.3	Geomorfologia	42
4.2.2	Discretização espacial da área de estudo	43

4.2.3	Caracterização física e uso e ocupação do solo	46
4.2.3.1	Caracterização física	46
4.2.3.2	Uso e ocupação do solo	47
4.2.4	Medição da precipitação e da vazão	49
4.2.5	Calibração do modelo	57
4.2.5.1	NSGA-II (<i>Elitist Non-dominated Sorting Genetic</i>).....	57
4.2.5.2	Dados utilizados na calibração	60
4.2.5.3	Funções objetivo	61
4.2.5.4	Variáveis de decisão	62
4.2.6	Validação do modelo	63
4.2.7	Análise de sensibilidade	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	Calibração do modelo	64
5.2	Validação do modelo	72
5.3	Análise de Sensibilidade do modelo.....	78
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Representação de uma cheia vista por um modelo 1D.....	6
Figura 3.2 – Corte longitudinal do canal.....	8
Figura 3.3 - Volume de controle (Planta).....	8
Figura 3.4 - Visualização de ondas dinâmicas e cinemáticas.....	13
Figura 3.5 - (A) Codificação da rede: nós (N_i); drenagem (R_i em negrito) e sub-bacias (margem direita RB_i ; margem esquerda LB_i ; bacias de montante So_i). (B) Estrutura topológica (I: vazão de entrada; L_r : fluxo lateral das sub-bacias da margem direita; L_l : fluxo lateral das sub-bacias da margem esquerda, O: saída).....	15
Figura 3.6 - Discretização de bacias em zonas e planos.....	16
Figura 3.7 - (A) Representação esquemática dos elementos planos e canais utilizados por Silva (2007). (B) Representação esquemática da discretização da bacia utilizada por.....	17
Figura 3.8 - Modelos de dados vetoriais e raster.....	18
Figura 3.9 - MDE representado com: (A) <i>grid</i> e (B) TIN.....	19
Figura 3.10 - Representação esquemática da estrutura do modelo SHE.....	21
Figura 3.11 - Índice topográfico.....	22
Figura 3.12 - Ilustração do método TOPMODEL para a propagação do escoamento.....	23
Figura 3.13 - Descrição esquemática do modelo WEHY.....	26
Figura 4.1 – Fluxograma do modelo UFGModel 1D.....	27
Figura 4.2 – Infiltração potencial e real para uma determinada quantidade de água inicial no solo.	29
Figura 4.3 – Grade computacional para esquemas explícitos.	33
Figura 4.4 – Seção retangular.....	35
Figura 4.5 – Mapa de localização da área de estudo.....	38
Figura 4.6 – Localização da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.....	39
Figura 4.7 – Agrupamentos dos tipos de solos na bacia hidrográfica do córrego Samambaia.	40
Figura 4.8 – Agrupamentos de unidades geológicas na bacia hidrográfica do córrego Samambaia.	42
Figura 4.9 - Agrupamentos de unidades geomorfológicas na bacia hidrográfica do córrego Samambaia.	43
Figura 4.10 - Discretização utilizada na modelagem.	44

Figura 4.11 - Representação esquemática da discretização da área de estudo.....	45
Figura 4.12 - Representação do modelo digital de elevação do terreno para a bacia em estudo.	45
Figura 4.13 – Mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo.	49
Figura 4.14 - Pluviógrafo utilizado para monitoramento da precipitação: (A) <i>HOBO Data Logging Rain Gauge</i> ; (B) Interior do pluviógrafo <i>HOBO Data Logging Rain Gauge</i>	50
Figura 4.15 - Representação esquemática da superposição de superfícies cônicas para formação da superfície de precipitação..	52
Figura 4.16 - Monitoramento da vazão: (A) <i>HOBO U20 Titanium Water Level Data Logger - U20 001-01-TI</i> ; (B) medida do linígrafo.	53
Figura 4.17 - Rede de monitoramento da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.	54
Figura 4.18 – Evento 8 ocorrido no dia 23/03/2013.....	55
Figura 4.19 - Evento 9 ocorrido no dia 25/03/2013.	55
Figura 4.20 - Evento10 ocorrido no dia 26/03/2013.	56
Figura 4.21 – Evento 16 ocorrido no dia 10/04/2013.....	56
Figura 4.22 - Evento 17 ocorrido no dia 11/04/2013.	57
Figura 4.23 - Ordenação do método NSGA-II.	58
Figura 4.24 - Esquema da definição de distância de multidão.....	59
Figura 4.25 - Esquema do método NSGA-II.....	60
Figura 5.1 - Relação entre as funções objetivo FO1 e FO2 para o conjunto de soluções não dominadas.....	64
Figura 5.2 - Relação entre as funções objetivo FO1 e FO3 para o conjunto de soluções não dominadas.....	65
Figura 5.3 - Relação entre as funções objetivo FO2 e FO3 para o conjunto de soluções não dominadas.....	65
Figura 5.4 - Histograma de frequência da função objetivo FO1 para o conjunto de soluções de Pareto.	66
Figura 5.5 - Histograma de frequência da função objetivo FO2 para o conjunto de soluções de Pareto.	66
Figura 5.6 - Histograma de frequência da função objetivo FO3 para o conjunto de soluções de Pareto.	67
Figura 5.7 - Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro NI.	69
Figura 5.8 - Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro NP..	69

Figura 5.9 – Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro fo.	70
Figura 5.10 – Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro fc.....	70
Figura 5.11 - Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro k.	71
Figura 5.12 - Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro NC.....	71
Figura 5.13 – Evento 8 ocorrido no dia 23/03/2013.....	73
Figura 5.14 - Evento 9 ocorrido no dia 25/03/2013.	73
Figura 5.15 - Evento10 ocorrido no dia 26/03/2013.	74
Figura 5.16 - Evento 16 ocorrido no dia 10/04/2013.	74
Figura 5.17 - Evento 17 ocorrido no dia 11/04/2013.	75
Figura 5.18 - Eficiência Nash & Sutcliffe – Evento 8 ocorrido no dia 23/03/2013.....	76
Figura 5.19 - Eficiência Nash-Sutcliffe – Evento 9 ocorrido no dia 25/03/2013.....	77
Figura 5.20 - Eficiência Nash-Sutcliffe – Evento10 ocorrido no dia 26/03/2013.....	77
Figura 5.21 - Eficiência Nash-Sutcliffe – Evento 16 ocorrido no dia 10/04/2013.....	77
Figura 5.22 - Eficiência Nash-Sutcliffe – Evento 17 ocorrido no dia 11/04/2013.....	78
Figura 5.23 – Análise de sensibilidade – FO1.....	78
Figura 5.24 - Análise de sensibilidade – FO2.	79
Figura 5.25 - Análise de sensibilidade – FO3.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Distribuição dos tipos de solos na área da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.	41
Tabela 4.2 – Parâmetros físicos dos sub-planos e canais extraídos do MDE.....	46
Tabela 4.3 - Classes utilizadas para análise da cobertura superficial da área de estudo.	48
Tabela 4.4 - Ocupação do solo por quilômetro quadrado e porcentagem de área.....	48
Tabela 4.5 - Cobertura total de área impermeável e permeável e porcentagem de área.	49
Tabela 4.6 – Informações sobre os equipamentos que compõem a rede de monitoramento da bacia hidrográfica do córrego Samambaia	53
Tabela 4.7 – Avaliação do desempenho de modelos pelo coeficiente eNS.....	62
Tabela 4.8 – Variáveis de decisão e faixa de variação dos valores.	62
Tabela 5.1 – Comparação dos valores dos parâmetros calibrados com os encontrados na literatura.....	68
Tabela 5.2 – Matriz de correlação para o conjunto de parâmetros.....	68
Tabela 5.3 – Coeficientes de eficiência Nash & Sutcliffe médios após a validação.....	75
Tabela 5.4 - Variação em porcentagem das funções objetivo, quando alterado o valor dos parâmetros em -50% para análise de sensibilidade.	80
Tabela 5.5 - Variação em porcentagem das funções objetivo, quando alterado o valor dos parâmetros em +50% para análise de sensibilidade.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EIA:	Effective Impervious Area
eNS:	Coeficiente de Eficiência Nash-Sutcliffe
FO:	Função Objeto
MDE:	Modelo Digital de Elevação
MDT:	Modelo Digital do Terreno
MQ:	Método Multiquadric
Pluv:	Pluviógrafo
SHE:	Système Hydrologique Européen
SIG:	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM:	Shuttle Radar Topography Mission
TIA:	Total Impervious Área
<i>TIN</i> :	Triangular Irregular Network
UTM:	Universal Transverse Mercator
WEHY:	Watershed Environmental Hydrology

LISTA DE SÍMBOLOS

A [m^2]:	Área da seção transversal
Q [m^3/s]:	Vazão de entrada em uma seção
q [m^2/s]:	Vazão lateral ou vazão por unidade de largura na direção do escoamento
t [s]:	Tempo
x [m]:	Distância
h [m]	Profundidade da seção transversal
i :	Índice numérico
g [m/s^2]:	Aceleração da gravidade
k [h^{-1}]:	Taxa de decaimento - Horton
F_o [mm/h]:	Taxa de infiltração inicial - Horton
F_c [mm/h]:	Taxa de infiltração final – Horton
NC:	Coefficiente de rugosidade de Manning para o canal
NI:	Coefficiente de rugosidade de Manning para área impermeável
NP:	Coefficiente de rugosidade de Manning para área permeável
Δt [s]:	Discretização temporal
Δx [m]:	Discretização espacial
S_o [m/m]	Declividade da linha de fundo
S_f [m/m]	Declividade da linha de atrito

1 INTRODUÇÃO

Essencial à vida, a água constitui elemento necessário para a maioria das atividades humanas, sendo, ainda, componente fundamental da paisagem e do ambiente natural e construído. Trata-se de um bem precioso, de valor inestimável, que deve ser, a qualquer custo, conservado e protegido. Dessa forma é impossível imaginar a evolução das primeiras civilizações afastadas das vizinhanças dos importantes corpos hídricos, visto que essa proximidade foi imprescindível (VIDAL, 2012).

Com o aumento populacional ocorrido nas últimas décadas, verificado em praticamente todo o planeta, vários conflitos envolvendo os recursos hídricos têm ocorrido nas grandes regiões metropolitanas, dos quais se destaca: as enchentes urbanas geradas pela ocupação desordenada do espaço urbano, pela falta ou planejamento inadequado da drenagem urbana (SILVA, 2005). O elevado crescimento populacional tem forçado a ocupação de zonas rurais e agrícolas que se encontram nas imediações dos grandes centros urbanos. Esse processo é conhecido como peri-urbanização, que tem se desenvolvido em grandes metrópoles, e pelo caráter emergencial ou especulativo geralmente tem ocorrido de maneira não planejada, o que possivelmente levará a conflitos futuros relacionados aos recursos hídricos.

Segundo Torres (2013), as áreas peri-urbanas, na maioria das vezes, são caracterizadas, em termos de uso da terra, em uma variação de infraestrutura urbana para uso estritamente rural e agrícola. Por outro lado, os assentamentos ilegais nessas áreas são um caso muito comum e sofrem com a falta de infraestrutura básica e serviços públicos. Essas dinâmicas afetam diretamente os processos hidrológicos de toda a área, alterando a permeabilidade do solo, os coeficientes de escoamento e a distribuição dos fluxos de pico nos córregos naturais.

Collischonn (2001) afirma que o conhecimento dos processos hidrológicos ainda é limitado, em grande parte, pela variabilidade destes processos e pela escassez de dados. Em alguns problemas específicos da hidrologia, o processo físico é razoavelmente bem conhecido, e a descrição matemática relativamente simples. Nesse contexto, a modelação matemática provê uma ferramenta através da qual pode ser estudado e compreendido, de modo adequado, o comportamento do escoamento em uma bacia hidrográfica (MIGUEZ, 1994).

Conforme Ingol-blanco e Mckinney (2013), uma representação adequada dos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica é fundamental para prever as mudanças na

resposta de um sistema hidrológico formado por um conjunto de componentes inter-relacionados incluindo precipitação, evapotranspiração, infiltração, escoamento subterrâneo e escoamento superficial.

Inúmeros métodos têm sido empregados para representar matematicamente o escoamento sem bacias, de forma geral, dividem-se em dois grandes grupos, com abordagens que se complementam na avaliação do comportamento hidráulico-hidrológico de uma bacia hidrográfica. O primeiro grupo abrange os modelos hidrológicos, que enfocam a representação das parcelas do ciclo hidrológico na escala da bacia, permitindo a correspondente simulação ou geração de vazões. De acordo com Magalhães (2005), um dos tipos mais comuns de modelos hidrológicos são os modelos chuva-vazão, que tratam da conversão da chuva em escoamento fluvial e são utilizados na simulação e previsão de séries temporais de vazão a partir de séries de precipitação. Quando a bacia é tomada em termos médios, esses modelos são ditos concentrados. Quando a diversidade espacial é considerada, estes modelos são chamados distribuídos (MIGUEZ, 1994; LOU, 2010).

No que diz respeito aos modelos hidrológicos distribuídos, de base física, tanto as variáveis como os parâmetros dependem do espaço e do tempo. São modelos que subdividem o sistema em elementos (uni, bi ou tridimensionais) que são considerados homogêneos quanto às propriedades avaliadas, representando a variabilidade temporal e espacial (MENDES, 1996). Segundo Cunge et al. (1980), a abordagem mais simples é a simulação da bacia como sistema unidimensional (1D). Na maioria das situações, modelos puramente unidimensionais são usados por vários motivos, dentre os quais o fato de grande parte dos rios seguirem uma direção principal e por terem sido os modelos bidimensionais (2D), historicamente, complexos e de difícil construção.

O uso do modelo busca simplificar a complexidade do mundo real, privilegiando os aspectos fundamentais de um sistema. Anderson e Burt (1985) afirmam que, para apresentar uma visão aproximada da realidade, um modelo deve ser simples o bastante para compreensão e uso, e complexo o suficiente para representar o sistema em estudo.

Diante do exposto, fica evidente que a modelagem destaca-se como uma ferramenta imprescindível no que tange às questões hídricas como um todo, principalmente no que diz respeito à simulação ou previsão de vazões em uma bacia hidrográfica. Estimativas confiáveis de vazões são frequentemente necessárias tanto em bacia hidrográficas com ocupação rural e/ou agrícola quanto urbana, e são essenciais em estudos sobre o comportamento do escoamento em uma bacia e para os projetos de obras de engenharia relacionados, por

exemplo, à drenagem urbana, além de proporcionar condições para elaboração de vários estudos sobre os processos naturais e antrópicos numa região.

Tendo em vista a importância do desenvolvimento de uma metodologia que permita estimativas confiáveis de vazão, levando em consideração a variabilidade temporal e espacial das condições de uma bacia hidrográfica, buscou-se desenvolver um modelo hidrológico distribuído e unidimensional, para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial em qualquer local de uma bacia hidrográfica peri-urbana, considerando escoamento em planos e canais.

A estrutura do presente trabalho está dividida em sete partes: introdução, objetivos, revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussão, conclusões e recomendações e referências bibliográficas. A introdução visa expor à problemática, destacando a justificativa do presente trabalho. Em seguida, os objetivos alcançados pela pesquisa são enumerados. Na revisão bibliográfica, são discutidos os assuntos como modelagem matemática de cheias e seu equacionamento. Também são discutidos os métodos de discretização espacial de uma bacia hidrográfica, as ferramentas utilizadas para extração automática de variáveis topográficas e são discutos os principais modelos hidrológicos distribuídos. Os materiais e métodos descrevem como foi feita a aquisição de dados, apresenta a área de estudo e como foi desenvolvido o modelo. Os resultados são apresentados conforme obtidos em cada etapa do trabalho. Nas conclusões e recomendações são reunidas as conclusões finais do trabalho, e elencadas as possibilidades para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é a construção e calibração multi-objetivo de um modelo hidrológico distribuído unidimensional, baseado na teoria da onda cinemática, para avaliar a reprodução do processo de transformação precipitação-vazão em uma bacia hidrográfica peri-urbana. Por sua vez, são objetivos específicos deste estudo:

- Desenvolver um modelo espacialmente distribuído em ambiente de programação MATLAB, denominado UFGModel 1D;
- Aplicar o modelo em uma bacia hidrográfica, localizada na cidade de Goiânia, e analisar os resultados obtidos;
- Calibrar e validar o modelo hidrológico distribuído.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Modelagem Matemática de Cheias

Modelos matemáticos podem ser descritos como a composição de uma gama de equações matemáticas e argumentos lógicos que foram desenvolvidos com o objetivo de simular fenômenos naturais (VIDAL, 2012).

Conforme Cunge et al. (1980), os modelos matemáticos podem ser usados em duas classes gerais de aplicação na prática da Engenharia:

1. Aquela em que a cheia não é modificada por estudos ou projetos de Engenharia. Nesta classe de aplicação, encontram-se problemas baseados na previsão de cheias nas condições presentes e estimativa dos danos provocados pelas mesmas;
2. Aquela em que a influência de estudos ou projetos de Engenharia sobre a cheia possui interesse. Exemplos são estudos de barragens para a formação de reservatórios, de diques para proteção contra enchentes, de dragagens para aprofundamento do leito do rio, dentre outros.

De acordo com Miguez (1994), em geral, equações simplificadas podem ser usadas na classe (1), quando razoável sob o ponto de vista do tipo de rio e de escoamento; as equações completas são aconselháveis para a classe (2).

O desenvolvimento de um modelo, segundo Beven (2001), segue as etapas de: (a) decisão dos principais processos envolvidos; (b) decisão relativa à representação ou equacionamento dos processos; (c) desenvolvimento do código do modelo; (d) calibração do modelo; (e) validação do modelo.

A correta representação ou equacionamento da realidade física pelo modelo é função de dois níveis do processo de construção do mesmo, chamados discretização topológica e discretização hidráulica. A discretização topológica refere-se ao processo de selecionar a forma de representar a natureza do escoamento. Enquanto que a discretização hidráulica refere-se a detalhadas descrições hidráulicas e topográficas dos elementos do modelo. A discretização topológica inicia-se com a definição do tipo de modelação do escoamento, podendo ser uni ou bidimensional (MIGUEZ, 1994).

Define-se como modelos unidimensionais (1D), os modelos com escoamento confinado em uma calha, com uma direção preferencial, modelados com as equações de

Saint-Venant. Modelos com escoamento em mais de uma direção, que podem ser modelos Quasi-2D ou modelos 2D, não tem uma direção preferencial de escoamento (CUNGE et al., 1980).

Segundo Barnard et al. (2007), os modelos unidimensionais 1D são utilizados para simular o fluxo nas calhas dos rios e redes coletora de água, mas são insuficientes para simular fenômenos como inundações de ruas e o extravasamento que passa a ocupar as planícies de inundação durante eventos extremos. Weme (2005), destaca que a principal desvantagem dos modelos 1D é a quantidade limitada de processos físicos que podem ser representadas, sendo geralmente mais adequados para áreas com pouca variação na elevação do terreno, para que o cálculo simples ofereça bons resultados.

A Figura 3.1 representa uma cheia vista por um modelo de escoamento unidimensional. Como pode ser observado na representação, no modelo 1D a água é obrigada a escoar dentro da calha do rio, mesmo quando atinge um nível tal que ocorreria extravasamento para fora da calha modelada. De acordo Tucci (2005), a velocidade média é representativa da variabilidade da velocidade na seção e o processo é considerado preponderantemente longitudinal, na direção do rio ou de uma declividade principal, desprezando as variações de velocidade nas direções transversal e vertical.

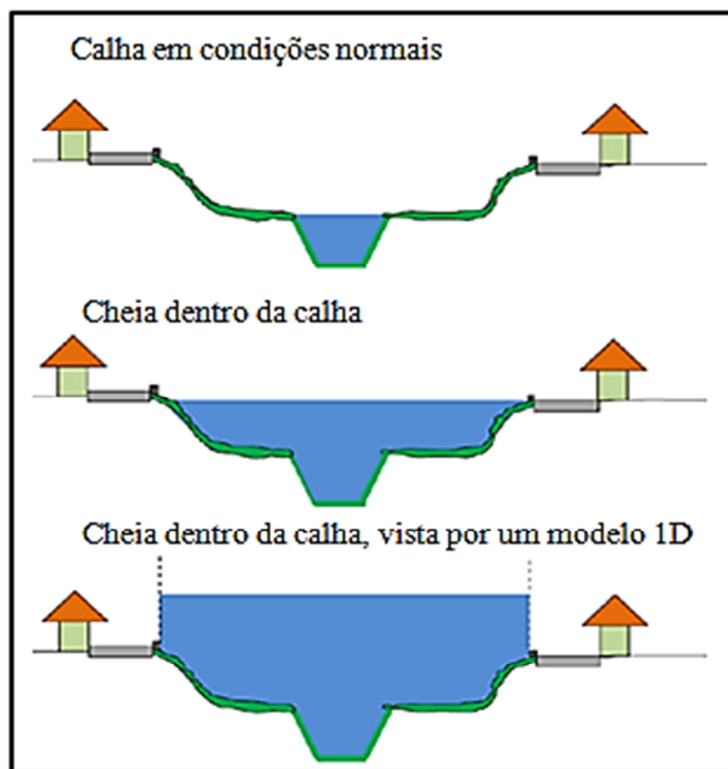


Figura 3.1- Representação de uma cheia vista por um modelo 1D.
Fonte: Adaptado de SOUZA, 2010.

Normalmente estes modelos utilizam as equações de Saint-Venant em sua forma simplificada ou completa. A dedução das equações de Saint-Venant baseia-se nos seguintes hipóteses (ALDRIGHETTI, 2007; LANÇA; RODRIGUES, 2000):

- O fluxo é unidimensional, ou seja, a velocidade é uniforme ao longo da seção transversal e o nível da água através da seção é representado por uma linha horizontal;
- O escoamento varia gradualmente ao longo do canal, a curvatura da linha de correte é pequena e as acelerações verticais são desprezíveis, de modo que a distribuição de pressão pode ser considerada segundo o princípio da hidrostática;
- Os efeitos de atrito com a margem e o fundo do canal podem ser explicados por meio das leis da resistência;
- Os coeficientes de rugosidade para o regime permanente e uniforme são aplicáveis, sendo válidas as equações de Manning ou Chézy para quantificá-los.

De acordo com Palacios-Vélez et al. (1998), o cálculo do escoamento superficial pode ser realizado utilizando uma solução simplificada das equações de Saint-Venant, como o modelo Onda Cinemática. Para Lou (2010) as equações completas descrevem um conjunto complexo de fenômenos que dificultam a análise intuitiva de seu comportamento global. Portanto, durante o processo de calibração do modelo, quando a intuição é um fator importante, equações simplificadas mais frequentemente direcionam uma linha de raciocínio.

O modelo, objeto da presente pesquisa, utilizará as equações de Saint-Venant para a propagação de vazão dentro da rede de drenagem. Essas equações são resultados da aplicação das equações da continuidade e conservação de movimento.

3.1.1 Equação da continuidade

Uma das equações fundamentais no escoamento em canais é a equação da continuidade. Essa equação é deduzida através do estudo da massa líquida e sua conservação ao longo de um volume de controle.

Considerando uma determinada seção e volume de controle, com um comprimento fixo (dx), conforme esquematizado na Figura 3.2 e Figura 3.3 (LANÇA, 2000).

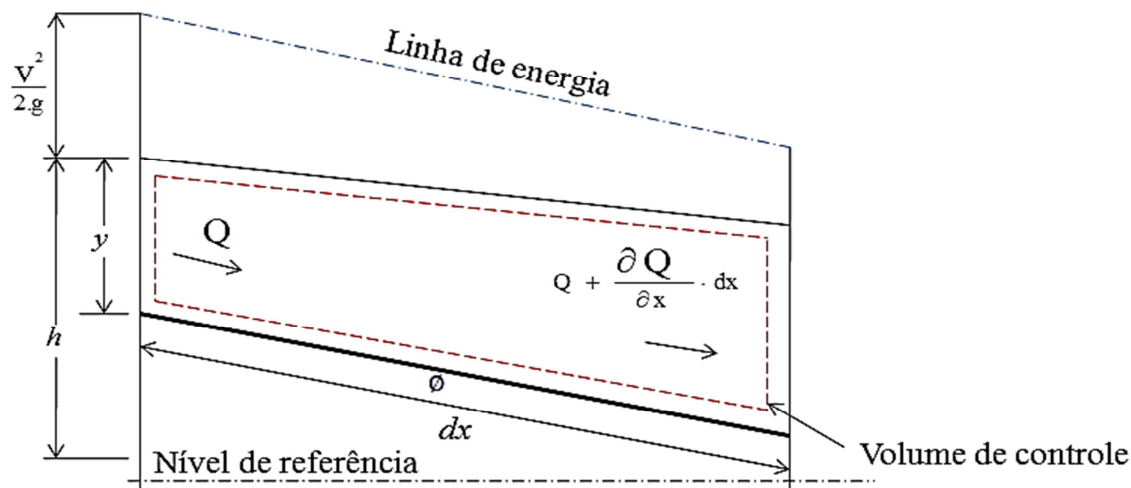


Figura 3.2 – Corte longitudinal do canal. Fonte: Adaptado de LANÇA, 2000.

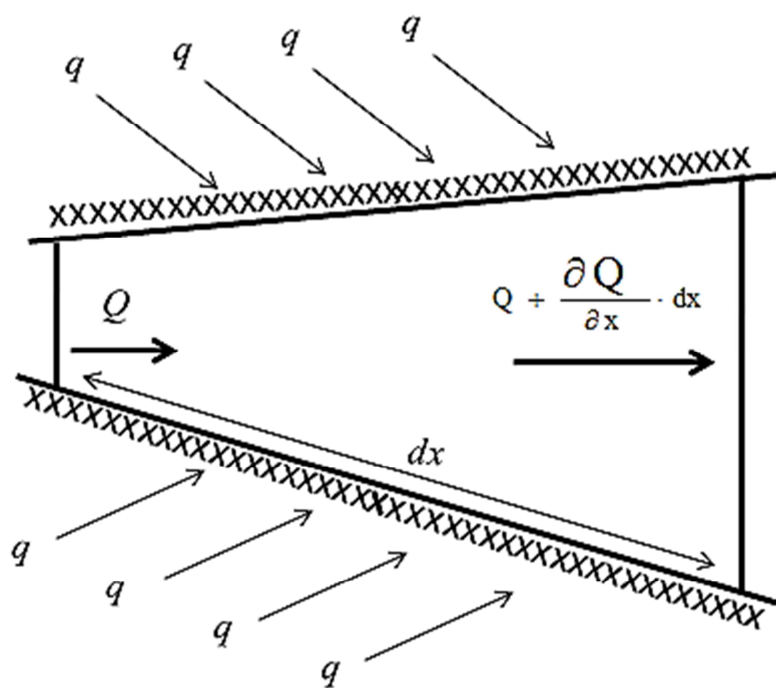


Figura 3.3 - Volume de controle (Planta). Fonte: Adaptado de LANÇA, 2000.

O volume de controle é a soma da vazão (Q) que entra pela seção de montante com a vazão (q) que entra lateralmente. A vazão lateral (q) é dada em $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, assim a vazão total de percurso é dada por $(q \cdot dx)$.

A entrada de massa para o volume de controle é dada por:

$$\iint_{\text{Entrada}} \rho V dA = -\rho(Q + q dx) \quad (3.1)$$

O sinal negativo significa que as vazões de entrada são consideradas negativas no teorema de transporte de Reynolds e (ρ) é a massa específica. A massa que sai do volume controle é dada por:

$$\iint_{\text{Saída}} \rho V dA = \rho \left(Q + \frac{\partial Q}{\partial x} dx \right) \quad (3.2)$$

onde, $\left(\frac{\partial Q}{\partial x}\right)$ representa a taxa de variação da vazão ao longo da distância. Assim a variação da massa armazenada no volume de controle, considerando a Equação 3.3, é dada por:

$$Q = A \cdot dx \quad (3.3)$$

$$\frac{d}{dt} \iiint \rho V dA = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} \quad (3.4)$$

A saída de massa do volume de controle é calculada pela Equação 3.7:

$$0 = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} = \rho(Q + q dx) + \rho \left(Q + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) dx \right) \quad (3.5)$$

$$0 = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} - \rho q dx + \rho \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) dx \quad (3.6)$$

$$0 = \frac{\partial(\rho A dx)}{\partial t} - \rho \left(q dx - \left(\frac{\partial Q}{\partial x} \right) dx \right) \quad (3.7)$$

Assumindo que a massa específica (ρ) é constante, a Equação 3.7 pode ser dividida por $(\rho \cdot dx)$, obtendo-se a equação continuidade aplicáveis para onda cinemática, considerando entrada lateral:

$$0 = \frac{\partial A}{\partial t} - \left(q - \frac{\partial Q}{\partial x} \right) \quad (3.8)$$

$$q = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.9)$$

Para o plano ou vertente sem entrada lateral a equação da continuidade se torna:

$$0 = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \quad (3.10)$$

3.1.2 Equação da conservação de movimento

A equação da conservação de movimento é estabelecida originalmente a partir da segunda lei de Newton. A equação é uma relação vetorial em que apenas o componente da velocidade ao longo do canal afeta o equilíbrio do movimento (ALDRIGHETTI, 2007). Através da aplicação da segunda lei de Newton tem-se (SLEIGH; GOODWILL, 2000):

$$F = \text{massa} \times \text{aceleração} \quad (3.11)$$

$$= \rho \cdot A \cdot \Delta x \left[\frac{dv}{dt} \right] \quad (3.12)$$

$$= \rho \cdot A \cdot \Delta x \left[v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right] \quad (3.13)$$

sendo que (v) varia tanto no espaço (x) quanto no tempo. As forças que atuam sobre o fluido contido no volume de controle são:

$$\frac{\partial H}{\partial x} \quad \text{Mudança na pressão hidrostática;}$$

F	Resistência ao atrito das paredes e fundo do canal;
$\rho \cdot g$	Força da gravidade e o peso específico da água.

Considerando (ϕ) a declividade do fundo do canal, a soma destas três forças resulta:

$$\frac{\partial H}{\partial x} \Delta x \cdot \cos \phi - F \Delta x + \rho g A \Delta x \cdot \sin \phi = 0 \quad (3.14)$$

Para pequenas inclinações (ϕ), o $\cos \phi = 1$ e o $\sin \phi = \phi = S_f$, então:

$$\frac{\partial H}{\partial x} \Delta x - F \Delta x + \rho g A \Delta x \cdot i = 0 \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -\rho g A S_f \quad (3.16)$$

$$F = \rho g A S_0 \quad (3.17)$$

sendo,

S_0 : declividade da linha de fundo do canal, m/m;

S_f : declividade da linha de atrito do canal, m/m.

A representação das forças externas que contribuem para a variação do movimento no interior do canal encontra-se abaixo:

$$\rho A \Delta x \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x - \rho g A \cdot S_0 + \rho g A \Delta x \cdot S_f \quad (3.18)$$

onde:

$$\rho A \Delta x \left(v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) \quad \text{Termos de inércia;}$$

$\rho g A \frac{\partial h}{\partial x} \Delta x$	Termos de pressão;
$\rho g A \Delta x \cdot S_0$	Gravidade;
$\rho g A \Delta x \cdot S_f$	Atrito.

Rearranjando os termos da Equação 3.18, obtém-se:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0 \quad (3.19)$$

sendo,

v : é a velocidade média do escoamento (m/s);

h : é a profundidade do escoamento (m); (x) é a coordenada linear no espaço (m);

t : é a coordenada do tempo (s).

O termo (S_f) é obtido, geralmente, das equações de escoamento uniforme (equação de Chezy, Manning ou Darcy-Weisbach).

As Equações 3.9 e 3.19 formam as equações de Saint-Venant. Para resolvê-las podem ser utilizados os seguintes métodos de resolução:

- Método das Características;
- Método das Diferenças Finitas (implícito e explícito);
- Método dos Elementos Finitos.

Como pode ser observado na Equação 3.19, considerando todos os termos da equação da conservação de movimento obtém-se o modelo onda dinâmica. Não considerando os termos inerciais nem os termos de pressão na equação da quantidade de movimento obtém-se

o modelo Onda Cinemática. A visualização de ondas dinâmicas e cinemáticas encontra-se na Figura 3.4.

O modelo onda cinemática é aplicável quando a lâmina de água tem espessura reduzida, as forças mais importantes aplicadas ao fluido são a gravidade e o atrito, a velocidade do escoamento não varia consideravelmente, sendo a aceleração reduzida. O modelo simula somente os efeitos de montante e não pode ser utilizado para simular escoamento com influência de jusante, que ocorre, por exemplo, em rios e canais próximos a oceanos e estuários (TUCCI, 2005; KARMAKAR, 2012).

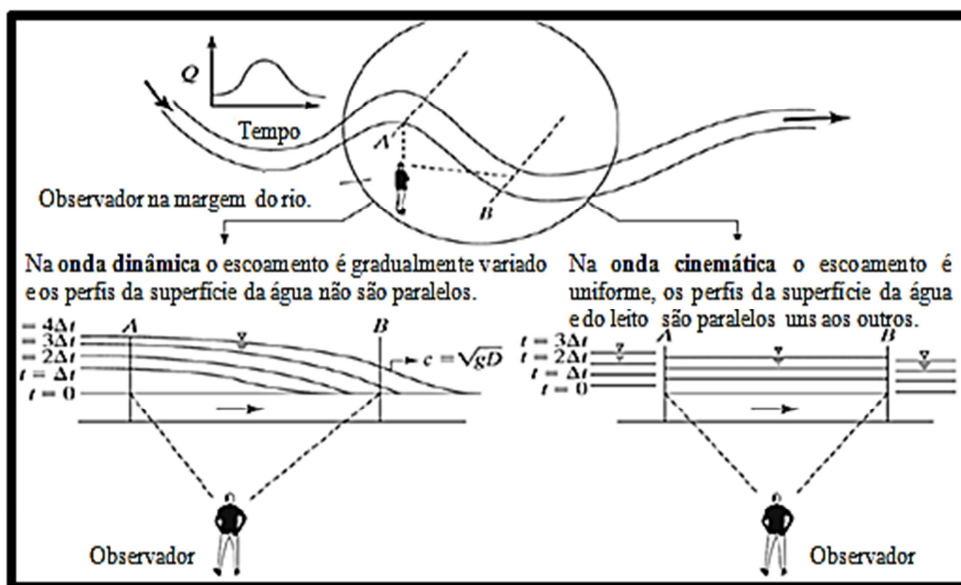


Figura 3.4 - Visualização de ondas dinâmicas e cinemáticas.
Fonte: Adaptado de KARMAKAR, 2012.

3.2 Discretização Espacial e Propriedades do Terreno

3.2.1 Discretização espacial

Com base na descrição espacial, os modelos hidrológicos podem ser classificados em três categorias: modelos concentrados, os modelos semi-distribuídos e modelos distribuídos.

Nos modelos concentrados toda a bacia é considerada como uma entidade única, as variações espaciais são ignoradas e a resposta da bacia é avaliada somente na saída (LASTORIA, 2008). As equações de um modelo concentrado são expressas por equações ordinárias (SINGH, 1995; CLARKE, 1973).

Nos modelos semi-distribuídos a variação espacial é considerada parcialmente, permitido dividir a bacia em um número de entidade de pequeno porte ou sub-bacias hidrográficas. São modelos de maior base física que os modelos concentrados e menos exigentes em dados de entrada que os modelos totalmente distribuídos (LASTORIA, 2008).

Nos modelos distribuídos a variabilidade espacial dos processos de entrada, condições de contorno, as características das bacias hidrográficas e de saída são definidos pelo usuário e são estritamente dependentes da resolução dos dados disponíveis (LASTORIA, 2008). De acordo com Cunderlik (2003), modelos distribuídos podem proporcionar alta precisão na modelagem dos processos de chuva-vazão. Os parâmetros destes modelos são espacialmente variados em uma determinada resolução e, portanto, requerem consideravelmente mais dados de entrada que os modelos semi-distribuídos (LASTORIA, 2008).

Vários métodos de simplificação da geometria fracionam a bacia em subáreas. Estas subáreas são conectadas por elementos que realizam a propagação do escoamento. Os métodos podem ser divididos em (SINGH; FREVERT, 2006):

- Métodos de grade ou malha;
- Métodos conceituais.

Há vários tipos de estruturas de grade ou malha, uma delas é grade retangular. Segundo Getirana (2009), a estrutura em grade retangular ou malha de células quadradas é a maneira mais prática de representar grandes porções da superfície terrestre, pois o tamanho das células é suficientemente grande para que se possa considerar que o transporte da água entre células ocorra apenas por escoamento ao longo dos principais rios. Células pequenas exigiriam a representação do escoamento subterrâneo e sub-superficial entre células (GOTSCHALK et al., 2001), o que tornaria a modelagem mais complexa.

Os métodos conceituais representam a geometria da bacia hidrográfica usando uma rede de seções elementares, na qual cada elemento representa uma porção particular da bacia (SINGH; FREVERT, 2006). É exemplo deste tipo de método a discretização por sub-bacias.

Modelos distribuídos por sub-bacias permitem a divisão da bacia em áreas, de acordo com os canais de drenagem do sistema. A subdivisão é feita em função dos dados disponíveis, locais de interesse e variabilidade dos parâmetros físicos da bacia. Moussa et al. (2007) apresentam o modelo espacialmente distribuído, chamado ModSpa (Modèle Spatialisé), em que a discretização espacial da bacia hidrográfica é composta por sub-bacias tanto na margem

direita, esquerda e a montante de cada sub-bacia, sendo que cada sub-bacia está ligada a apenas um canal. A Figura 3.5 apresenta a discretização proposta por Moussa et al. (2007).

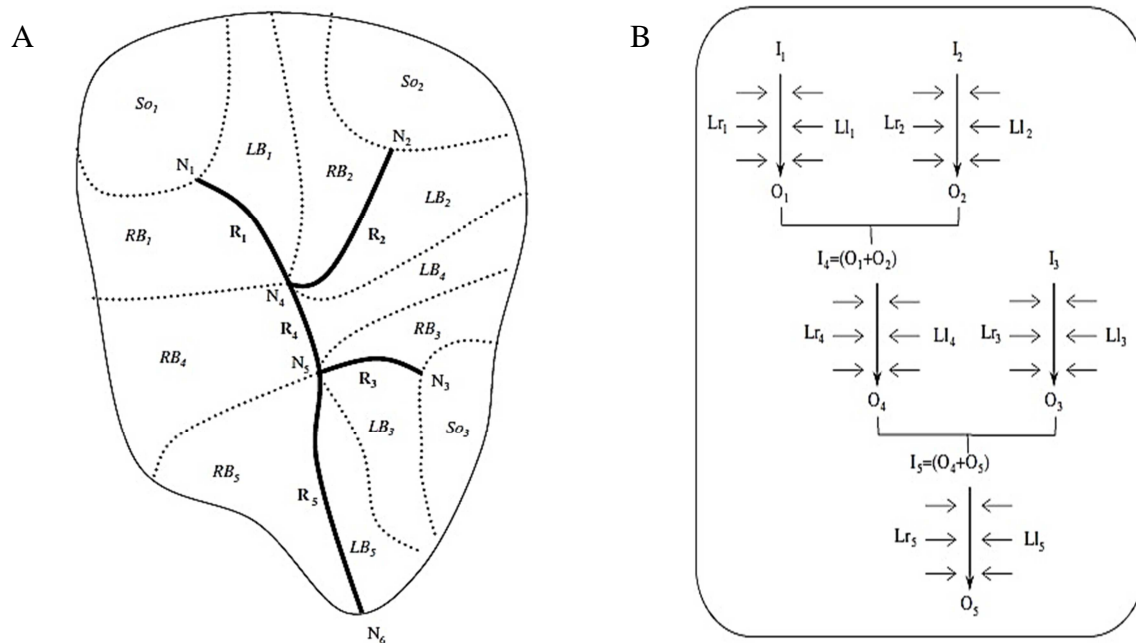


Figura 3.5 - (A) Codificação da rede: nós (N_i); drenagem (R_i em negrito) e sub-bacias (margem direita RB_i ; margem esquerda LB_i ; bacias de montante So_i). (B) Estrutura topológica (I: vazão de entrada; Lr: fluxo lateral das sub-bacias da margem direita; Ll: fluxo lateral das sub-bacias da margem esquerda, O: saída). Fonte: Adaptado de MOUSSA et al., 2007.

Desai (1979) apresenta a estrutura de discretização de bacias em zonas e planos (Figura 3.6), para o cálculo do escoamento superficial unidimensional do modelo Onda Cinemática utilizando elementos finitos. O autor considera que a bacia é composta por duas partes, uma de escoamento superficial e outra de canais. A parcela geradora do escoamento superficial é dividida em zonas, e estas em planos, de acordo com as características físicas da bacia. A precipitação efetiva de cada plano é transformada em escoamento superficial e este alimenta os elementos de canal. As vazões são propagadas dentro dos canais, até a seção de interesse.

Segundo Desai (1979), para montagem, definição dos planos e cálculo do escoamento superficial, levam-se em conta as características geométricas (comprimento e largura médios) e físicas (declividade e rugosidade).

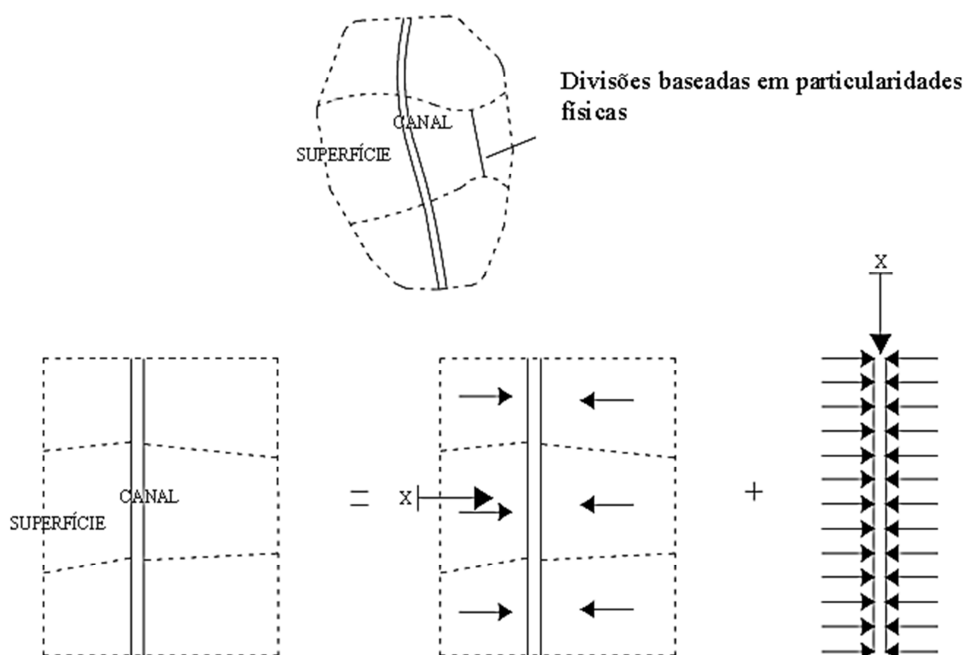


Figura 3.6 - Discretização de bacias em zonas e planos. Fonte: DESAI, 1979.

Barbosa (2006) e Silva (2007) utilizaram a discretização espacial da bacia hidrográfica em planos e canais. Em Barbosa (2006), a bacia hidrográfica foi dividida em 24 elementos, sendo 16 planos e 8 canais. Para a discretização, Barbosa (2006), levou em consideração a declividade dos planos e canais e a rede de fluxo que foi definida através da drenagem. No trabalho de Silva (2007), a bacia hidrográfica foi discretizada em 30 elementos, dos quais 21 são planos e 9 são canais. Cada elemento plano foi definido levando em consideração a homogeneidade das características dos solos, a declividade média e as linhas de fluxo, segundo a identificação de áreas homogêneas a partir da superposição de mapas físicos da bacia. Ambos os autores fizeram uso do modelo Kineros2, um modelo distribuído, de base física que pode ser utilizado na modelagem da vazão, bem como nos processos de erosão na bacia. A Figura 3.7 apresenta a discretização espacial utilizada pelos dois autores.

Segundo Barbosa (2006), a discretização da bacia em planos e canais tem por finalidade possibilitar uma maior representatividade das características físicas da região de forma a permitir resultados mais próximos da realidade.

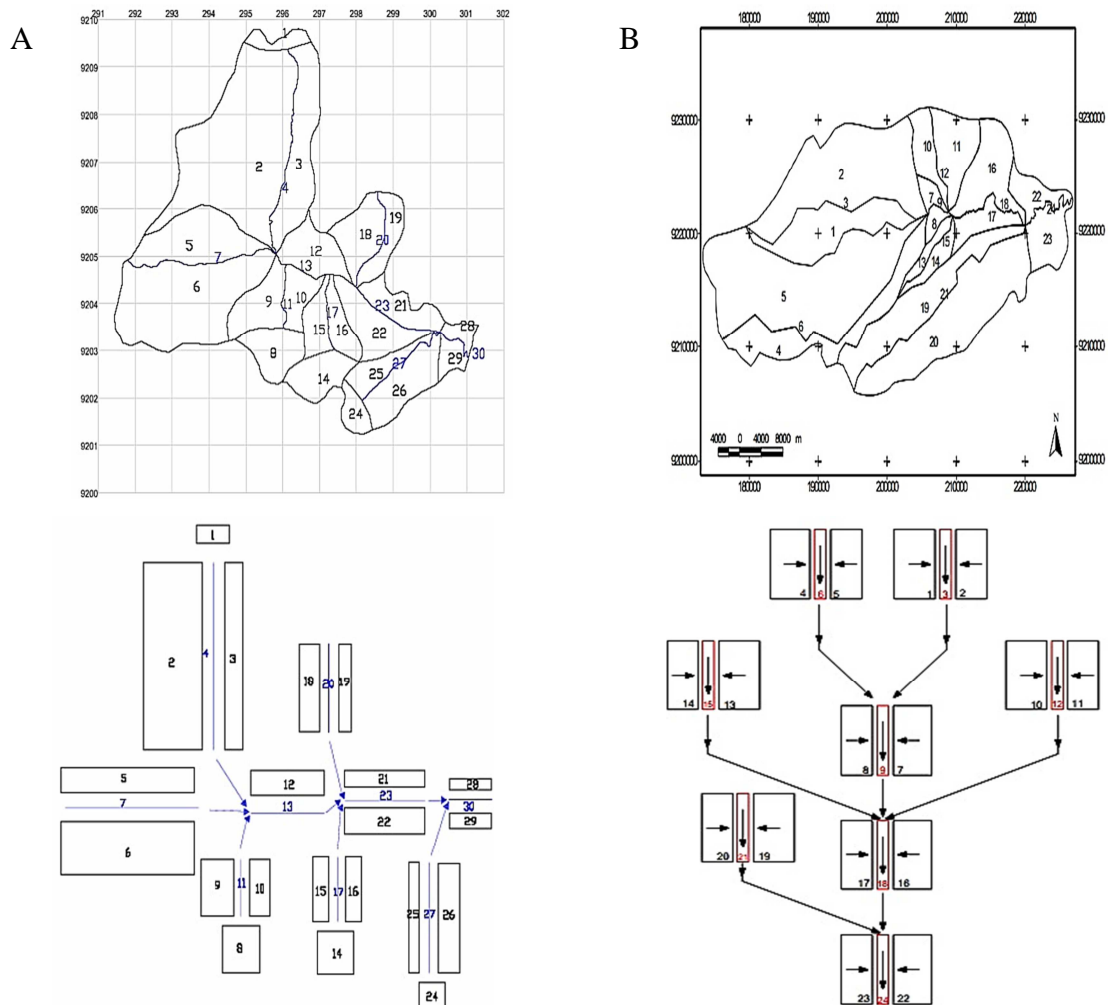


Figura 3.7 - (A) Representação esquemática dos elementos planos e canais utilizados por Silva (2007). (B) Representação esquemática da discretização da bacia utilizada por Barbosa (2006).

3.2.2 Propriedades do terreno

As variáveis topográficas necessárias para modelar o escoamento superficial em uma bacia hidrográfica incluem: a geometria da bacia, rede de drenagem, declividade, orientação e direção do fluxo. Como estas variáveis podem variar ao longo de uma bacia, é importante que a estimativa ocorra em uma escala que reflita tanto os efeitos locais e topográficos sobre a geração do escoamento. Os Modelos Digitais do Terreno e de Elevação (MDTs e MDEs) são ferramentas utilizadas para extrair automaticamente estas variáveis topográficas (MOORE et al., 1998).

Os dados numéricos que integram um MDE ou MDT podem ser do tipo vetorial ou do tipo *raster*, tal como mostra a Figura 3.8.

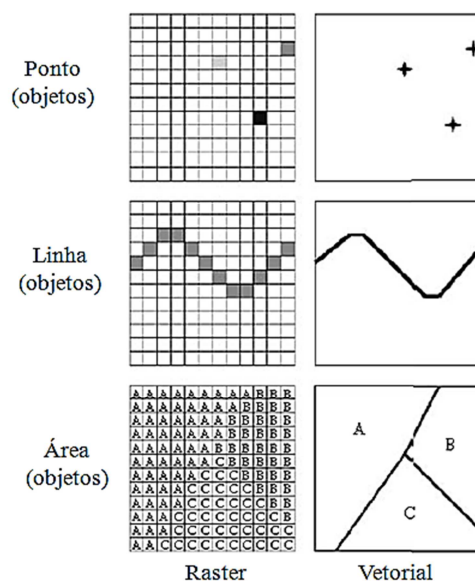


Figura 3.8 - Modelos de dados vetoriais e raster. Fonte: Adaptado de JOHNSON, 2009.

Os programas de geoprocessamento representam os modelos digitais sob a forma de grades, que podem ser regulares (*Grid*) ou irregulares (*TIN- Triangular Irregular Network*). Normalmente estas grades são obtidas por meio de alguma forma de interpolação utilizando amostras pontuais e/ou lineares. Cada tipo de grade apresenta vantagens e desvantagens, devendo a escolha se dar em função da aplicação. É bastante comum que, para fins de processamento, a grade regular seja utilizada, o que pode levar a se usar geração de um TIN e, em seguida, sua conversão para *Grid* (BARROS, 2006).

Geralmente, representações das características espaciais de uma bacia hidrográfica são contidas em uma série de conjuntos de dados *raster*, sob a forma de grades regulares (*grid*), o que pode incluir informações como altitude, propriedades do solo, uso da terra, temperatura e precipitação (JOHNSON, 2009). Quanto mais fina a resolução da grade, mais especificidade geográfica haverá na matriz de dados (JOHNSON, 2009). A Figura 3.9 apresenta um MDE na estrutura de dados *grid* e TIN (*Triangular Irregular Network*).

De acordo com Garbrecht et al. (2001), nos anos de 1970 e 1980, a aplicação rotineira dos modelos distribuídos foi frustrada pela necessidade de grandes conjuntos de dados para descrever a variabilidade espacial das características das bacias hidrográficas. Atualmente o uso de modelos distribuídos tem sido incentivado pela disponibilidade de conjuntos de dados

espacialmente distribuídos em escalas detalhadas, por exemplo, dados de sensoriamento remoto, de informações sobre propriedades físicas em escala de pequena bacia e o aumento da disponibilidade de poderosos recursos computacionais (PECHLIVANIDIS et al., 2011).

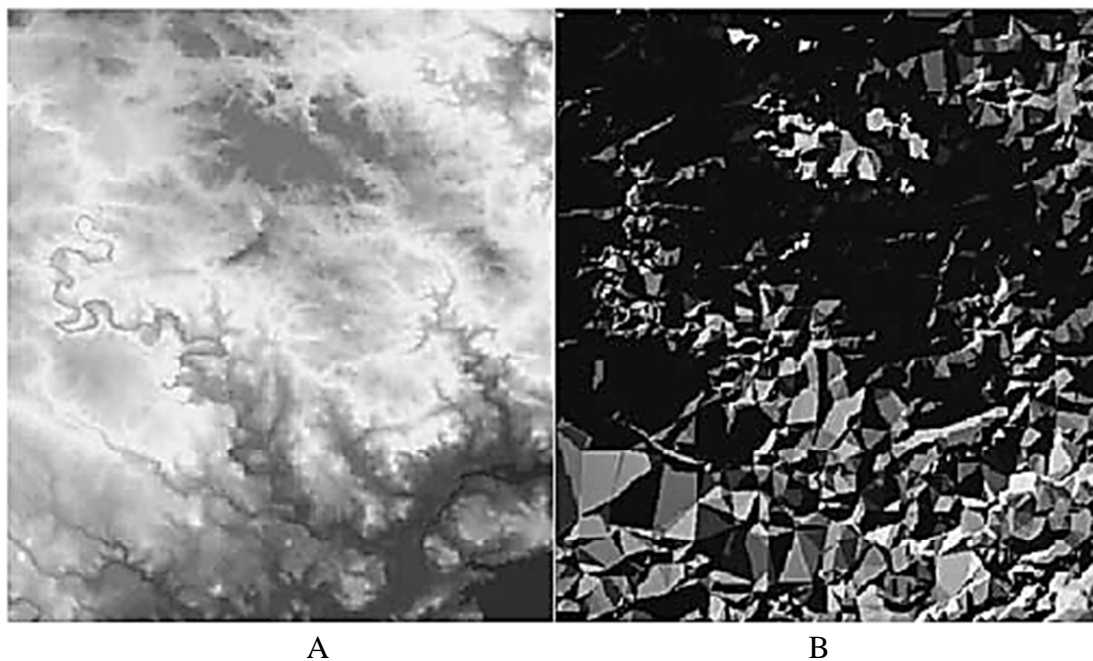


Figura 3.9 - MDE representado com: (A) *grid* e (B) TIN. Fonte: CLOSE, 2003.

Conforme Lastoria (2008), embora os dados hidrológicos tradicionais sejam medidas pontuais, os dados de sensoriamento remoto (fotografia aérea, radar e imagens de satélite) incorporam informação espacial, que normalmente é a informação obtida a partir de mapas ou fotografias aéreas e dá a possibilidade de observar áreas inteiras, em vez de alguns pontos.

As principais aplicações das ferramentas de SIG juntamente com o sensoriamento remoto são: para determinar a geometria da bacia hidrográfica, rede de drenagem, dados de entrada como tipo de solo e classes de uso da terra e outras informações necessárias (LASTORIA, 2008).

3.3 Modelos Distribuídos de Bacias Hidrográficas

3.3.1 SHE - Système Hydrologique Européen

A necessidade de um sistema de modelagem distribuída foi notada em meados da década de 1970 e resultou na decisão de desenvolver o modelo SHE, por meio de um consórcio europeu de institutos de hidrologia (ABBOTT et al., 1986a).

Na época, foi considerado que somente através de um sistema deste tipo seria possível resolver alguns dos problemas hidrológicos que foram se tornando cada vez mais prementes. Estes problemas foram decorrentes dos impactos negativos das atividades humanas sobre o ciclo hidrológico (ABBOTT et al., 1986a).

Uma fonte específica de inspiração para o desenvolvimento do sistema SHE, foi o trabalho pioneiro de Freeze (1971, 1972a, 1972b), que desenvolveu um modelo de base física para bacias hidrográficas. Reconheceu-se que um sistema tal como o SHE teria um enorme futuro, entretanto sua aplicação prática inevitavelmente encontraria algumas dificuldades. Algumas delas já haviam sido observadas em uma aplicação limitada do trabalho de Freeze.

Algumas das principais dificuldades previstas pelos desenvolvedores do modelo SHE no início foram (ABBOTT et al., 1986a):

- Os recursos (experiência humana e capacidade de computação) necessários para desenvolver o SHE;
- A necessidade de manter a carga computacional associada à execução do SHE dentro dos limites da geração de computadores da época;
- A quantidade potencialmente grande de dados que seriam necessários para uma aplicação prática do SHE.

O SHE é um modelo de base física, a distribuição espacial dos parâmetros da bacia, a precipitação de entrada e resposta hidrológica é conseguida na horizontal e na vertical através de uma malha retangular (ABBOTT et al., 1986b). Prevê-se a utilização de uma malha com até 2000 células na horizontal e 30 na vertical para permitir a adequada definição de uma bacia (BEVEN et al., 1980). Em cada célula e em cada nível da discretização vertical é necessário conhecer o valor da condutividade hidráulica e a capacidade do solo de reter a umidade. Uma estimativa do coeficiente de Manning é necessária para cada célula da malha, tanto para o escoamento no plano como no escoamento em canal. A estrutura esquemática do modelo SHE encontra-se na Figura 3.10.

No SHE, apenas os componentes principais da fase terrestre do ciclo hidrológico são modelados (interceptação, evapotranspiração, fluxo do canal e escoamento subsuperficial). Detalhes secundários, não estão explicitamente modelados por causa da complexidade extra envolvida (ABBOTT et al., 1986b). A programação do modelo é flexível e permite diferentes modos de operação para diferentes níveis de disponibilidade de dados.

Apesar de representar todos os processos por equações com embasamento físico, o modelo SHE apresenta a desvantagem de necessitar de uma grande quantidade de dados que, teoricamente, podem ser medidos em laboratório ou em experimentos de campo, embora a altos custos (PAIVA, 2008). Uma descrição completa do modelo SHE é dada em Jønch-Clausen (1979) e alguns detalhes técnicos são discutidos em Preissmann e Zaoui (1979).

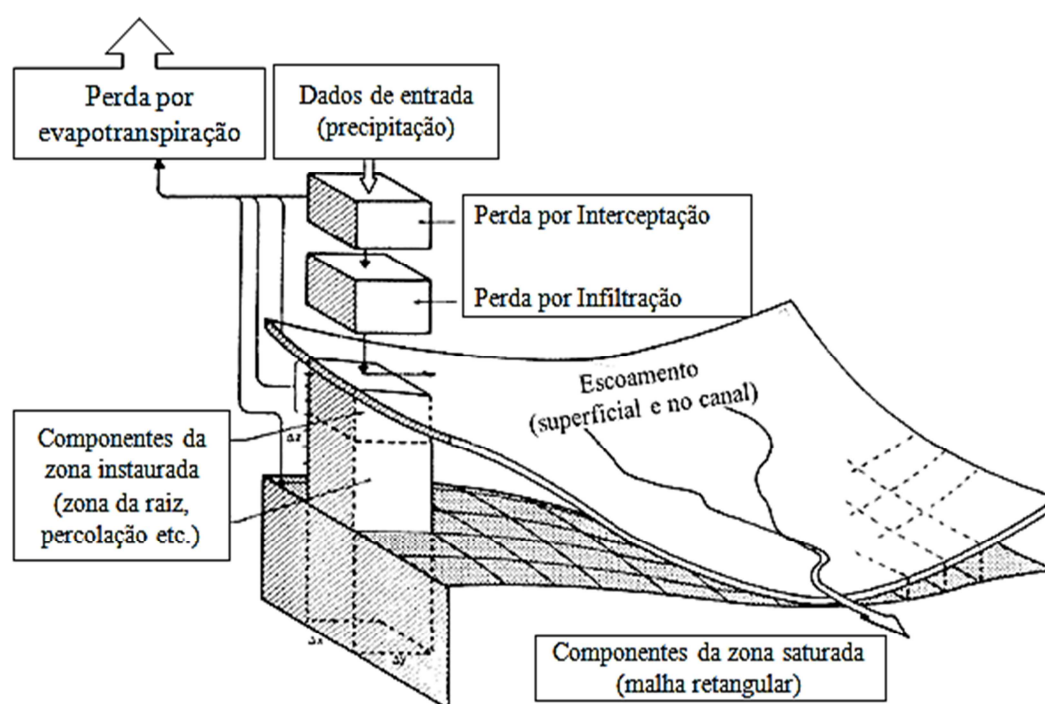


Figura 3.10 - Representação esquemática da estrutura do modelo SHE.
Fonte: Adaptado de BEVEN et al., 1980.

3.3.2 TOPMODEL - Topography Based Hydrological Model

Outra referência frequente no assunto de modelos hidrológicos distribuídos é o modelo TOPMODEL (BEVEN et al., 1994), o qual utiliza relações físicas para representar bacias hidrográficas e seus processos hidrológicos. A estrutura do TOPMODEL se baseia na discretização em sub-bacias (TUCCI, 2005).

Uma das hipóteses básicas utilizadas no desenvolvimento do modelo TOPMODEL, segundo Beven et al. (1994), refere-se ao gradiente hidráulico na zona saturada, o qual pode ser aproximado usando a declividade da superfície do terreno. Esta hipótese é incorporada no modelo na forma de um índice, denominado índice topográfico. Este índice representa a disposição de qualquer local da bacia atingir condições de saturação. Uma das limitações

encontradas com a aplicação do índice topográfico, de acordo com Szilagyi e Parlange (1999), é que a forma de sua função de distribuição depende do tamanho das células do modelo digital de elevação utilizado.

Alguns trabalhos apresentaram soluções compensatórias para esta limitação, Franchini et al. (1996) desenvolveram uma relação empírica e Saulnier et al. (1997) estudaram a influência da resolução da malha sobre a condutividade hidráulica saturada apresentando uma compensação analítica. Pradhan et al. (2004) formularam um fator de resolução para o efeito da escala nas áreas por unidade de contorno do índice topográfico e um método fractal para o efeito da escala nas declividades. Desta forma, os métodos combinados originam um novo método para cálculo do índice topográfico independente da resolução da malha. A Figura 3.11 esquematiza o índice topográfico.

Para propagar os escoamentos ao longo da rede de drenagem o TOPMODEL estabelece um histograma tempo-área derivado a partir de uma função distância-área (SILVA; KOBAYAMA, 2007). A função distância-área organiza a área de drenagem em função de sua distância do exutório da bacia (RODRÍGUEZ-ITURBE; RINALDO, 1997). A Figura 3.12 apresenta um exemplo ilustrativo do método utilizado pelo TOPMODEL para a propagação do escoamento ao longo da rede de drenagem. Dentre as variáveis de entrada requeridas pelo modelo, cita-se a precipitação e a evapotranspiração. O modelo utiliza, efetivamente, a evapotranspiração real, que é calculada em função da evapotranspiração potencial e da umidade armazenada na zona radicular das plantas. Os principais componentes do TOPMODEL são o armazenamento e o fluxo nas zonas saturadas e não-saturadas, além da propagação do fluxo nas sub-bacias (ZANETTI, 2007).

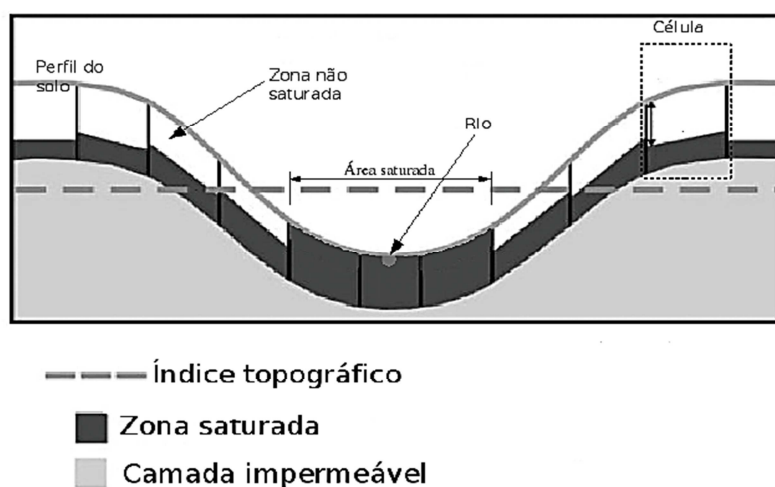


Figura 3.11 - Índice topográfico. Fonte: Adaptado de CAMPLING et al., 2002.

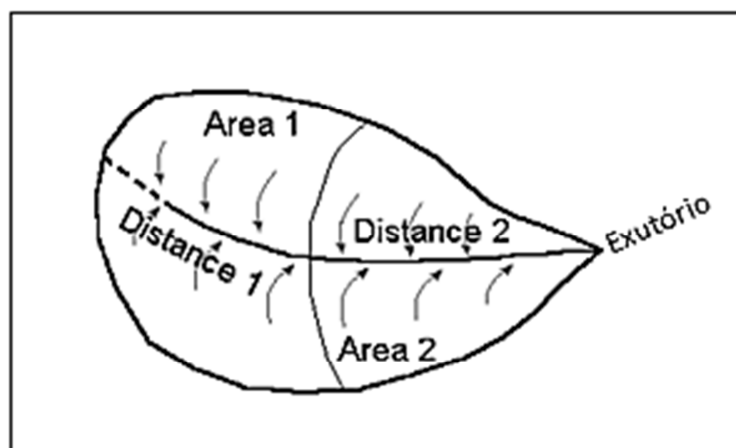


Figura 3.12 - Ilustração do método TOPMODEL para a propagação do escoamento.
Fonte: Adaptado de FEDAK, 1999.

De acordo Gineste e Puech (1996), uma das vantagens do modelo TOPMODEL é a utilização de um índice de similaridade hidrológica entre áreas da bacia, o que reduz o número de parâmetros necessários para simulação e diminui a complexidade do modelo.

O SHE e TOPMODEL são modelos com maior aplicação em bacias pequenas, ou mesmo bacias de vertentes, com drenagem efêmera. Outro aspecto comum aos dois modelos é que a calibração de alguns parâmetros é, em geral, necessária, especialmente nos casos em que a resolução espacial é baixa. Portanto, a utopia dos modelos hidrológicos de base 100% física, sem parâmetros para calibrar, parece distante devido às dificuldades na coleta e tratamento dos dados (COLLISCHONN, 2001).

3.3.3 MGB-IPH - Modelo Hidrológico para Grandes Bacias

Entre os modelos hidrológicos distribuídos desenvolvidos no Brasil, cita-se o Modelo de Grandes Bacias MGB-IPH (COLLISCHONN; TUCCI, 2001; COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN et al., 2007a). Trata-se de um modelo hidrológico chuva-vazão, acoplado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), para aplicação em bacias hidrográficas de grande porte. O modelo foi concebido segundo adaptações dos modelos LARSIM (LUDWIG; BREMICKER, 2006) e VIC-2L (LIANG et al., 1994; NIJSSEM et al., 1997) com algumas alterações nos módulos de evapotranspiração, infiltração e propagação do escoamento no canal (COLLISCHONN et al., 2007b).

O modelo MGB-IPH representa a bacia hidrográfica por células quadradas, usualmente da ordem de cerca de 10 km de dimensão. A dimensão das células é definida

observando vários critérios envolvendo principalmente o objetivo do estudo e a dimensão da bacia, e respeitando também as hipóteses consideradas na formulação do modelo, desenvolvido para trabalhar com grandes bacias. Valores usuais são de 0,05°, 0,1° e 0,2°, que equivalem a aproximadamente 5, 10 e 20 km, respectivamente (PAZ, 2008).

O tipo de vegetação e uso da terra dentro de cada célula é categorizado dentro de uma ou mais classes de acordo com a escolha do usuário. Para reduzir o custo computacional, o modelo utiliza a abordagem da Unidade de Resposta Hidrológica (URH) proposta por Kouwen et al. (1993). A URH consiste em agrupar todas as áreas com combinações similares de solo e uso da terra, por exemplo, áreas com solos de grande capacidade de infiltração e com mata nativa podem compor um bloco, enquanto áreas com cultivo de arroz podem constituir outro bloco. Alguns parâmetros do modelo hidrológico são calibrados especificamente para cada bloco e, portanto, procura-se reduzir a quantidade de blocos visando parcimônia na quantidade de parâmetros. Tipicamente, o modelo MGB-IPH tem sido aplicado com 4 a 9 blocos (BRAVO, 2008).

Os dados de entrada do MGB-IPH dividem-se em dois tipos: dados de séries temporais de variáveis hidrológicas e dados espaciais (mapas). Os dados hidrológicos utilizados na aplicação do MGB-IPH consistem em arquivos que contenham informações diárias de vazão, chuva e clima (COLLISCHONN et al., 2010).

O modelo MGB-IPH já foi testado e utilizado na bacia do Rio São Francisco, que se encontra em parte da região semi-árida do Nordeste do Brasil (TUCCI et al., 2004), nas bacias da região do Pantanal que se encontra entre a Bolívia e o Brasil (ALLASIA et al., 2006) e na bacia do Alto Paraguai (BRAVO et al., 2012).

3.3.4 WEHY - Watershed Environmental Hydrology

O Modelo WEHY (KAVVAS et al., 2004; CHEN et al., 2004a,b) é capaz de lidar com a heterogeneidade das bacias hidrográficas e quantificar as interações entre processos hidrológicos em evolução na escala temporal e espacial. Para isto, o modelo utiliza um conjunto médio de fórmulas que se resume na equação de continuidade, conservação de movimento, equações de fluxo de água superficial e subterrâneo.

A aplicação do modelo WEHY envolve os seguintes passos (CHEN et al., 2004a):

- Processamento de dados do sistema de informação geográfico (SIG) e de dados hidrometeorológicos;

- Configuração do modelo;
- Estimativa dos parâmetros do modelo;
- Validação do modelo.

O modelo utiliza o Sistema de Informação Geográfica (SIG) para obter informações detalhadas sobre vegetação, condições de uso do solo e cobertura da terra, tipos de solos, topografia e geologia da bacia que está sendo modelada (JAFRI et al., 2010). A configuração do modelo envolve a delimitação da bacia e das unidades computacionais do modelo (*model computational units* - MCUs) e a seleção dos componentes hidrológicos específicos para a aplicação.

Os parâmetros do modelo WEHY estão relacionados com as propriedades físicas da bacia hidrográfica e são estimados a partir de informações disponíveis na topografia, solos, vegetação e condições de cobertura do solo. Os processos gerais para a estimativa dos parâmetros do modelo é descrito em Chen et al. (2004a). A descrição esquemática do modelo pode ser visualizado na Figura 3.13.

O WEHY subdivide a bacia hidrográfica em unidades computacionais (MCUs) delimitadas a partir do mapa digital de elevação (MDE) da bacia hidrográfica. O modelo calcula os processos hidrológicos superficiais e subsuperficiais em paralelo e simultaneamente. Segundo Kavvas et al. (2004), o modelo considera que os fluxos superficiais e subsuperficiais interagem dinamicamente entre si. Desta forma, o WEHY pode descrever tanto o mecanismo de escoamento hortoniano (excesso de infiltração), bem como o mecanismo de escoamento superficial direto. O modelo é dividido em dois módulos (hidrológico e ambiental) e calculam as perdas por interceptação, evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, transporte de sedimentos e nutrientes (JAFRI et al., 2010).

O Modelo WEHY confirma a afirmação de Van Liew et al. (2005) de que os avanços da capacidade computacional e dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) têm levado à sofisticação dos modelos hidrológicos, com a incorporação das características climáticas, dos solos, da topografia e dos usos do solo na discretização espacial da bacia hidrográfica.

Alguns trabalhos tem apresentado a aplicação deste modelo, dentre eles Chen et al. (2004b), Kavvas et al. (2006), Liang et al. (2007) e Jafri et al. (2010).

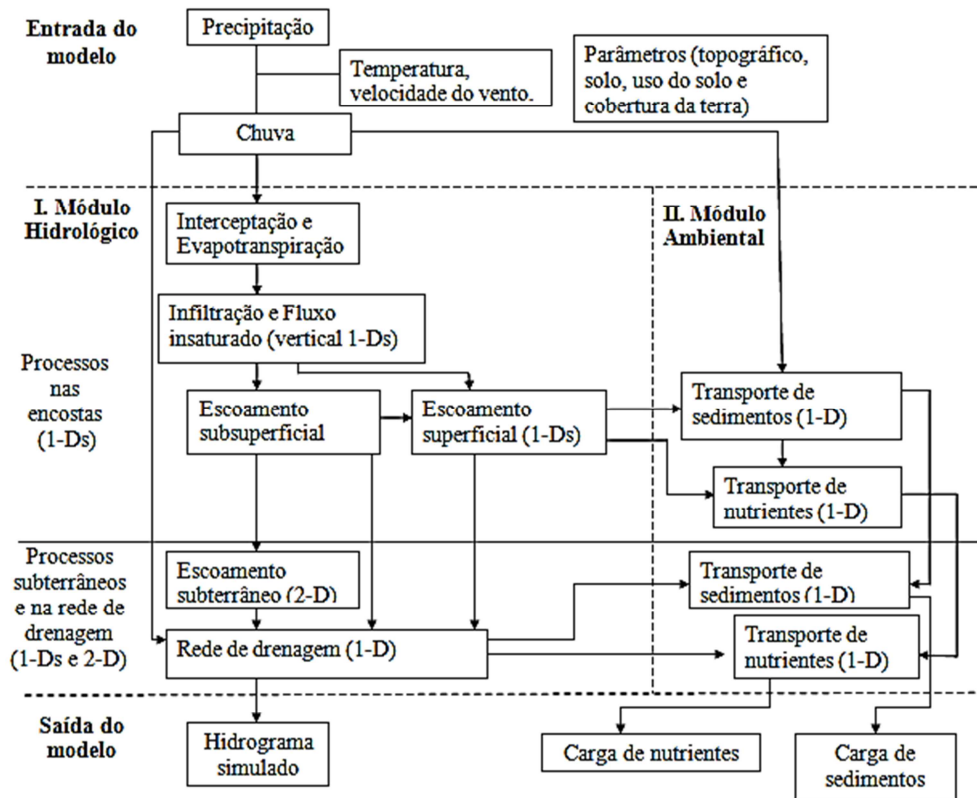


Figura 3.13 - Descrição esquemática do modelo WEHY.
 Fonte: Adaptado de KAVVAS et al., 2004.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento do Modelo

O modelo desenvolvido permite a obtenção do hidrograma de escoamento superficial, da vazão máxima e mínima do volume escoado para qualquer posição de uma bacia hidrográfica considerando os processos de precipitação, infiltração da água no solo (obtida pela equação de Horton modificada por Bauer) e escoamento superficial, utilizando o modelo onda cinemática, a partir do modelo digital de elevação do terreno.

O modelo foi desenvolvido no ambiente de programação MATLAB, denominado UFGModel 1D. Os dados necessários e as etapas seguidas para usar o modelo são combinados de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 4.1.

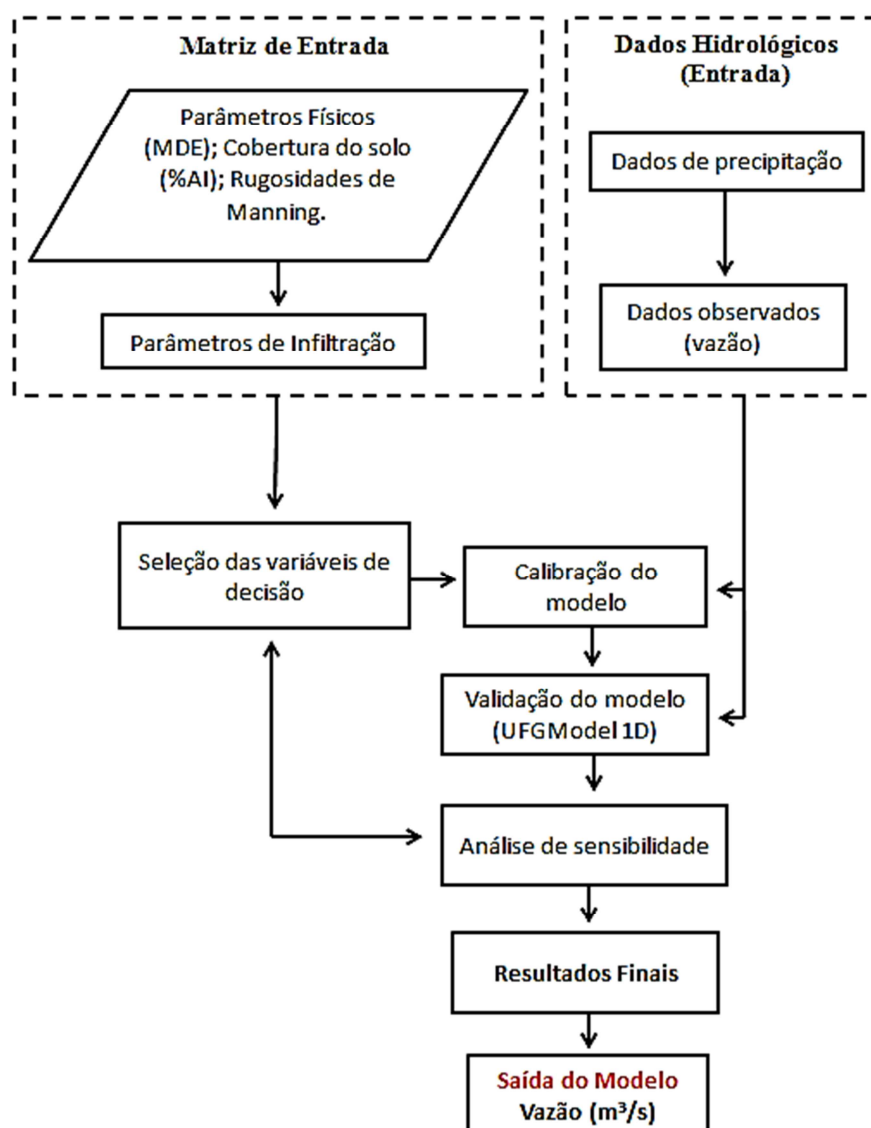


Figura 4.1 – Fluxograma do modelo UFGModel 1D. Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.1 Cálculo da Infiltração

4.1.1.1 Equação de Horton modificada por Bauer

O modelo de Horton não apresenta um bom ajuste para o início da infiltração, esse problema pode ser resolvido utilizando-se modificações do modelo para comportar o problema, como as propostas Bauer (1974). O modelo proposto por Bauer (1974) modifica a equação de Horton para a simulação da infiltração durante chuvas intermitentes, onde o comportamento da infiltração é expresso em função do conteúdo inicial de água no solo.

Segundo Bauer (1974), para iniciar a simulação deve ser especificado o conteúdo inicial de água no solo. O tempo dentro da curva de decaimento pode ser determinado resolvendo a seguinte equação:

$$t = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1 - S_t k / f_0} \quad (4.1)$$

onde,

t : tempo, h;

k : coeficiente de decaimento, h^{-1} ;

f_0 : capacidade inicial de infiltração, mm/h;

S_t : armazenamento de água no início do processo (mm).

O armazenamento máximo de água no solo durante o processo é calculado pela equação modificada utilizando a seguinte fórmula:

$$S_{\max} = \frac{f_0}{k} \quad (4.2)$$

Como apresenta a Figura 4.2, a profundidade potencial de infiltração acumulada é representada pela área abaixo da curva (f) entre o intervalo (f_t) infiltração no início do processo, e ($f_{t+\Delta t}$) infiltração no final do processo. A profundidade de drenagem é representada pela área sob a curva (d) para o mesmo intervalo. Ainda de acordo com a Figura 4.2 pode ser visto que a profundidade real de infiltração acumulada durante um intervalo de tempo depende da magnitude de (f_t) e ($f_{t+\Delta t}$) relativo a uma determinada precipitação (p_t), onde (f_t) e ($f_{t+\Delta t}$) são determinados pela equação original de Horton.

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (4.3)$$

onde,

f_0 : capacidade de infiltração inicial, mm/h;

f_c : capacidade de infiltração final ou saturada, mm/h;

k : taxa de decaimento em h^{-1} .

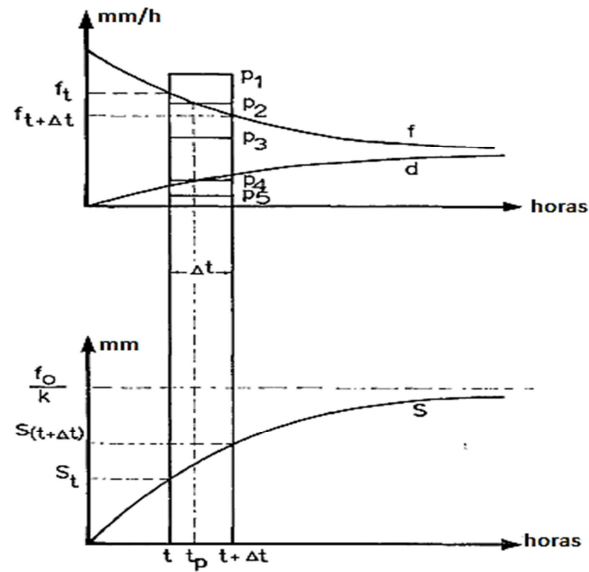


Figura 4.2 – Infiltração potencial e real para uma determinada quantidade de água inicial no solo. Fonte: BAUER, 1974.

A Figura 4.2 mostra que quando a profundidade da infiltração potencial for igual à profundidade real da infiltração, o resultado obtido a partir da fórmula modificada será o mesmo encontrado pela fórmula original de Horton. A profundidade da infiltração real é encontrada pela integração da equação original de Horton, apresentada na Equação 4.4:

$$\bar{f} = f_c \Delta t + \frac{f_0 - f_c}{k} (e^{-kt} - e^{-k(t+\Delta t)}) \quad (4.4)$$

em que \bar{f} é a profundidade da infiltração entre o tempo (t) e ($t + \Delta t$), em mm;

Bauer (1974) afirma que o comportamento realista pode ser simulado tendo em conta o teor de água inicial no solo. Assim sendo, um baixo teor de água no solo significa que a taxa

potencial de infiltração será maior do que quando o solo estiver úmido. Quando o solo é umidificado a taxa de infiltração diminui, conseqüentemente a taxa de drenagem aumenta. Ou seja, a taxa mínima de infiltração se aproxima da taxa máxima de drenagem. Este conceito pode ser incorporado na equação de Horton, através da introdução de uma função para descrever drenagem, expressa pelas seguintes equações.

$$d = f_c - (f_c)e^{-kt} \quad (4.5)$$

A integração da Equação 4.5, ao longo de um determinado intervalo de tempo, resulta na Equação 4.6:

$$\bar{d} = f_c \Delta t - \frac{f_c}{k} (e^{-kt} - e^{-k(t+\Delta t)}) \quad (4.6)$$

em que \bar{d} é a profundidade da drenagem, mm.

O armazenamento no final (S) do processo é encontrado pela seguinte equação.

$$S = S_t + \bar{f} - \bar{d} \quad (4.7)$$

Destaca-se que o modelo calcula a infiltração mesmo depois de encerrada a precipitação, ou seja, até o momento que houver lâmina d'água sobre a superfície.

4.1.2 Propagação do escoamento superficial

Desde que foi proposta por Lighthill e Whitham (1955) a teoria da onda cinemática têm sido provada como um modelo que pode ser aplicado a uma gama de problemas e situações reais na Engenharia de Recursos Hídricos. Duas das principais aplicações são no escoamento em planos e canais.

Uma grande vantagem do método é a possibilidade de se obter equações analíticas para problemas relativamente complexos. Como mencionado anteriormente o modelo onda cinemática despreza os termos inerciais e os termos de pressão na equação dinâmica reduzindo-a assim a condição de escoamento uniforme.

O modelo onda cinemática implementado neste trabalho baseou-se no desenvolvimento teórico apresentado por Mays (2005).

4.1.2.1 Equações governantes do modelo

4.1.2.1.1 Escoamento no plano

O modelo onda cinemática, considera a declividade da linha de energia igual à declividade da superfície do solo, assumindo, assim, uma seção transversal média de escoamento. Com a utilização de equações normalmente usadas para escoamento em regime uniforme, obtêm-se as relações entre a vazão e a profundidade de escoamento expressas por:

$$Q = \alpha h^\beta \quad (4.8)$$

Os parâmetros (α) e (β) são obtidos por meio da equação de Manning, com base nas seguintes relações:

$$Q = \frac{A}{n} \cdot Rh^{2/3} \cdot \sqrt{S_0} \quad (4.9)$$

$$Q = \frac{A}{n} \cdot \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (4.10)$$

$$Q = \frac{A^{5/3} \cdot P^{-2/3} \cdot \sqrt{S_0}}{n} \quad (4.11)$$

$$Q = \frac{\sqrt{S_0}}{n} \cdot A^{5/3} \quad (4.12)$$

em que,

A : a área da seção transversal do escoamento, m²;

Rh : raio hidráulico, m;

P : perímetro molhado, m;

S_0 : declividade da superfície do solo, m/m;

n : coeficiente de rugosidade de Manning.

O perímetro molhado (P) é desconsiderado, uma vez que o escoamento ocorre no plano. Para o adequado emprego desta metodologia, deve-se substituir o termo “A” por “h”. Então pode-se introduzir os parâmetros (α) e (β) dados por:

$$\alpha = \frac{\sqrt{S_0}}{n} \quad (4.13)$$

$$\beta = \frac{5}{3} \quad (4.14)$$

A declividade foi determinada por meio do modelo digital de elevação do terreno.

4.1.2.1.1.1 Processo de solução do modelo onda cinemática para o escoamento no plano

Uma das formas de aplicação da equação da continuidade (Equação 3.9), considerando ($q = 0$), pode ser expressa por:

$$q = \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.15)$$

Substituindo (Q) pela Equação 4.8, obtém-se:

$$q = \frac{\partial \alpha h^\beta}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.16)$$

Trata-se de uma equação diferencial parcial com uma única variável dependente (h) e duas variáveis independentes (t) e (x). Para resolver este problema é preciso recorrer a um esquema numérico. Neste caso, optou-se pelo esquema das diferenças finitas. O esquema das diferenças finitas é um dos mais antigos e simples empregados para resolução numérica de equações diferenciais.

A discretização dos métodos das diferenças finitas, na maioria dos casos é chamada de regular ou em forma de malhas ortogonais. Para o problema do escoamento unidimensional a

malha de soluções é representada em duas dimensões: uma espacial (x) e outra temporal (t). Utilizando os esquemas explícitos as equações são resolvidas diretamente sem necessidade de outro recurso numérico.

Nos esquemas explícitos as equações a serem resolvidas têm apenas uma incógnita a ser determinada. Eles utilizam a informação da variável no tempo atual (k), para o cálculo da variável na seção, no tempo seguinte ($k + 1$), conforme ilustrado na Figura 4.3.

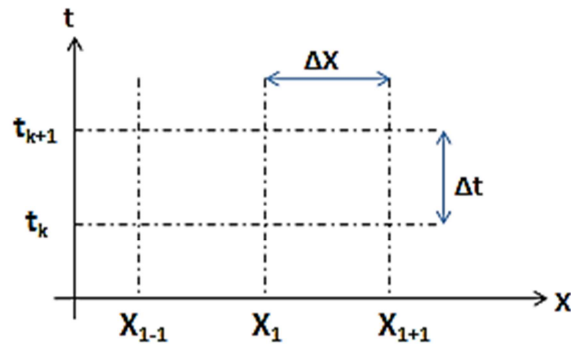


Figura 4.3 – Grade computacional para esquemas explícitos.
Fonte: Elaborado pela autora.

Na resolução numérica utilizando esquemas explícitos, para se obter a profundidade em uma seção (i) em um tempo ($t+1$), utiliza-se os valores conhecidos na seção (i) e no tempo (t), seguindo o desenvolvimento descrito abaixo:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{(h(i)^{t+1}) - h(i)^t}{\Delta t} \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \alpha h^\beta}{\partial x} = \frac{\alpha (h(i)^{t+1})^\beta - \alpha (h(i-1)^{t+1})^\beta}{\Delta x} \quad (4.18)$$

Substituindo os termos da Equação 4.16 pelas Equações 4.17 e 4.18, resulta em:

$$\frac{h(i)^{t+1}}{\Delta t} + \frac{\alpha (h(i)^{t+1})^\beta}{\Delta x} = \frac{h(i)^t}{\Delta t} + \frac{\alpha (h(i-1)^{t+1})^\beta}{\Delta x} + q \quad (4.19)$$

Para a resolução desse problema existem duas possibilidades, a linearização ou a solução numérica por Newton-Raphson. Utilizando o processo de linearização, chega-se a Equação (4.20), válida para $\beta < 2$:

$$\left(h(i)^{t+1}\right)^\beta = \left(h(i)^{t+1}\right) \cdot \left(h(i)^t\right)^{\beta-1} \quad (4.20)$$

Substituindo os termos da Equação 4.19 pelos termos da Equação 4.20, obtém-se:

$$\frac{h(i)^{t+1}}{\Delta t} + \frac{\alpha \left(h(i)^{t+1}\right) \cdot \left(h(i)^t\right)^{\beta-1}}{\Delta x} = \frac{h(i)^t}{\Delta t} + \frac{\alpha \left(h(i-1)^{t+1}\right)^\beta}{\Delta x} + q \quad (4.21)$$

Rearranjando os termos da Equação 4.21, obtém-se a formulação numérica do modelo onda cinemática, para o cálculo da profundidade da lâmina d'água no plano.

$$h(i)^{t+1} = \frac{\frac{h(i)^t}{\Delta t} + \frac{\alpha \left(h(i-1)^{t+1}\right)^\beta}{\Delta x} + q}{\frac{1}{\Delta t} + \frac{\alpha \left(h(i)^t\right)^{\beta-1}}{\Delta x}} \quad (4.22)$$

Uma vez obtido o valor de $h(i)^{t+1}$, este é transformado em vazão utilizando a Equação 4.8, expressa por:

$$Q(i)^{t+1} = \alpha \cdot \left(h(i)^{t+1}\right)^\beta \quad (4.23)$$

4.1.2.1.2 escoamento no Canal

A modelagem do escoamento superficial no canal foi realizada utilizando-se a equação da continuidade (Equação 3.9) e da conservação de movimento (Equação 3.19), considerando o escoamento em regime uniforme e não variado.

O modelo desenvolvido assume que o canal tem geometria retangular. Uma representação esquemática da seção transversal do canal com formato retangular encontra-se

na Figura 4.4. Destaca-se que os parâmetros (α) e (β) dependem da seção transversal do canal.

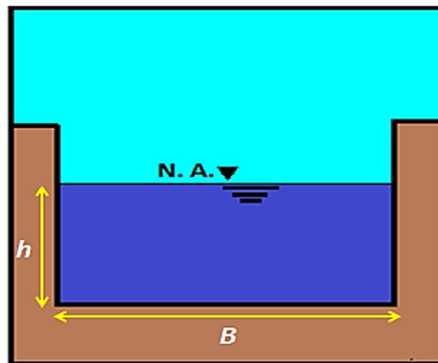


Figura 4.4 – Seção retangular. Fonte: Elaborado pela autora.

Os parâmetros (α) e (β) foram obtidos por meio da seguinte equação:

$$A = \alpha Q^\beta \quad (4.24)$$

em que,

A : área da seção transversal do escoamento, m^2 ;

Q : vazão total do escoamento no canal, m^3/s .

Com base na equação de Manning, podem-se retirar as seguintes relações:

$$Q = \frac{A}{n} \cdot R h^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (4.25)$$

$$Q = \frac{A}{n} \cdot \left(\frac{A}{P} \right)^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (4.26)$$

$$n \cdot Q = A^{5/3} \cdot S_0^{1/2} \cdot P^{-2/3} \quad (4.27)$$

$$A^{5/3} = \frac{n \cdot Q \cdot P^{2/3}}{S_0^{1/2}} \quad (4.28)$$

$$A = \left(\frac{n \cdot P^{2/3}}{S_0^{1/2}} \right)^{3/5} \cdot Q^{3/5} \quad (4.29)$$

em que,

Rh : raio hidráulico, m;

P : perímetro molhado, m;

S_0 : declividade da linha de fundo do canal, m/m;

n : coeficiente de rugosidade de Manning.

Desta forma, pode-se introduzir os parâmetros (α) e (β) dados por:

$$\alpha = \left(\frac{n \cdot P^{2/3}}{\sqrt{S_0}} \right)^{3/5} \quad (4.30)$$

$$\beta = \frac{3}{5} \quad (4.31)$$

4.1.2.1.2.1 Processo de solução do modelo onda cinemática para o escoamento no canal

A formulação numérica do modelo onda cinemática para escoamento no canal se dá por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial t} = (\alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1}) \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (4.32)$$

Substituindo a Equação 4.32 na equação da continuidade (Equação 3.9), tem-se:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + (\alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1}) \frac{\partial Q}{\partial t} = q \quad (4.33)$$

Esta equação pode ser resolvida empregando um esquema explícito de 4 pontos fazendo:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q(i)^{t+1} - Q(i-1)^{t+1}}{\Delta x} \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{Q(i)^{t+1} - Q(i)^t}{\Delta t} \quad (4.35)$$

$$Q^* = \frac{Q(i-1)^{t+1} + Q(i)^t}{2} \quad (4.36)$$

$$q^* = \frac{q(i)^{t+1} + q(i)^t}{2} \quad (4.37)$$

Substituindo os termos da Equação 4.33 pelas Equações 4.34, 4.35, 4.36 e 4.37, resultam em:

$$\frac{Q(i)^{t+1} - Q(i-1)^{t+1}}{\Delta x} + \alpha \cdot \beta \cdot (Q^*)^{\beta-1} \cdot \frac{Q(i)^{t+1}}{\Delta t} - \alpha \cdot \beta \cdot (Q^*)^{\beta-1} \cdot \frac{Q(i)^t}{\Delta t} = q^* \quad (4.38)$$

Rearranjando os termos da Equação 4.38, obtém-se a formulação numérica da onda cinemática para o cálculo da vazão no canal.

$$Q(i)^{t+1} = \frac{\frac{\Delta t \cdot Q(i-1)^{t+1}}{\Delta x} + \alpha \cdot \beta \cdot (Q^*)^{\beta-1} \cdot Q(i)^t + \Delta t \cdot q^*}{\frac{\Delta t}{\Delta x} + \alpha \cdot \beta \cdot (Q^*)^{\beta-1}} \quad (4.39)$$

Uma vez obtido o valor de $Q(i)^{t+1}$, a determinação da área da seção transversal do escoamento, altura da lâmina d'água e perímetro molhado são dados pelas seguintes equações:

$$A(i)^{t+1} = \alpha \cdot (Q(i)^{t+1})^\beta \quad (4.40)$$

$$h(i)^{t+1} = \frac{A(i)^{t+1}}{B} \quad (4.41)$$

$$P(i)^{t+1} = B + 2(h(i)^{t+1}) \quad (4.42)$$

sendo,

B : largura do canal, m;

h : altura da lâmina d'água, m.

4.2 Avaliação do modelo

4.2.1 Área de Estudo

A área modelada foi um trecho da parte norte da bacia hidrográfica do córrego Samambaia, localizada na cidade de Goiânia, GO, com área de 17,67 km², aproximadamente 54% da área total da bacia. Para tanto, foi delimitada a bacia hidrográfica do córrego Samambaia considerando-se a seção de monitoramento do nível d'água como exutório. A Figura 4.5 apresenta a área de estudo.

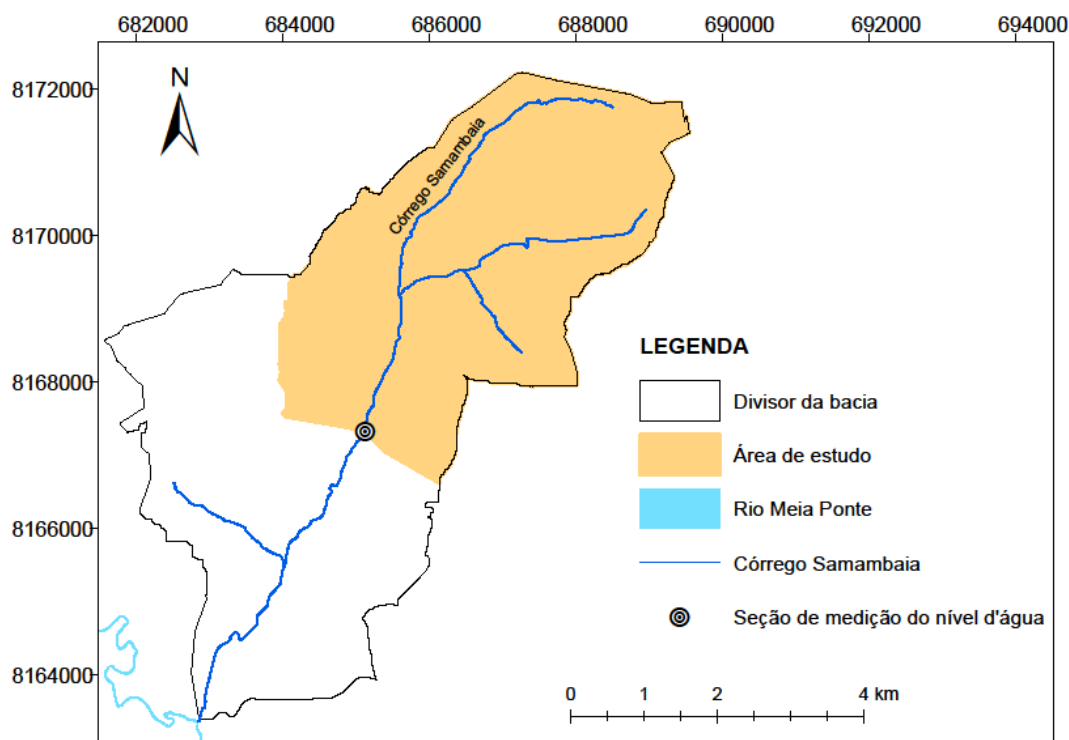


Figura 4.5 – Mapa de localização da área de estudo.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1.1 Aspectos gerais da bacia hidrográfica do córrego Samambaia

A bacia hidrográfica do córrego Samambaia apresenta área de 32,78 km², perímetro de 35,01 km, comprimento do rio principal igual a 10,92 km. A bacia está localizada no município de Goiânia, a foz do córrego Samambaia encontra-se junto ao Rio Meia Ponte. A Figura 4.6, apresenta a localização da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.

O tempo de concentração da bacia foi estimado por dois métodos, o método de Tsuchiya e o método direto, o método direto calcula explicitamente todos os tempos do escoamento em todos os percursos da bacia, o que resultou em valores iguais a 75,41 e 76,32 minutos, respectivamente (SOUZA et al., 2013).

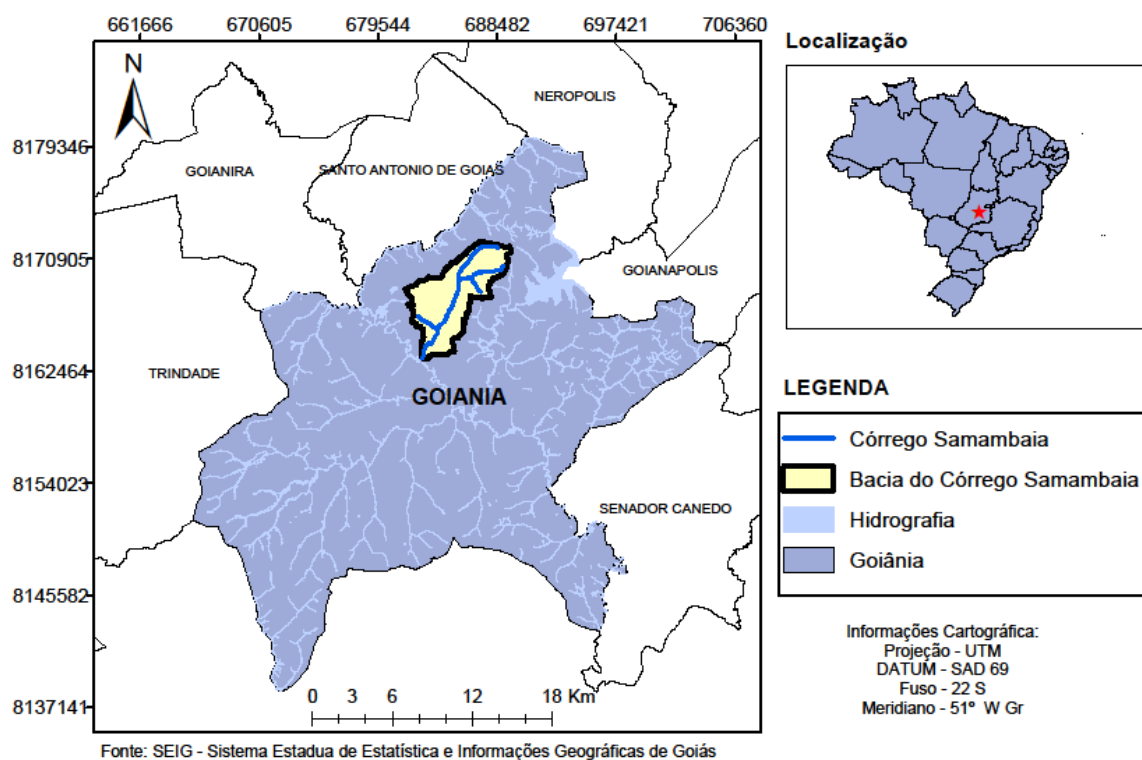


Figura 4.6 – Localização da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.

Fonte: Elaborado pela autora.

Os levantamentos pedológico, geológico e geomorfológico são de grande importância para experimentos que visam ao estudo de variabilidade espacial e temporal de alguns atributos da bacia e estabelece uma base de informações que será útil para justificar eventuais comportamentos hidrológicos na área de estudo.

4.2.1.1.1 Pedologia

De acordo com a Figura 4.7, verifica-se que em termos pedológicos a área é constituída maioritariamente pelas seguintes classes (GOIÁS, 2005):

- **LEd2**: associação de Latossolo Vermelho-Escuro e Latossolo Roxo, ambos distróficos com textura moderada argilosa ou muito argilosa.
- **HGPe**: Gleissolo pouco húmico eutrófico (Tb ou Ta) com textura argilosa, associado à Plintossolo distrófico (Tb) de textura argilosa ou média/argilosa e solos aluviais eutróficos (Tb) de textura média.

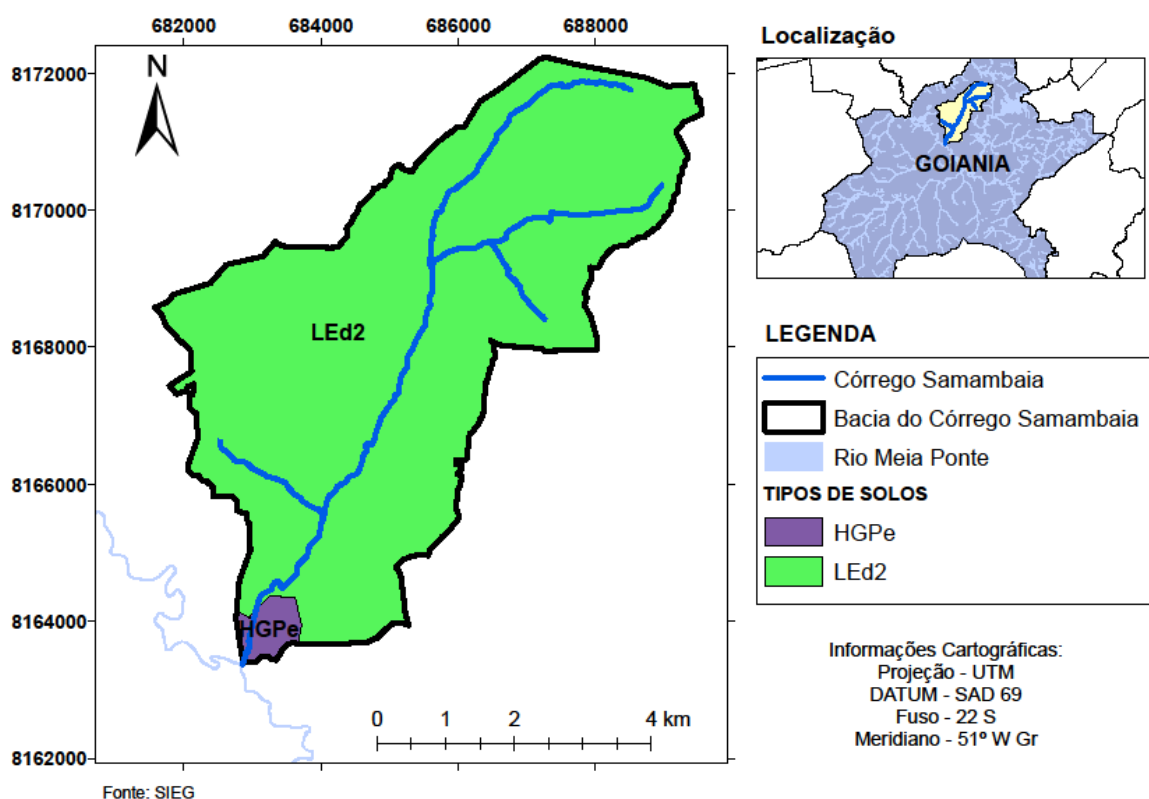


Figura 4.7 – Agrupamentos dos tipos de solos na bacia hidrográfica do córrego Samambaia.
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 4.1, é possível visualizar a distribuição dos tipos de solos na área da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.

De acordo Sartori et al., (2005) e Caram (2010), os Latossolos caracterizam-se por serem profundos, bem drenados, com alta taxa de infiltração, alto grau de resistência e tolerância à erosão e baixo potencial de geração de escoamento, características que propiciam

uma grande capacidade de armazenamento de água, ocorrem em terrenos planos ou suavemente ondulados.

Os Gleissolos são solos que se caracterizam por serem mal drenados, baixa capacidade de infiltração e alta capacidade de geração de escoamento. Normalmente apresentam excesso de umidade durante o período chuvoso, e no período de estiagem tornam-se secos e excessivamente duros, ocorrem em superfícies aplainadas, em geral rebaixadas, em planícies aluviais e fundos de vales, locais favoráveis à saturação em água. Com relação aos Plintossolos, são solos que podem apresentar pequena profundidade, elevado potencial de escoamento superficial, encontram-se em terrenos planos (relevos de várzea) ou ondulados (SARTORI et al., 2005; CARAM, 2010).

Tabela 4.1 – Distribuição dos tipos de solos na área da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.

Tipos de solos	Área (km²)	%
Latossolo Vermelho-Escuro + Latossolo Roxo	32,12	97,99
Gleissolo + Plintossolo	0,66	2,01
TOTAL	32,78	100,00

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1.1.2 Geologia

Na área da bacia hidrográfica do córrego Samambaia são observados afloramentos de rochas gnáissicas, granulíticas, xistosa, mármores, depósitos de argila e silte. Estas rochas que, pelas características petrográficas e estruturais, se enquadram no Complexo Granulítico Anápolis – Itauçú (NP2aio, NP2ais e NP2aisqt) e Depósitos Aluvionares (Q2a), de idade fanerozoíca a proterozóica inferior (GOIÁS, 2009). Na Figura 4.8 encontram-se os Agrupamentos de unidades geológicas na bacia hidrográfica do córrego Samambaia.

A Figura 4.8 apresenta as seguintes unidades geológicas (GOIÁS, 2009):

- **NP2aio:** Complexo Granulítico Anápolis – Itauçú, associação Ortogranulitos;
- **NP2ais:** Complexo Granulítico Anápolis – Itauçú, associação Supracrustais;
- **NP2aisqt:** Complexo Granulítico Anápolis – Itauçú, associação Supracrustais (Litofácies Quartzito);
- **Q2a:** Depósitos Aluvionares.

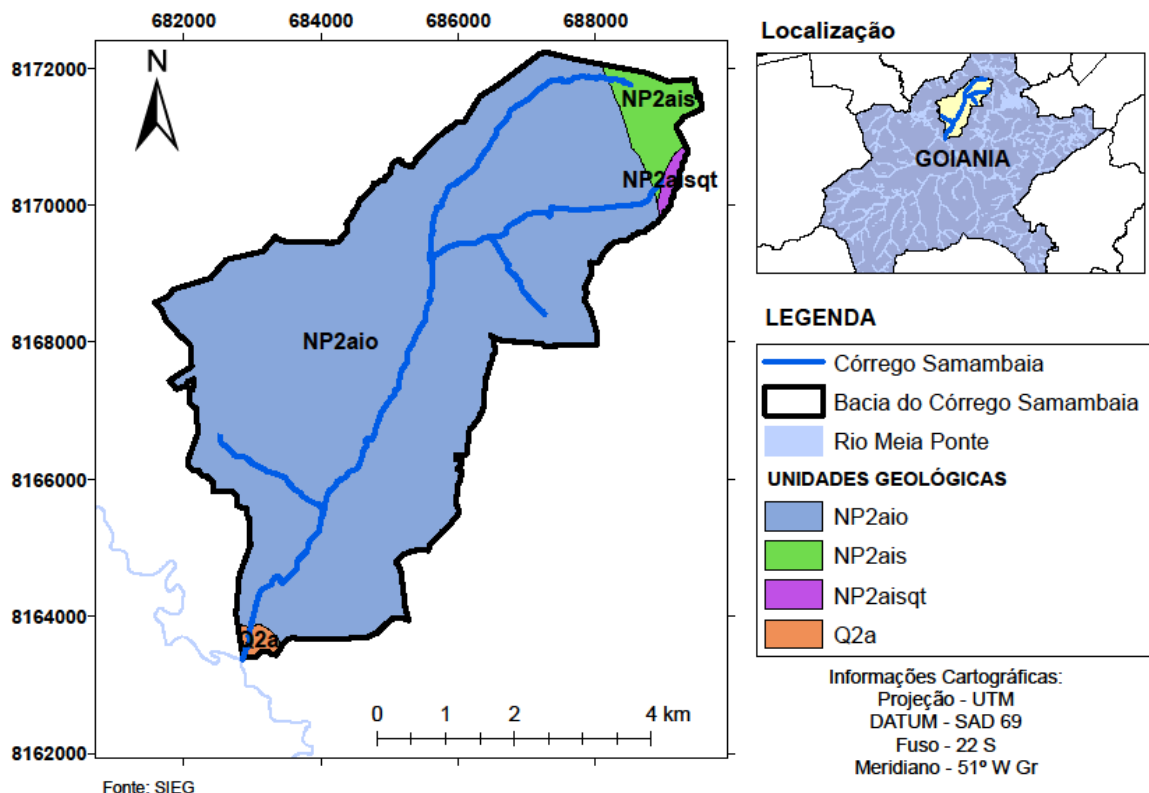


Figura 4.8 – Agrupamentos de unidades geológicas na bacia hidrográfica do córrego Samambaia. Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.1.1.3 Geomorfologia

Conforme a Figura 4.9, as unidades geomorfológicas presentes na área da bacia hidrográfica do córrego Samambaia são (GOIÁS, 2006):

- **PF**: Planície Fluvial com padrão meandriforme;
- **SRAIIA**: Superfície Regional de Aplainamento IIA;
- **SRAIIIA**: Superfície Regional de Aplainamento IIIA.

Na bacia do córrego Samambaia destaca-se a Planície Fluvial com padrão meandriforme, onde os meandros são os elementos geomorfológicos dominantes (GOIÁS, 2006). A subunidade SRAIIA se desenvolve entre as cotas 900 – 1250 m, na bacia do córrego Samambaia encontra-se entre as cotas 900 – 1100 m. Por ser formada por superfícies com cotas relativamente altas, o padrão do relevo é suavemente ondulado com baixa densidade de drenagem e presença de latossolos. A referida subunidade desenvolve-se sobre rochas pré-cambrianas, compostas por ardósias, calcários, dolomitas entre outras (GOIÁS, 2006).

A subunidade SRAIIIA desenvolve-se sobre rochas pré-cambrianas. Na SRAIIIA ocorrem crostas lateríticas, colúvios nas vertentes dos vales e áreas de sedimentação restrita onde se acumularam sedimentos aluviais (GOIÁS, 2006).

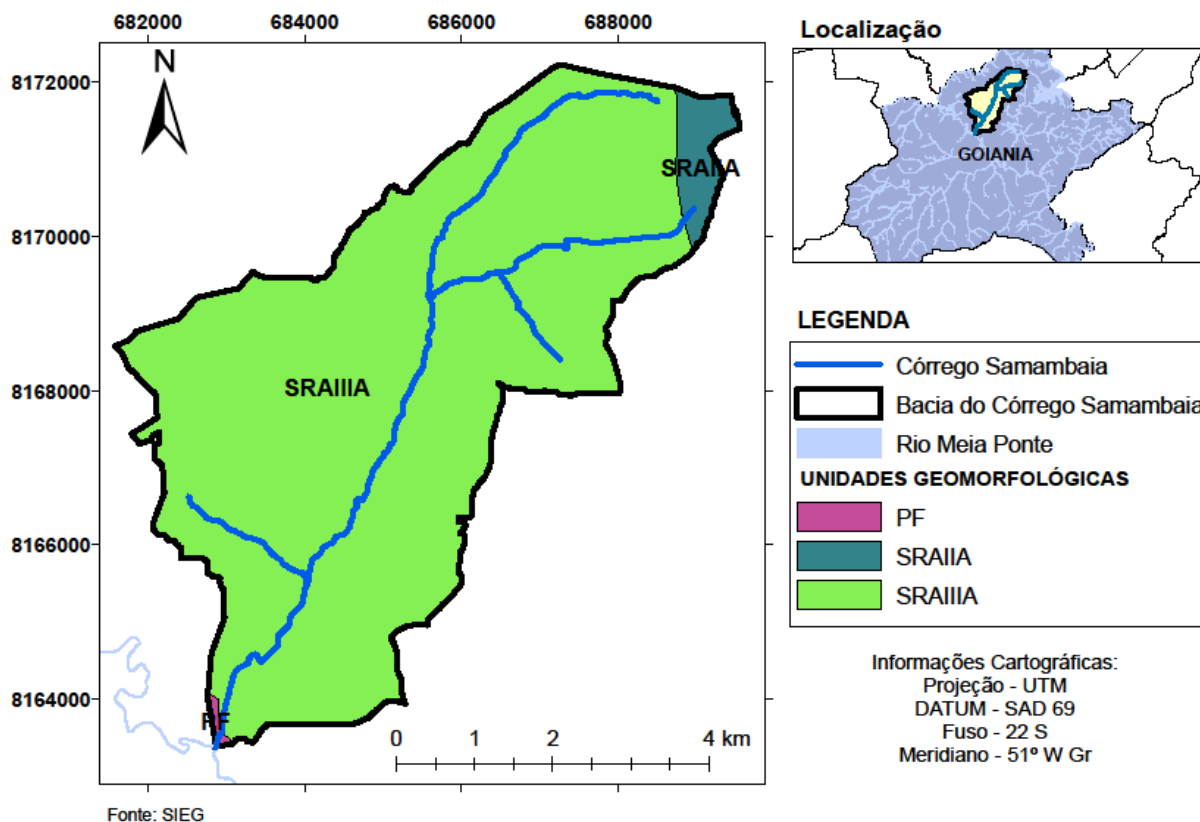


Figura 4.9 - Agrupamentos de unidades geomorfológicas na bacia hidrográfica do córrego Samambaia. Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.2 Discretização espacial da área de estudo

Tendo em vista a dificuldade de representar a heterogeneidade espacial de uma bacia hidrográfica, procurou-se um método de discretização que permitisse uma melhor consideração da variabilidade espacial dos parâmetros e, assim, obter uma boa representação dos processos hidrológicos envolvidos. Desta forma, adotou-se a discretização espacial em planos e sub-planos.

A discretização da área de estudos iniciou-se com o uso do conjunto de ferramentas denominado *ArchHydro Tools*, um *Toolbox* desenvolvido pelo Centro de Pesquisas em Recursos Hídricos, da Universidade do Texas. O *ArchHydro Tools* faz uso do método de Otto Pfafstetter (VERDIN; VERDIN, 1999) para a divisão automática de uma bacia hidrográfica

em sub-bacias, as etapas utilizadas pelo *Toolbox* são explicadas detalhadamente em Mainardi et al. (2009). A utilização do *ArcHydro Tools* se deu apenas pelo fato de ser um conjunto de ferramentas que delimita automaticamente a área de contribuição de cada canal da bacia hidrográfica, o que facilitou na divisão dos canais e planos.

Na segunda e última etapa da discretização, cada sub-bacia delimitada pelo *ArcHydro Tools*, foi considerada como um plano e cada plano teve sua área recortada em sub-planos. Os sub-planos foram recortados aleatoriamente, sem levar em consideração quaisquer características em comum entre os mesmos durante a divisão.

Ao todo, a área de estudo foi discretizada em 70 elementos, dos quais 13 são planos, 52 são sub-planos e 5 são canais. Cada plano teve sua área dividida em 4 sub-planos. A discretização utilizada na modelagem e a representação esquemática da discretização podem ser visualizadas na Figura 4.10 e 4.11.

Todas as etapas da discretização espacial ocorreram a partir do uso do *software* ArcGIS, a partir do modelo digital de elevação do terreno. O MDE da área de estudo encontra-se representado na Figura 4.12.

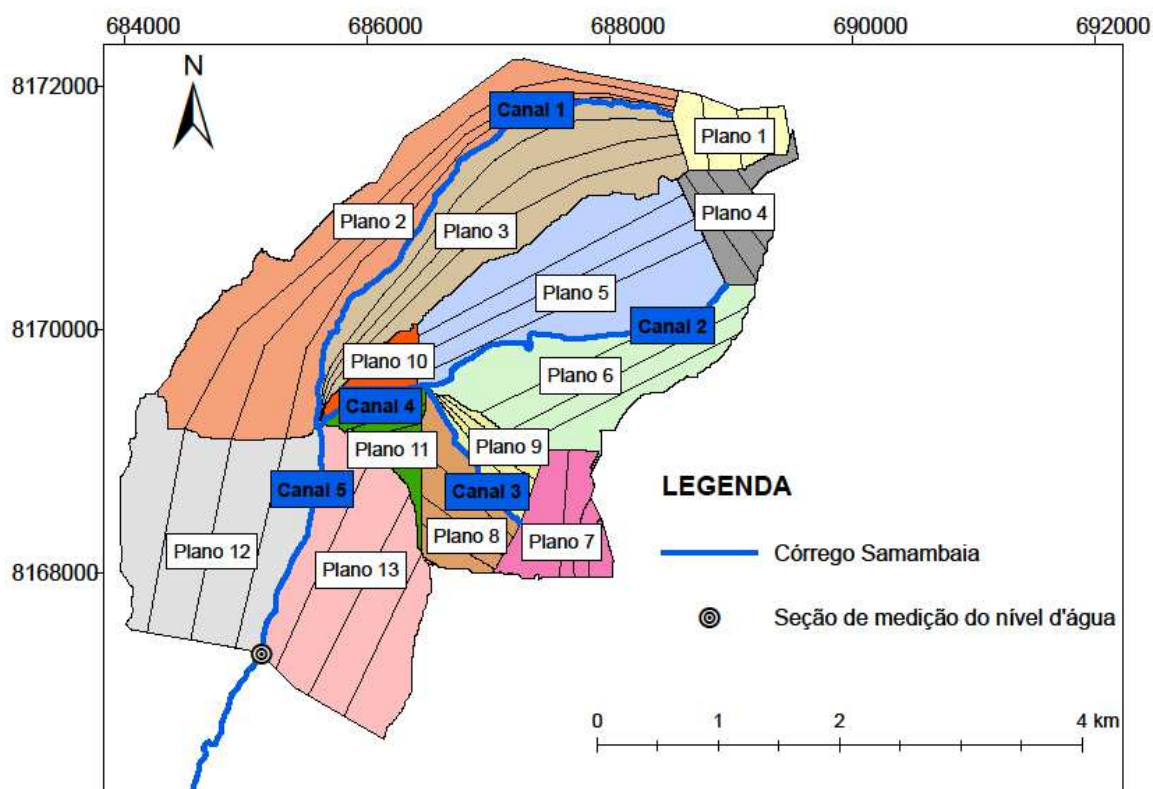


Figura 4.10 - Discretização utilizada na modelagem.

Fonte: Elaborado pela autora.

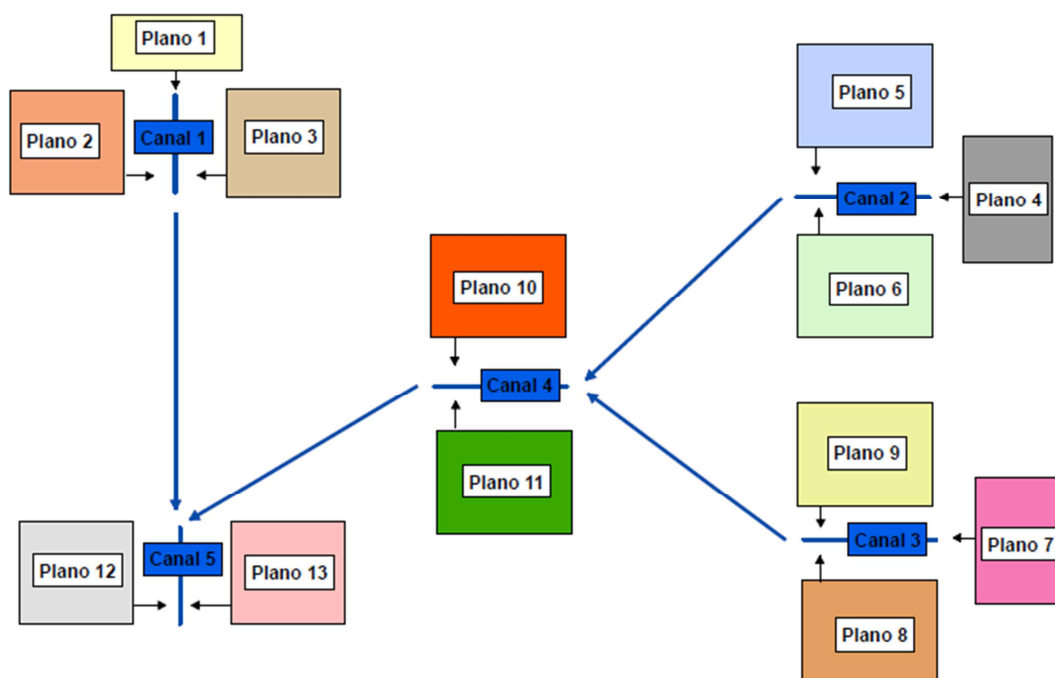


Figura 4.11 - Representação esquemática da discretização da área de estudo em planos e canais. Fonte: Elaborado pela autora.

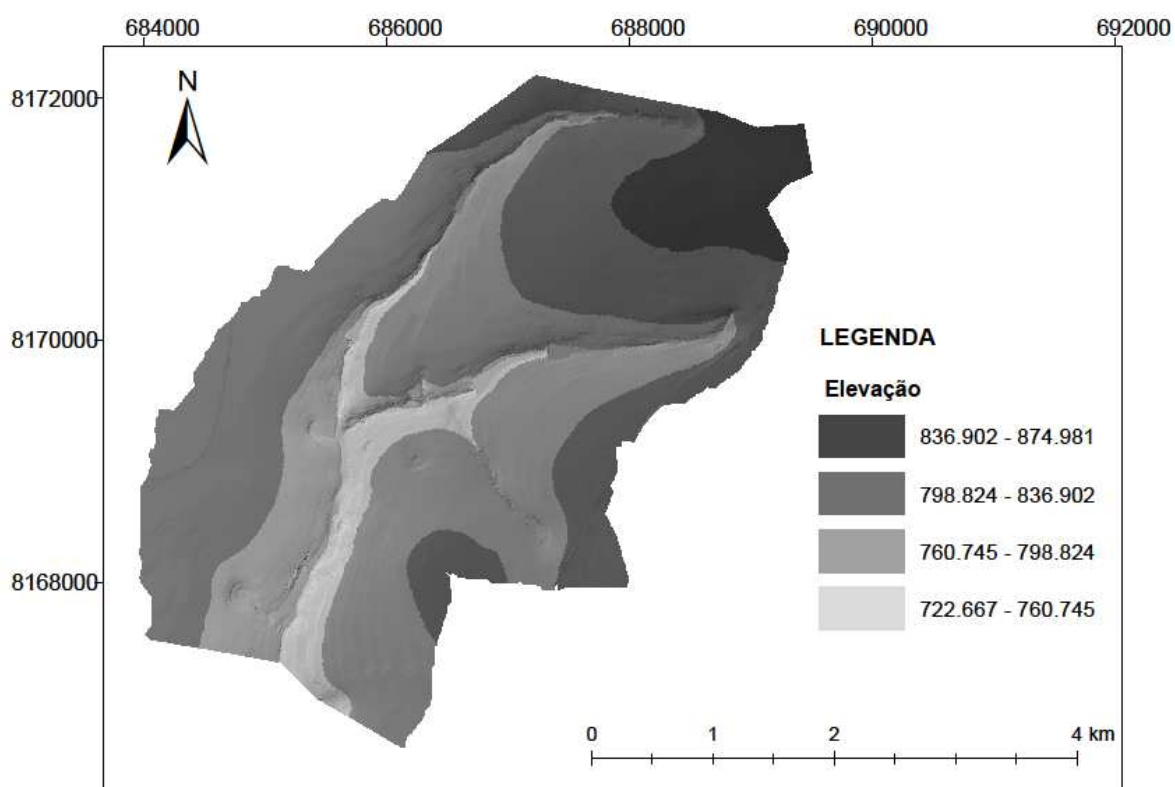


Figura 4.12 - Representação do modelo digital de elevação do terreno para a bacia em estudo. Fonte: Elaborado pela autora.

O modelo digital de elevação do terreno utilizado é produto dos dados do Radar SRTM com resolução de 90 x 90 m interpolado para 30 x 30 m, extraído do Banco de Dados Geomorfométricos Brasileiro (TOPODATA). Ressalta-se que todos os dados físicos relativos à bacia hidrográfica do córrego Samambaia e da área de estudo utilizados neste trabalho, são resultados do processamento do modelo digital de elevação do terreno.

4.2.3 Caracterização física e uso e ocupação do solo

Os arquivos de parâmetros referentes à discretização espacial da área de estudo tiveram de ser montados e, para tanto, as características físicas e de cobertura superficial do solo tiveram de ser levantados. Esses dados são exigidos como dados de entrada do modelo.

4.2.3.1 Caracterização física

Variados aspectos derivados de (MDEs) possuem representatividade na análise do comportamento hidrológico. Entre eles, citam-se declividade, área de drenagem, comprimento e largura dos rios entre outros (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991). Assim, a complexidade inerente aos processos hidrológicos e a bacia hidrográfica cada vez mais abrem espaço para a adoção de técnicas de operação de SIGs (SMEDT et al., 2000).

Portanto, por meio do modelo digital de elevação do terreno foi realizado o levantamento dos parâmetros físicos da área de estudo, os mesmos encontram-se na Tabela 4.2. Os valores dos parâmetros físicos foram determinados para cada sub-plano definidos na discretização espacial.

Tabela 4.2 – Parâmetros físicos dos sub-planos e canais extraídos do MDE.

Parâmetros Físicos (Sub-planos)	Unidades
Área de drenagem	m ²
Declividade	m/m
Comprimento do escoamento	m
Largura do escoamento	m
Parâmetros Físicos (canais)	Unidades
Declividade	m/m
Comprimento	m
Largura	m

Fonte: Elaborado pela autora.

As larguras dos canais foram estimadas a partir das linhas de fluxos. Outro parâmetro físico necessário para a modelagem é o coeficiente de rugosidade de Manning para superfície permeável, impermeável e para o canal.

4.2.3.2 Uso e ocupação do solo

Os dados da cobertura superficial da área de estudo foram gerados com base na interpretação de imagens de satélite. Na ausência de uma imagem com boa resolução para a extração dos dados de cobertura superficial da área de estudo, foi gerada uma imagem adotando os seguintes passos:

1. Inicialmente foi criada uma malha quadriculada utilizando o *software* ET Geo Wizard, a mesma foi exportada para Google Earth (formato *kml*). Esta malha foi formada por quadriculados de pontos equidistantes 2000 metros na latitude e longitude, este quadriculado foi usado como guia no momento da obtenção das imagens. A altitude do ponto de visão para a captura das imagens no Google Earth versão cliente foi de 4,34 km, as imagens são datadas de março de 2012.
2. A imagem no formato *Grib* foi exportada para o *software* ArcGis, onde foi realizado o tratamento de contraste e realce.
3. Em seguida, realizou-se o registro da imagem, utilizando a malha criada no *software* ET Geo Wizard no formato *kml*, os pontos de controles foram extraídos do Google Earth, correspondente à região da área de estudo.
4. Ao fim do processo, chegou-se a uma imagem com resolução de 10 metros aproximadamente. Posteriormente foi realizado o recorte da área de estudo e efetuada interpretação digital da imagem.

Para a interpretação digital da imagem foram estabelecidas cinco chaves interpretativas, que se converteram nas categorias de cobertura superficial do terreno. As cinco chaves estão descritas na Tabela 4.3. O critério de classificação e edição vetorial dos polígonos seguiu a observação dos diferentes padrões de aglomerados urbanos, tamanho, forma, textura e o tipo de uso e ocupação do solo.

Os parâmetros da cobertura vegetal foram obtidos através da imagem gerada, tomando como base as classes temáticas selecionadas para a caracterização do uso e ocupação do solo, estes parâmetros são:

- Porcentagem de área permeável;

- Porcentagem de área impermeável.

Tabela 4.3 - Classes utilizadas para análise da cobertura superficial da área de estudo.

Classes Temáticas
1 - Edificações com muitas superfícies livres: zonas residenciais com construções esparsas com cerca de 30% de impermeabilização.
2 - Zonas industriais e comerciais: áreas industriais e barracões de comércios com cerca de 72% de impermeabilização.
3 - Campo e áreas verdes: parques, jardins, campos de esportes, áreas cultivadas e áreas com gramados.
4 - Zonas florestais e vegetação densa: área com vegetação de porte arbóreo natural ou reflorestado em boas condições.
5 - Corpos d'água: lagos artificial ou natural.

Fonte: Adaptado de TUCCI et al., 1995.

A Figura 4.13 mostra o resultado da análise do uso e ocupação do solo. A bacia hidrográfica do córrego Samambaia encontra-se em processo de urbanização, ocorre na região uma grande pressão para o parcelamento do solo para fins urbanos, por meio de loteamentos residenciais, como expõe o trabalho de Rocha (2013). O local selecionado para a aplicação do modelo apresenta características rurais, pouca área impermeabilizada e focos de urbanização, como pode ser visualizado na imagem abaixo.

O resultado da caracterização do uso e ocupação do solo foi de 96,14% de áreas permeáveis e 3,86% de áreas impermeáveis para toda a área de estudo. A cobertura de cada classe em quilômetros quadrados e a porcentagem de área em relação à área total da área de estudo são apresentadas na Tabela 4.4. Na Tabela 4.5 é possível visualizar a cobertura total de área impermeável e permeável em quilômetros quadrados e a porcentagem em relação à área total da área de estudo.

Tabela 4.4 - Ocupação do solo por quilômetro quadrado e porcentagem de área.

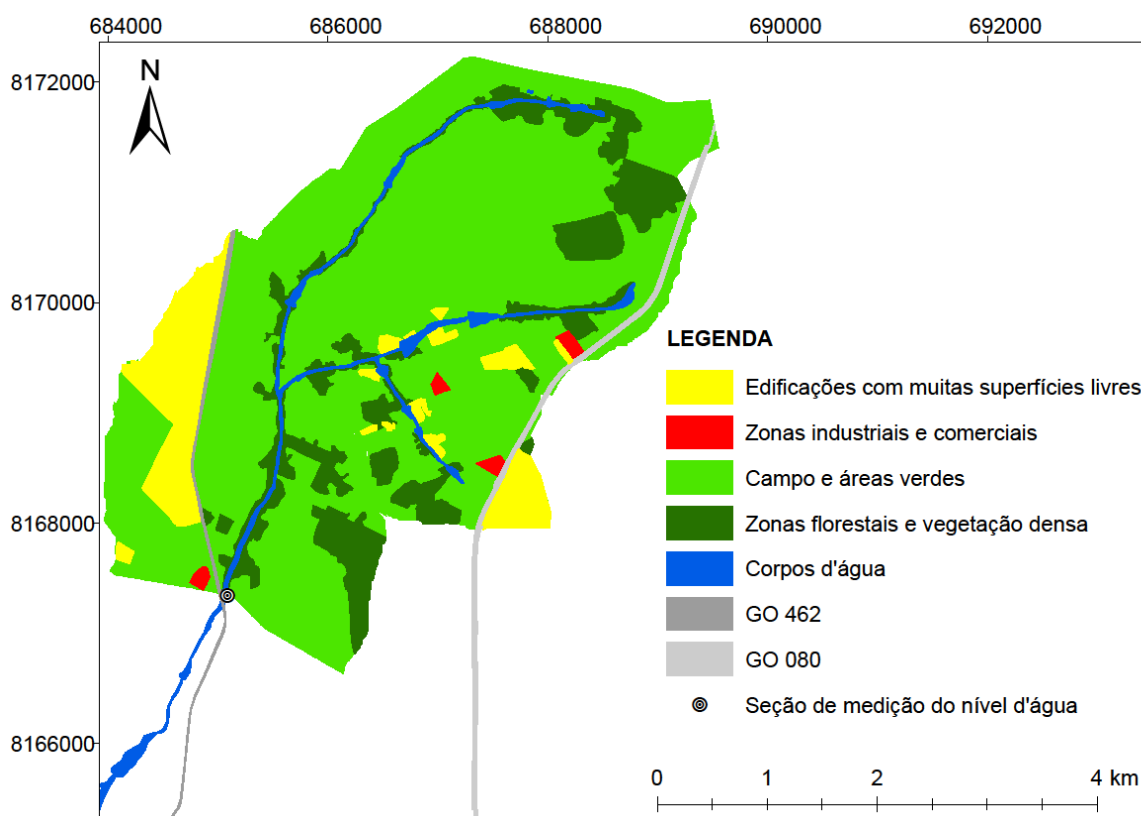
Classes	Área (km²)	Porcentagem (%)
1 - Edificações com muitas superfícies livres	1,71	9,69
2 - Zonas industriais e comerciais	0,10	0,56
3 - Campo e áreas verdes	12,43	70,34
4 - Zonas florestais e vegetação densa	2,56	14,48
5 - Corpos d'água	0,38	2,16
Área Total	17,67	100,00

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.5 - Cobertura total de área impermeável e permeável e porcentagem de área.

Área	Área (km ²)	Porcentagem (%)
Impermeável	0,68	3,86
Permeável	16,98	96,14
Área Total	17,67	100,00

Fonte: Elaborado pela autora.

**Figura 4.13** – Mapa de uso e ocupação do solo da área de estudo.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.4 Medição da precipitação e da vazão

A bacia hidrográfica do córrego Samambaia conta com uma rede de monitoramento composta por quatro pluviógrafos e dois linígrafos. A instalação dos pluviógrafos *HOBO Data Logging Rain Gauge*, modelo RG3-M, marca Onset, foi realizada considerando além de uma cobertura razoável sobre a bacia, a disponibilidade de locais que oferecessem acessibilidade e segurança. Foram priorizados locais onde houvesse o mínimo possível de interferências, destacando que se trata de uma área extensa e predominantemente rural, e que, devido à disponibilidade de recursos humanos e financeiros, os locais deveriam também

possibilitar acesso menos dificultado para que houvesse uma razoável frequência na coleta de dados.

Os pluviógrafos (Figura 4.14) instalados são do tipo báscula, ou seja, são constituídos de cubas basculantes, em que a água recolhida  dirigida para um conjunto de duas cubas articuladas por um eixo central. A gua  dirigida inicialmente para uma das cubas e quando esta cuba recebe uma quantidade de água a cuba cheia esvazia e a cuba vazia começa a receber gua. Cada movimento das cubas basculantes equivale a uma altura precipitada e o aparelho registra o número de movimentos e o tempo em que ocorre cada movimento (SEIBT, 2013).

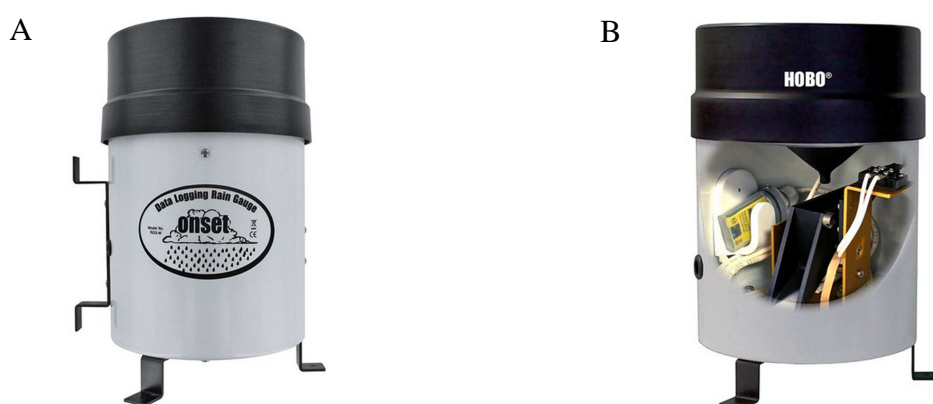


Figura 4.14 - Pluviógrafo utilizado para monitoramento da precipitação: (A) *HOBO Data Logging Rain Gauge*; (B) Interior do pluviógrafo *HOBO Data Logging Rain Gauge*. (Fonte: Onset).

Foi empregado o método proposto por Barbalho (2012) para a especializao e o cálculo da precipitação média sobre área de estudo. O método emprega as superfícies quádricas para interpolao de dados pontuais e foi desenvolvido inicialmente por Hardy (1971) para aplicao em ciências geofísicas. Posteriormente, Shaw e Lynn (1972) aplicaram a técnica para ajuste de superfícies com dados de precipitação, apontando a mesma como uma boa alternativa.

De forma geral, admite-se que a superfície formada pela precipitação pode ser encontrada pela superposio de diversas superfícies quádricas individuais com origem nos distintos pontos de observação. Essas superfícies individuais podem ser de natureza parabólica (Equao 4.43) ou hiperbólica (Equao 4.44):

$$P(x, y) = \sum_j^N c_j [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2] \quad (4.43)$$

$$P(x, y) = \sum_j^N c_j [(x - x_i)^2 + (y - y_i) + q^2]^{1/2} \quad (4.44)$$

onde c_j representam os coeficientes de ponderação de cada estação.

No caso particular das superfícies hiperbólicas, com $q = 0$, as mesmas representam cones, e este será o método empregado neste trabalho, já que têm um ajuste mais suave e uma implementação mais simples (LEE et al., 1974). Este aspecto é importante ao se considerar que nos casos práticos, pode haver necessidade de algumas extrapolações ou mesmo a existência de “vazios” na área interna da rede de monitoramento.

Os valores dos coeficientes de ponderação de cada posto podem ser encontrados pela solução de um sistema, empregando-se os dados conhecidos. Como os demais métodos de interpolação, a existência de uma quantidade de postos significativa próximos aos limites da bacia permite uma melhor interpolação interna (BALASCIO, 2001). A configuração simplificada do problema torna-se:

$$\underline{L}\underline{c} = \underline{P} \quad (4.45)$$

sendo que \underline{c} representa um vetor com N coeficientes de ponderação, \underline{z} é o vetor composto pelos N valores observados em questão e $\underline{L} = \{l_{ij}\}$ é uma matriz $N \times N$ da seguinte equação:

$$l_{ij} = [(x - x_i)^2 + (y - y_i) + q^2]^{1/2} \quad (4.46)$$

No caso da opção pelas equações cônicas, observa-se que essa matriz é simétrica em torno da diagonal principal e que seus valores dependem unicamente da posição dos postos empregados. Pode também ser usado um número maior de pontos observados no ajuste dos coeficientes. Em decorrência, o sistema terá mais equações do que incógnitas e deverá ser resolvido por meio de técnicas numéricas. A Figura 4.15 ilustra o conceito empregado pelo modelo de forma simplificada.

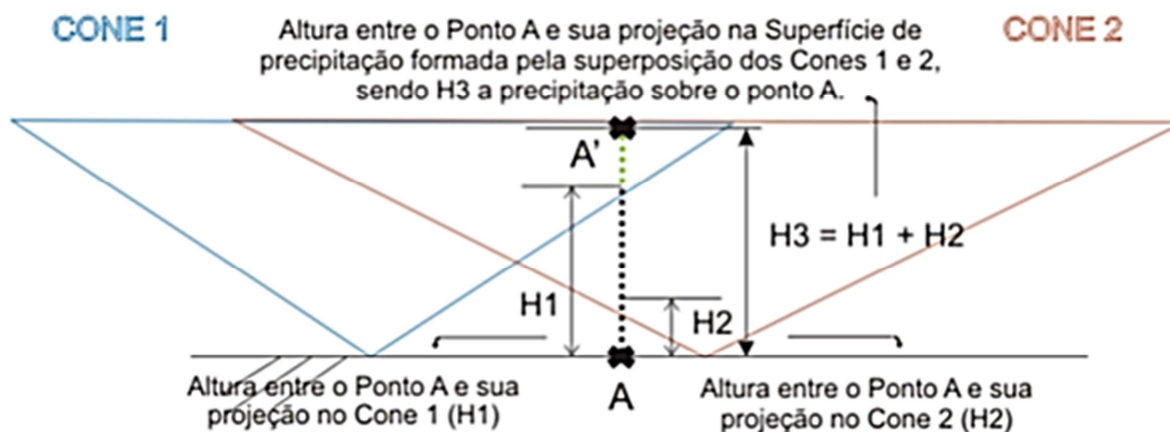


Figura 4.15 - Representação esquemática da superposição de superfícies cônicas para formação da superfície de precipitação. Fonte: BARBALHO, 2012.

O método proposto por Barbalho (2012) foi implementado em ambiente de programação MATLAB, para a determinação da precipitação média sobre a área de estudo.

Para o monitoramento da vazão de escoamento superficial foram utilizados linígrafos, *HOBO U20 Titanium Water Level Data Logger*, modelo U20 001-01-TI, marca Onset (Figura 4.16). Os aparelhos são produzidos em aço titânio com peso aproximado de 140g e dimensão de 15 cm de comprimento com diâmetro de 2,46 cm. São projetados para operação em uma faixa de 0 até 207 KPa de pressão, com equivalência aproximada de 0 até 12 m de profundidade em água doce, numa faixa de altitude de até 3000 m. Sua precisão na medição do nível de água é de 0,5 cm e tem resposta de tempo termal com aproximadamente 10 minutos na água para ativar a completa compensação do sensor de pressão com relação à temperatura.

Os dados relativos à precipitação e à vazão foram armazenados no “data logger”, que foi configurado para realizar uma leitura a cada intervalo de 1 minutos. Utilizou-se o software comercial *HOBOWare* para realizar a leitura dos dados armazenados. Foram registrados os eventos durante o período de fevereiro a maio de 2013, período chuvoso na região.

Um trecho de 50 metros do canal do córrego Samambaia, que consiste em um canal natural, foi selecionado para o monitoramento, onde foram posicionados dois linígrafos, um a montante e outro a jusante do trecho. Enquanto o linígrafo localizado a montante realiza a leitura dos dados de montante, o linígrafo a jusante armazena dados para a calibração do modelo hidrodinâmico que foi utilizado para a obtenção da vazão. O trecho escolhido está localizado próximo à rodovia GO-462, que liga a capital Goiânia ao município de Nerópolis.

Os dados obtidos foram tratados para a separação e identificação dos principais eventos chuvosos ocorridos durante todo o período de monitoramento.



Figura 4.16 - Monitoramento da vazão: (A) *HOB0 U20 Titanium Water Level Data Logger - U20 001-01-TI*; (B) medida do linígrafo. Fonte: Elaborado pela autora.

O cálculo da vazão de escoamento superficial ocorreu por meio de um modelo hidrodinâmico calibrado para o local. O modelo hidrodinâmico utilizado foi desenvolvido por Oliveira (2012), que empregou o esquema implícito de Preissmann, que permite o emprego de uma relação entre vazão x lâmina d'água para definição da condição de contorno montante. Isto possibilitou o uso de limnograma ao invés do hidrograma como condições de contorno a montante, somente o limnograma foi utilizado para condição de contorno a montante.

O processo de calibração do modelo hidrodinâmico e o cálculo da vazão foram realizados no trabalho de Rios e Formiga (2013), portanto, os referidos dados de vazão foram utilizados no presente trabalho.

A Figura 4.17 ilustra a distribuição espacial dos equipamentos, bem como algumas fotografias da localidade onde estes estão instalados. Na Tabela 4.6, encontram-se algumas informações dos pluviógrafos e linígrafos, equipamentos que fazem parte da rede de monitoramento instalada na bacia do córrego Samambaia.

Tabela 4.6 – Informações sobre os equipamentos que compõem a rede de monitoramento da bacia hidrográfica do córrego Samambaia (continua).

Identificação	Coordenadas (UTM)		Data de Instalação	Localização
	Longitude	Latitude		
Pluv-01	685761,15 E	8165983,93 S	13/12/2012	Subestação de Energia Xavante (CELG)

Tabela 4.6 – Informações sobre os equipamentos que compõem a rede de monitoramento da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.

Identificação	Coordenadas (UTM)		Data de Instalação	Localização
	Longitude	Latitude		
Pluv-02	682345,55 E	8166845,78 S	06/11/2012	Escola Mun. Prof. Cleonice M. Wolney
Pluv-03	684697,71 E	8169525,40 S	06/11/2012	Escola Mun. Orlando de Moraes
Pluv-04	686640,48 E	8168232,78 S	06/11/2012	Chácara Bom Retiro
Linígrafo (montante)	685018,74 E	8167278,59 S	09/02/2013	Rodovia GO-462
Linígrafo (jusante)	684976,32 E	8167251,41 S	09/02/2013	Rodovia GO-462

Fonte: Elaborado pela autora.

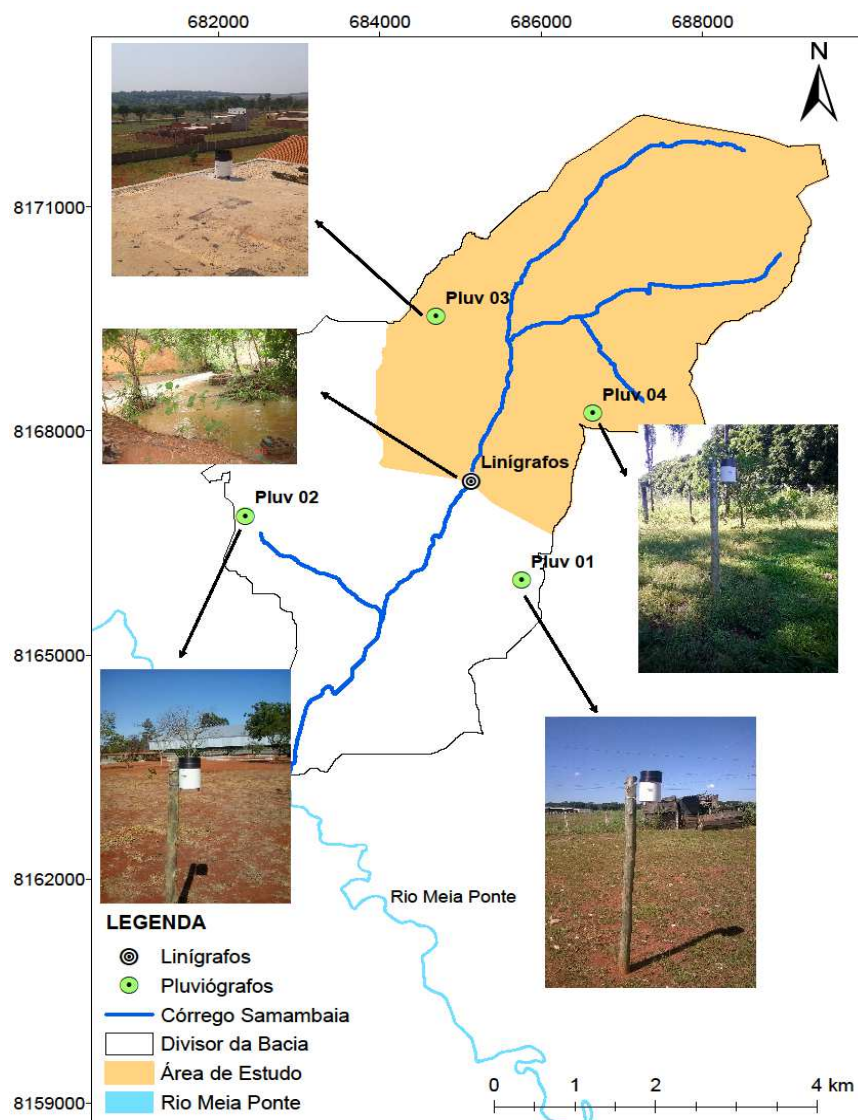


Figura 4.17 - Rede de monitoramento da bacia hidrográfica do córrego Samambaia.

Fonte: Elaborado pela autora.

Nas Figuras 4.18 a 4.22, apresentam-se os hidrogramas e hietogramas observados na área de estudo, tendo sido observados cinco eventos de escoamento superficial, sendo eles denominados de evento 8, 9, 10, 16 e 17.

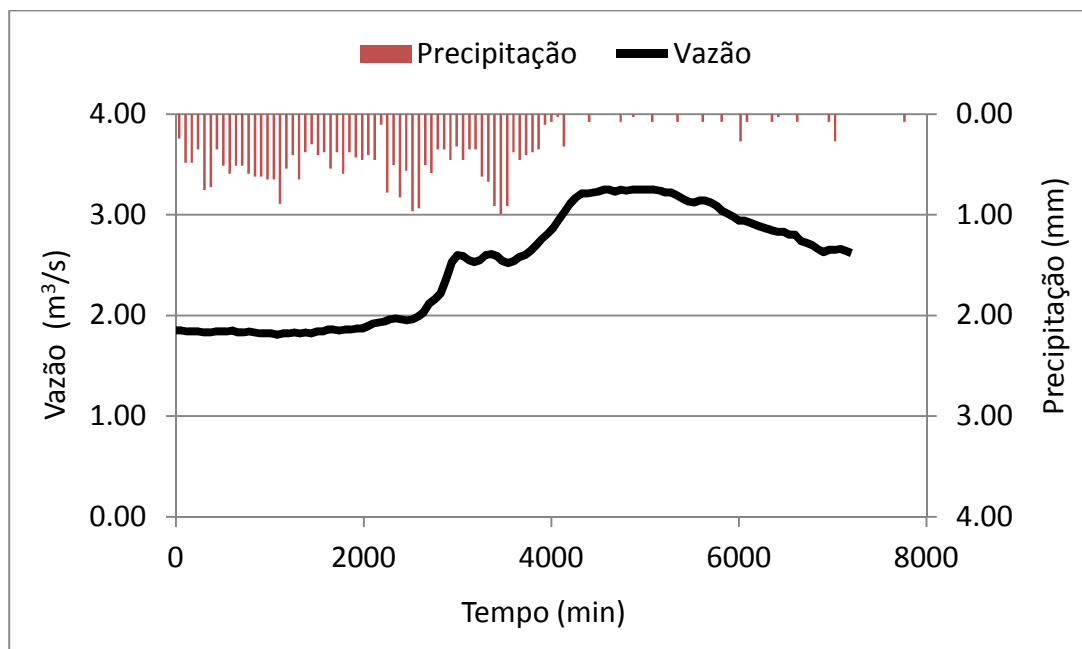


Figura 4.18 – Evento 8 ocorrido no dia 23/03/2013.

Fonte: Elaborado pela autora.

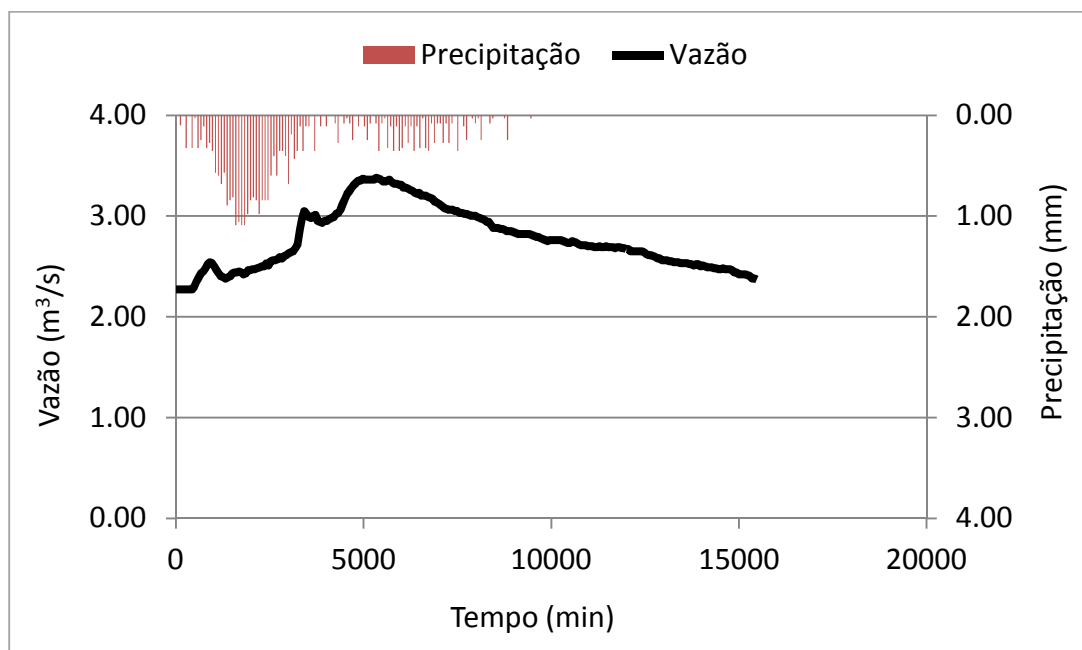


Figura 4.19 - Evento 9 ocorrido no dia 25/03/2013.

Fonte: Elaborado pela autora.

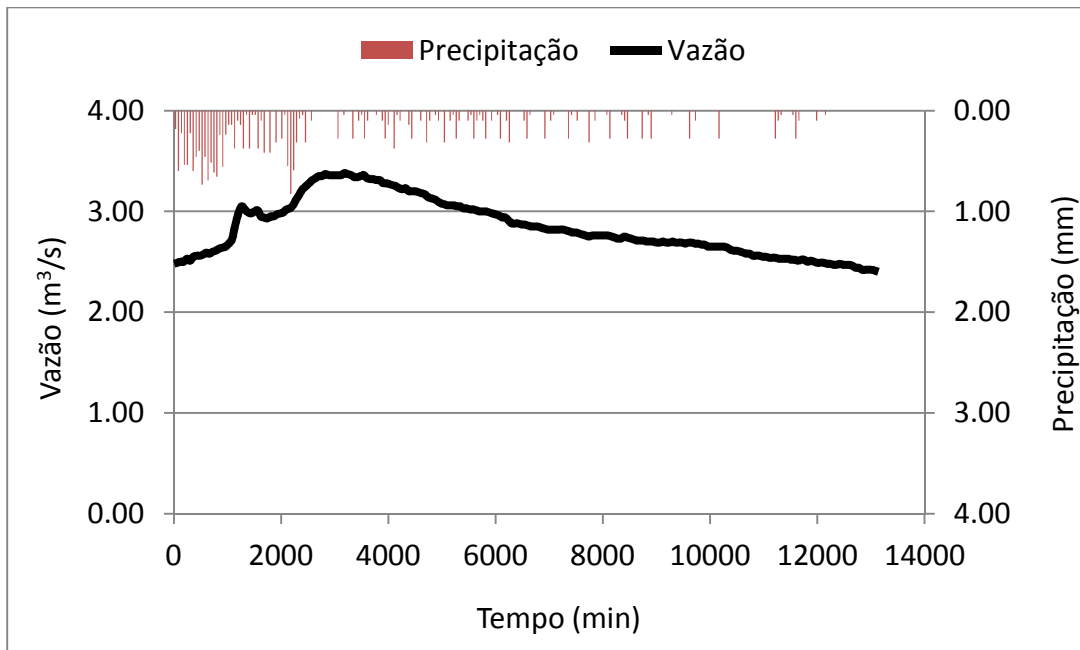


Figura 4.20 - Evento 10 ocorrido no dia 26/03/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

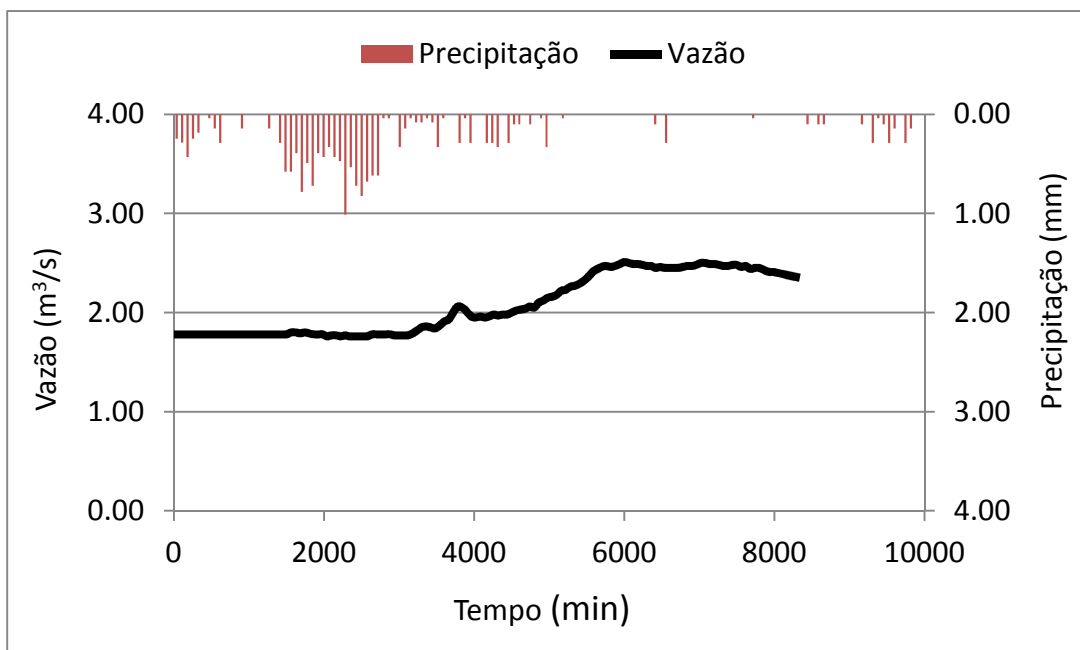


Figura 4.21 – Evento 16 ocorrido no dia 10/04/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

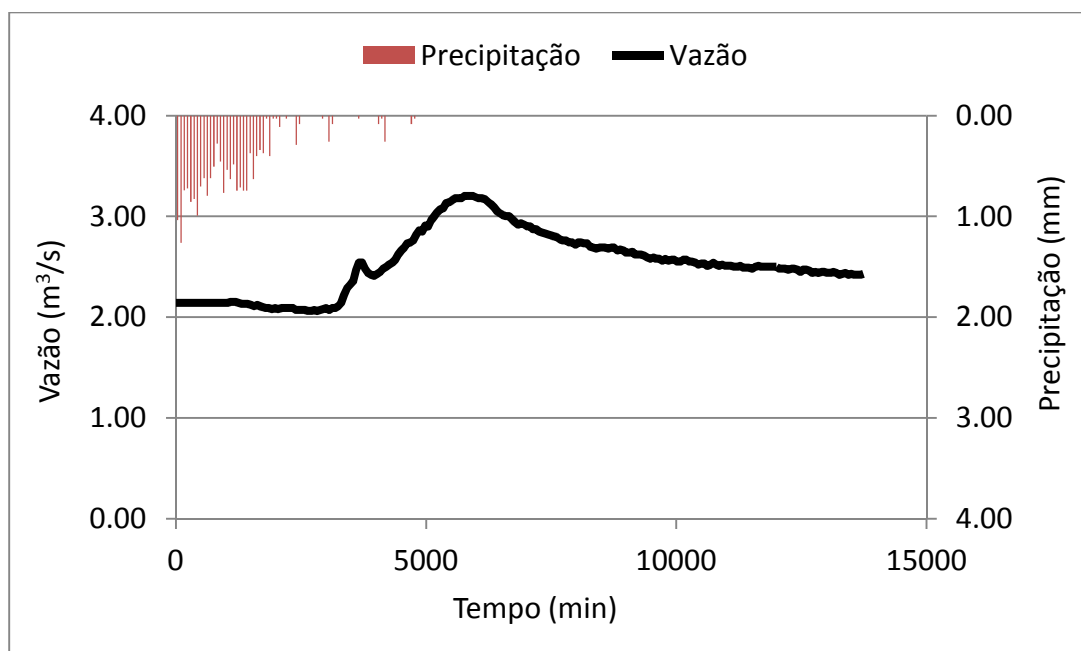


Figura 4.22 - Evento 17 ocorrido no dia 11/04/2013.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.5 Calibração do modelo

Segundo Beckers et al. (2009), existem diversos procedimentos para a calibração como a simulação de Monte Carlo, GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) e SCE (*Shuffled Complex Evolution*). Há, também, outros métodos utilizados para a calibração como o NSGA – II (*Elitist Non-dominated Sorting Genetic*), um método multi-objetivo proposto por Deb et al. (2000), uma variante do NSGA convencional. No presente trabalho foi empregado o método multi-objetivo NSGA-II para a calibração do modelo.

A seguir será apresentada uma descrição detalhado do método.

4.2.5.1 NSGA-II (*Elitist Non-dominated Sorting Genetic*)

O NSGA-II, proposto por Deb et al. (2000), é um algoritmo que emprega alguns conceitos do NSGA convencional (SRINIVAS; DEB, 1994), no entanto, emprega o conceito de elitismo. O conceito de elitismo foi introduzido ao algoritmo por Deb et al. (2000) com o intuito de diminuir a complexidade computacional na classificação não-dominada e eliminar a subjetividade na atribuição do parâmetro de compartilhamento.

O método NSGA-II trabalha com duas populações distintas, mas com o mesmo número de indivíduos (P), uma população descendente (δ) que é obtida mediante a aplicação dos operadores dos Algoritmos Genéticos (AGs). A segunda população de elite (Λ) é formada pelos melhores indivíduos da geração anterior.

O método inicia com a geração de uma população inicial (Λ_0). Essa população é então dividida em diferentes níveis ou fronteiras de não-dominância (Γ_i). A aptidão de cada indivíduo será igual ao valor da frente na qual ele está localizado, conforme a Figura 4.23. Assim, 1 significa o melhor nível. Depois de avaliar (Λ_0) aplicam-se os operadores de seleção por torneio, cruzamento (*crossover*) e mutação, gerando-se a população “filha” (δ_0).

Uma terceira população (Ψ_0) é criada como sendo:

$$\Psi_0 = \Lambda_0 \cup \delta_0 \quad (4.47)$$

onde $|\Psi_0| = 2P$. Para as demais gerações, o NSGA II efetua as ordenações das soluções considerando (Ψ_0) conforme a disposição das soluções nas diversas frentes (Γ_i).

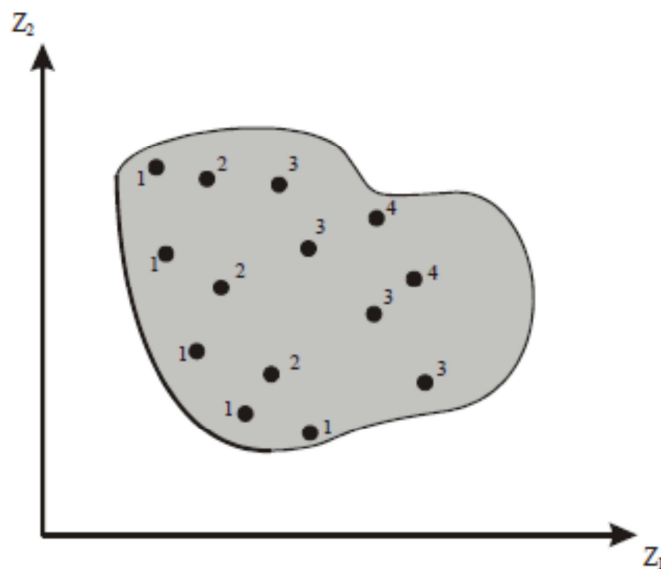


Figura 4.23 - Ordenação do método NSGA-II.
Fonte: FORMIGA, 2005.

O próximo passo é a construção da população geradora (Λ_{n+1}). Como apenas (P) soluções podem compor (Λ_{n+1}), (P) soluções de (Ψ_p) serão descartadas. O preenchimento de

(Ψ_p) é feito inicialmente com as alternativas pertencentes à (Γ_1) . Segue-se o preenchimento com (Γ_2) . Os conjuntos de soluções (Γ_i) são inseridos na sua totalidade até que:

$$\sum_{j=1}^i |\Gamma_j| \leq P \quad (4.48)$$

Ao se inserir uma frente que não atenda a Equação 4.48, o algoritmo NSGA-II escolhe as soluções melhor distribuídas, empregando-se um critério denominado de distância de aglomeração ou multidão. A distância de aglomeração ou multidão é calculada para cada solução como sendo o meio perímetro do cubóide

A distância de aglomeração ou multidão (d_a) de uma solução reflete a densidade de alternativas localizadas à sua volta, e será igual ao perímetro do cubóide no espaço das funções objetivo que envolveu na solução (i) (Figura 4.24). Este cubóide tem em seus vértices as soluções mais próximas de sua vizinhança. Os elementos que tiverem os maiores e menores valores para alguma função objetivo terão sua distância de aglomeração igual à (∞) .

A distância de aglomeração facilita a escolha das soluções mais dispersas numa mesma frente, assegurando a diversidade das soluções (SHINMA, 2011).

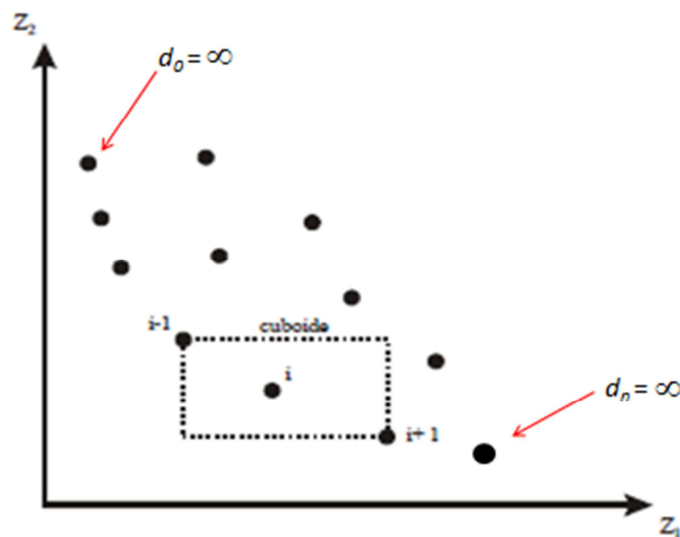


Figura 4.24 - Esquema da definição de distância de multidão.
Fonte: Adaptado de FORMIGA, 2005.

Tendo a população (Λ_{n+1}) sido definida, procede-se uma seleção para a geração de (δ_0) . A seleção, de acordo com esta metodologia, é efetuada através da seleção por torneio de

multidão. Esse torneio consiste na comparação de duas soluções e é realizado considerando que cada solução (i) possui dois atributos:

- Ranking de não-dominância (Γ_i) ;
- Distância de aglomeração (da_i) .

Baseado nesses dois atributos é realizado o torneio de seleção em que um candidato (i) vence um candidato (j) se:

- A solução (i) numa frente (Γ_i) for menor (no caso de minimização) do que a solução (j) ;
- Se as duas possuem o mesmo *ranking*, mas a solução (i) tem um valor de (da_i) maior do que da solução (j) .

Excetuando-se o passo inicial, descrito acima, o método NSGA-II pode ser escrito seguindo-se a Figura 4.25.

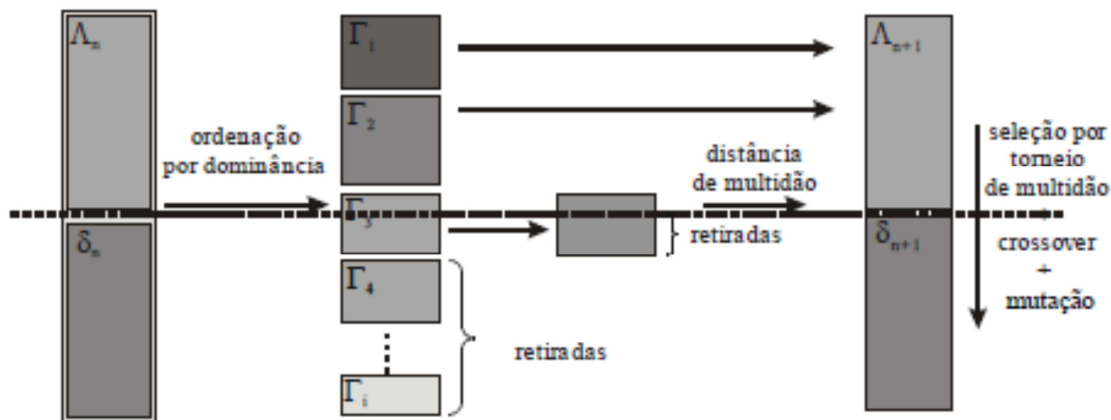


Figura 4.25 - Esquema do método NSGA-II. Fonte: Adaptado de DEB, 2001.

4.2.5.2 Dados utilizados na calibração

Neste trabalho empregou-se o *Toolbox Global Optimization* da Plataforma MATLAB como ferramenta para a calibração. Este *toolbox* apresenta diversos métodos de busca, dentre eles, o NSGA - II.

Para a calibração do modelo foram adotadas as seguintes especificações:

- Tamanho da população: 400;
- Número de Gerações: 100;
- Tipo de Seleção: torneio de 3 participantes;
- Tipo de mutação: uniforme;
- Taxa de mutação: 0,01;
- Tipo de recombinação: dois pontos;
- Crossover Fração: 0,8.

4.2.5.3 Funções objetivo

Na calibração, foram utilizados os eventos 8, 9 e 10, enquanto os demais eventos foram utilizados na validação dos dados observados. As funções objetivo adotadas foram definidas como sendo o coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe (1970) para os três eventos citados a cima, a fim de se avaliar o desempenho do modelo. Assim tem-se:

$$FO1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (Qobs_{i,8} - Qsim_{i,8})^2}{\sum_{i=1}^t (Qobs_{i,8} - \overline{Qobs_8})^2} \quad (4.49)$$

$$FO2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (Qobs_{i,9} - Qsim_{i,9})^2}{\sum_{i=1}^t (Qobs_{i,9} - \overline{Qobs_9})^2} \quad (4.50)$$

$$FO3 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (Qobs_{i,10} - Qsim_{i,10})^2}{\sum_{i=1}^t (Qobs_{i,10} - \overline{Qobs_{10}})^2} \quad (4.51)$$

sendo,

$Qobs_{i,x}$: vazão observada, no tempo (i) para o evento (x), $m^3 \cdot s^{-1}$;

$Qsim_{i,x}$: vazão simulada, no tempo (i) para o evento (x), $m^3 \cdot s^{-1}$;

$Q_{obs_m\u00e9dio}$: vaz\u00e3o m\u00e9dia para o evento (x), em $m^3.s^{-1}$;

t : n\u00famero de previs\u00f5es avaliadas.

Uma avalia\u00e7\u00e3o proposta por Moriasi et al. (2007) determinou quatro n\u00edveis de desempenho do coeficiente eNS para avalia\u00e7\u00e3o dos modelos hidrol\u00f3gicos, estes n\u00edveis variam de insatisfat\u00f3rio, satisfat\u00f3rio, bom e muito bom, conforme a Tabela 4.7. Estes n\u00edveis foram tomados como base para a avalia\u00e7\u00e3o dos resultados do modelo desenvolvido.

Tabela 4.7 – Avalia\u00e7\u00e3o do desempenho de modelos pelo coeficiente eNS.

Avalia\u00e7\u00e3o de desempenho	eNS
Muito bom	$0,75 < eNS < 1,00$
Bom	$0,65 < eNS \leq 0,75$
Satisfat\u00f3rio	$0,50 < eNS \leq 0,65$
Insatisfat\u00f3rio	$eNS \leq 0,50$

Fonte: Moriasi et al., 2007.

4.2.5.4 Vari\u00e1veis de decis\u00e3o

A calibra\u00e7\u00e3o \u00e9 um processo de otimiza\u00e7\u00e3o no qual as vari\u00e1veis de decis\u00e3o s\u00e3o os par\u00e2metros os quais o modelo possui maior sensibilidade. Portanto, devem ser ajustados de modo a encontrar uma boa concord\u00e2ncia entre os valores simulados e os valores observados em campo.

Na Tabela 4.8 s\u00e3o apresentados os par\u00e2metros e a faixa de varia\u00e7\u00e3o dos valores utilizados na calibra\u00e7\u00e3o do modelo. Os par\u00e2metros e a faixa de varia\u00e7\u00e3o dos valores foram adotados de forma a considerar \u00e1 realidade peri-urbana da bacia hidrogr\u00e1fica do c\u00f3rrego Samambaia.

Tabela 4.8 – Vari\u00e1veis de decis\u00e3o e faixa de varia\u00e7\u00e3o dos valores.

Par\u00e2metros F\u00edsicos	S\u00edmbolos	Faixa de Varia\u00e7\u00e3o
Coefficiente de rugosidade Manning para \u00e1rea imperme\u00e1vel	NI	0,015 – 0,05
Coefficiente de rugosidade Manning para \u00e1rea perme\u00e1vel	NP	0,02 – 0,2
Coefficiente de rugosidade Manning para o canal	NC	0,01 – 0,2
Par\u00e2metros de Infiltra\u00e7\u00e3o (Horton modificado)	S\u00edmbolos	Varia\u00e7\u00e3o
Capacidade inicial de infiltra\u00e7\u00e3o (mm/h)	fo	50 - 300
Capacidade infiltra\u00e7\u00e3o final ou saturada (mm/h)	fc	1 - 50
Coefficiente de decaimento (h^{-1})	k	0,1 - 10

Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.6 Validação do modelo

A validação tem por objetivo avaliar a capacidade do modelo desenvolvido em gerar resultados próximos à realidade. No presente trabalho, a validação foi realizada por meio da simulação dos eventos monitorados na área de estudo. A verificação foi realizada através da inspeção visual entre os hidrogramas simulados e observados, e do coeficiente de eficiência Nash & Sutcliffe (eNS) obtido.

4.2.7 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é executada mudando o valor de um parâmetro, mantendo o restante inalterado e comparando o resultado em relação a uma condição padrão. Permite avaliar mudanças nos resultados decorrentes de possíveis alterações nos parâmetros de entrada (MARSHALL, 1999; FETT, 2000).

Para a área de estudo, os parâmetros avaliados na análise de sensibilidade foram os mesmos utilizados na calibração do modelo (Tabela 4.8). A variação no valor dos parâmetros foi de -50 a +50% de seu valor inicial, e sua influência sobre o modelo foi analisada em termos de variações nas três funções objetivo adotadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos durante a avaliação do modelo desenvolvido, na ordem em que foram realizados.

5.1 Calibração do modelo

O algoritmo NSGA- II foi executado com o total de 100 gerações para estimar o conjunto de solução de Pareto definido com relação aos seis variáveis de decisão do modelo (Tabela 4.8), produzindo 400 grupos de valores paramétricos não dominados, ou seja, que tem matematicamente o mesmo grau de importância. De acordo com Yapo et al. (1998), não é possível distinguir qualquer uma das soluções ótimas como sendo objetivamente a melhor dentre as outras, desta forma, não há unicamente uma melhor solução. Essa é a característica primordial do problema multiobjetivo, ou seja, a solução não irá, em geral, ser única. De fato, é comum ter várias soluções com a propriedade de que o movimento de uma solução para outra resulta no melhoramento de uma função objetivo, embora causando uma deterioração no valor de pelo menos outra função objetivo (YAPO et al., 1998).

Nas Figuras 5.1 a 5.3 encontra-se o comportamento das frentes de Pareto, nota-se que o algoritmo gerou um conjunto uniforme de soluções no espaço de Pareto para a maioria das funções objetivo adotadas, encontrando soluções próximas à região do máximo valor ótimo teórico (valores próximos a 1), sendo que na distribuição de frequência (Figuras 5.4 a 5.6), grande parcela dos valores ficou próximo a essa região, o que indica boa capacidade do modelo de se aproximar do ótimo individual. Pode-se ver também que as frentes apresentam-se bem preenchidas nesta região.

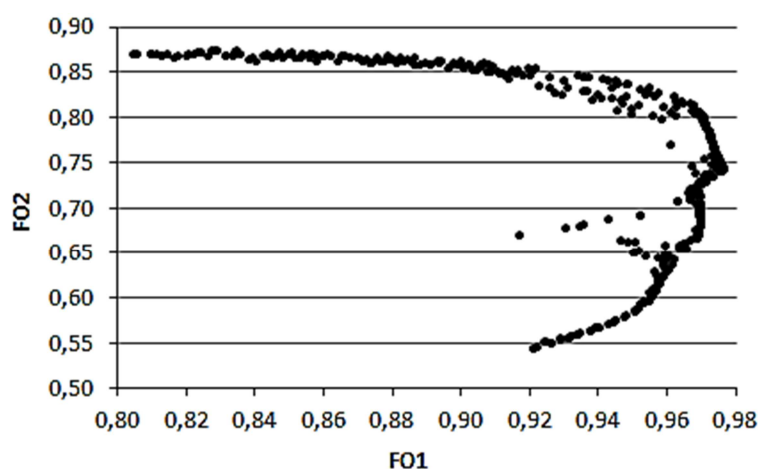


Figura 5.1 - Relação entre as funções objetivo FO1 e FO2 para o conjunto de soluções não dominadas. Fonte: Elaborado pela autora.

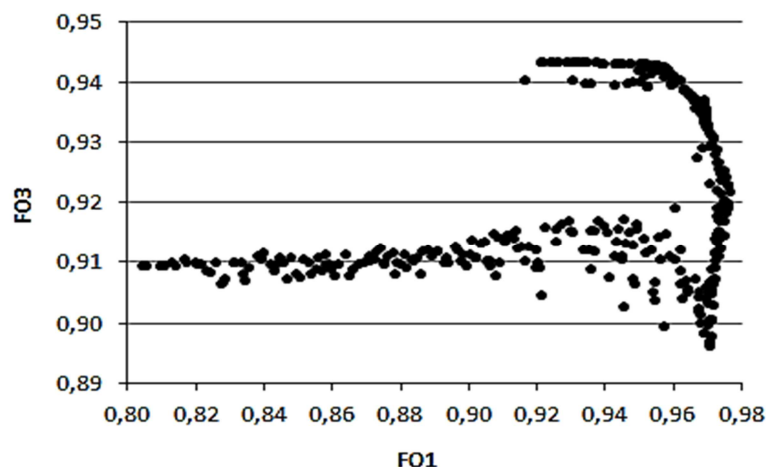


Figura 5.2 - Relação entre as funções objetivo FO1 e FO3 para o conjunto de soluções não dominadas. Fonte: Elaborado pela autora.

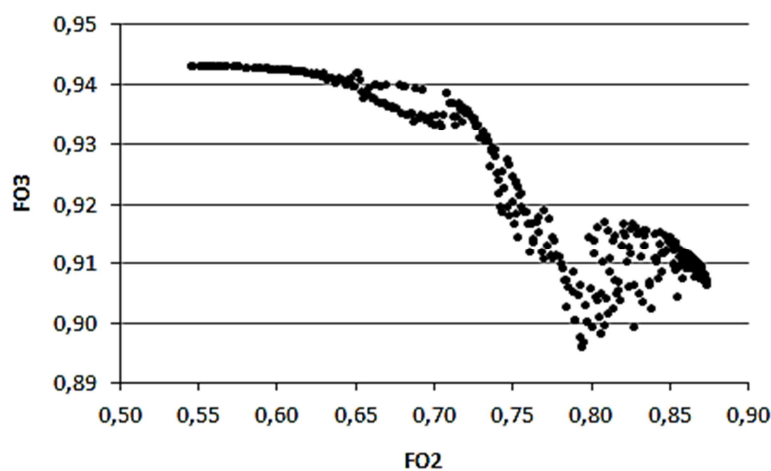


Figura 5.3 - Relação entre as funções objetivo FO2 e FO3 para o conjunto de soluções não dominadas. Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se a presença de parte dos valores para a função FO2 entre a faixa de 0,70 e 0,85, sendo um desempenho classificado como satisfatório por Moussa et al. (2007). Entretanto, Moriasi et al. (2007) afirmam que os resultados da calibração podem ser classificados como satisfatórios se os valores de eNS permearem entre 0,50 e 0,65 e muito bom se os valores ficarem entre 0,75 e 1,0. Shafii e De Smedt (2009) obtiveram no período de calibração, usando o algoritmo NSGA-II, coeficiente de eficiência Nash & Sutcliffe variando entre 0,69 e 0,76, o que consideraram um bom desempenho do modelo de simulação, em termos de valores de eNS. Desta forma, como boa parcela dos valores para a função FO2 e para as demais funções adotadas foram maiores que 0,50, pode-se afirmar que, para a calibração, o comportamento do modelo desenvolvido foi bom.

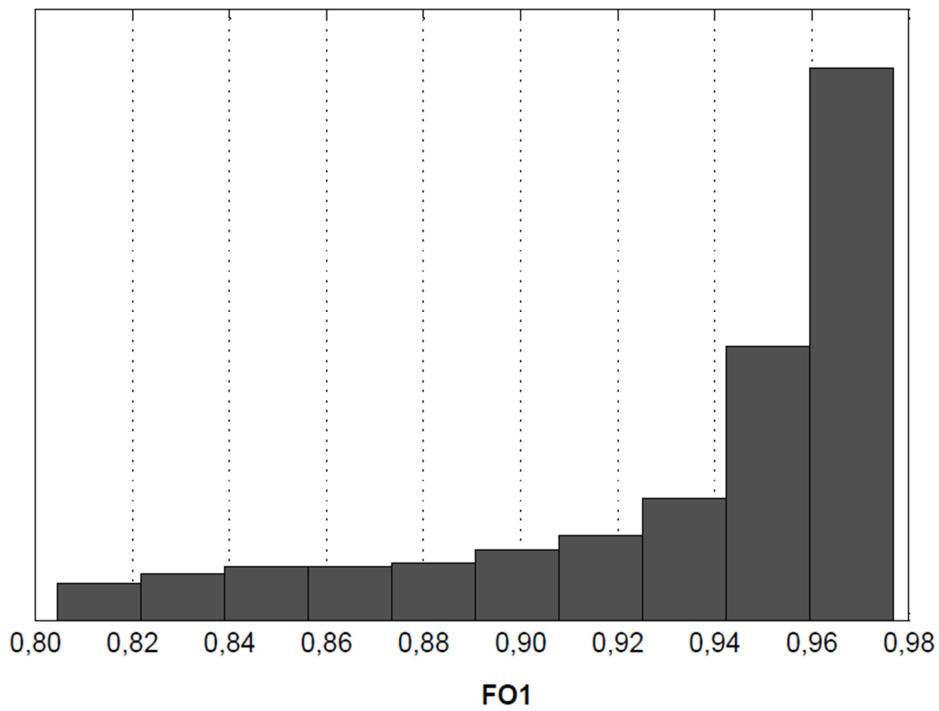


Figura 5.4 - Histograma de frequência da função objetivo FO1 para o conjunto de soluções de Pareto. Fonte: Elaborado pela autora.

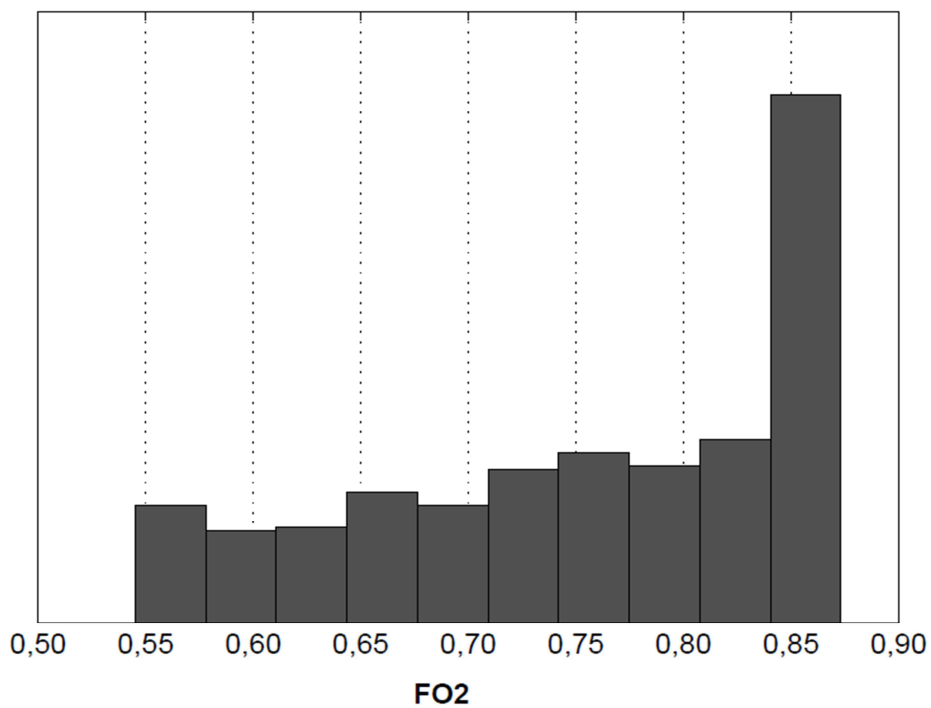


Figura 5.5 - Histograma de frequência da função objetivo FO2 para o conjunto de soluções de Pareto. Fonte: Elaborado pela autora.

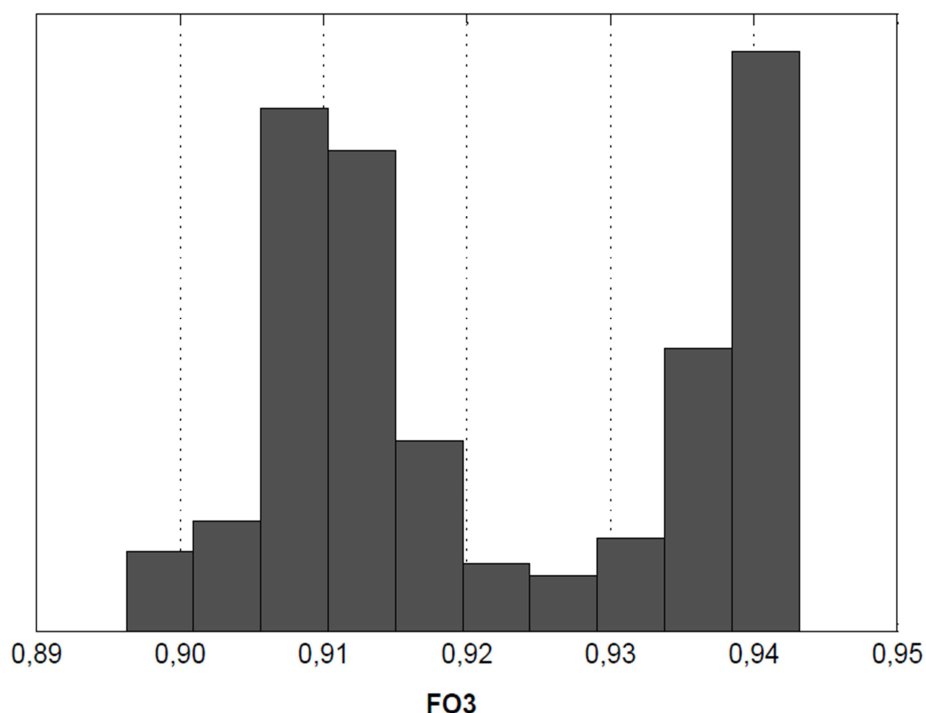


Figura 5.6 - Histograma de frequência da função objetivo FO3 para o conjunto de soluções de Pareto. Fonte: Elaborado pela autora.

O valor da rugosidade de Manning para a área impermeável (NI) apresentou uma maior prevalência em torno de 0,03, valor representativo para o cimento/asfalto, superfície comum para esta situação. Para a área permeável (NP) o valor médio ficou em torno de 0,07, que está associado a escoamento em solos cultivados. A rugosidade de Manning para o canal (NC) mostrou variação com valores entre 0,11 e 0,13, variação representativa para canais naturais. Os parâmetros de Horton mostrou variação média de 109,46 mm/h para a capacidade inicial de infiltração e de 20,86 mm/h para a capacidade de Infiltração final ou saturada. Esta faixa de valores para os coeficientes de Manning e para os parâmetros de Horton encontram-se próximos dos encontrados na literatura para locais semelhantes, conforme indicação da Tabela 5.1. São também condizentes com os intervalos para os valores dos parâmetros sugeridos pelo Manual do Usuário do SWMM (ROSSMAN, 2010). As Figuras 5.7 a 5.12 ilustram os histogramas de frequência para os valores dos parâmetros calibrados.

Observa-se na Tabela 5.1 e no histograma da Figura 5.11 que o parâmetro de Horton k apresenta uma variação anômala quando comparado aos valores encontrados na literatura, apresentando um valor bem abaixo do esperado. Isso pode estar relacionado ao tipo de solo de cada área, indicando que este parâmetro não é constante para cada tipo de solo.

A Tabela 5.2 expõe os coeficientes de correlação entre os parâmetros usados na calibração do modelo. Percebe-se que os parâmetros k e fo apresentam correlação negativa, ou seja, a variação do valor de k pode está relacionado ao fato de que valores maiores de fo podem implicar em valores menores de k .

Tabela 5.1 – Comparação dos valores dos parâmetros calibrados com os encontrados na literatura.

Parâmetros	Valor Médio Calibrado	Valores típicos Muleta e Nicklow (2004)	Valores obtidos Bastos (2007)	Valores típicos Rossman (2010)
NI	0,03	-	0,03	0,01 – 0,04
NP	0,07	0,05 – 0,30	0,16	0,10 – 0,80
fo (mm/h)	109,46	-	107,3	8 - 254
fc (mm/h)	20,86	-	4,14	2,5 - 120
k (h^{-1})	0,64	-	-	2 - 7
NC	0,12	0,01 – 0,15	0,13	0,04 – 0,10

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5.2 – Matriz de correlação para o conjunto de parâmetros.

Parâmetros	NI	NP	fo	fc	k	NC
NI	1	-0,32	0,17	0,03	-0,43	0,18
NP		1	-0,98	0,38	0,68	-0,98
fo			1	-0,44	-0,60	0,99
fc				1	-0,05	-0,37
k					1	-0,64
NC						1

Fonte: Elaborado pela autora.

Outro resultado importante observado na Tabela 5.2 é a correlação relativamente baixa entre a maioria dos parâmetros, entretanto, entre três parâmetros (NP, fo e NC) a correlação apresentou-se bastante forte. Isso pode indicar a possibilidade de uma maior simplificação do modelo, ou seja, uma combinação ainda menor de parâmetros poderia ser possível. Com base no princípio da parcimônia, sugere-se para trabalhos futuros a redução do número de parâmetros a serem calibrados. O princípio da parcimônia é a representação adequada do comportamento de um processo ou um sistema por um modelo com o menor número possível de parâmetros (TUCCI, 2005). Shinma (2011) afirma que esta abordagem considera a parametrização mais simples melhor do que as complexas, quando assegurado um bom ajuste. Especificamente na modelagem hidrológica, várias aplicações deste conceito já foram estudadas (Beven, 1989; Xiong e Guo, 1999; Lucas et al., 2009).

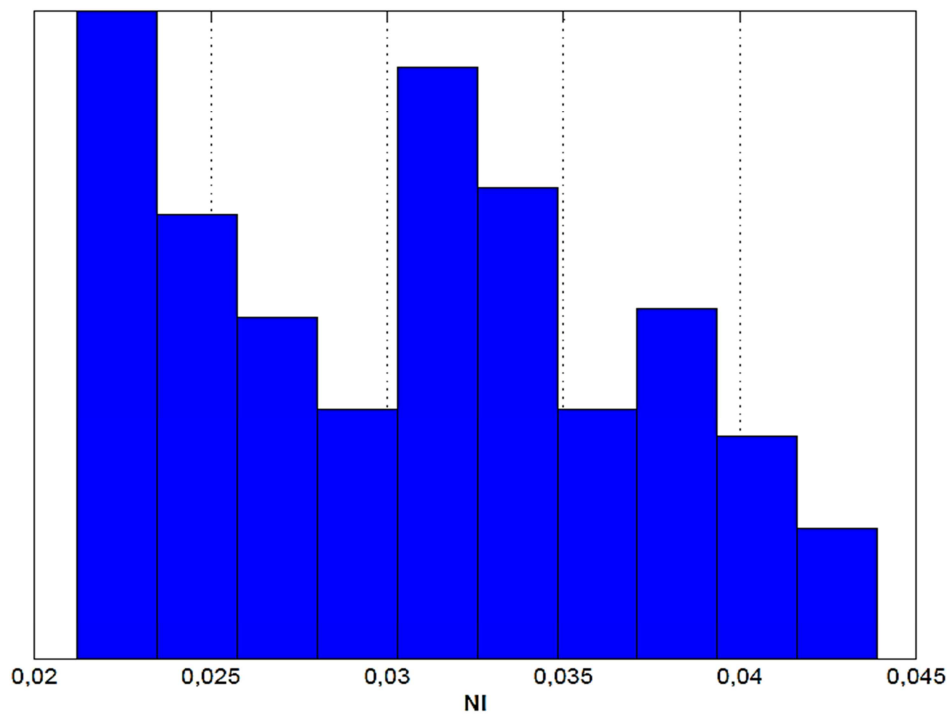


Figura 5.7 - Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro NI.
Fonte: Elaborado pela autora.

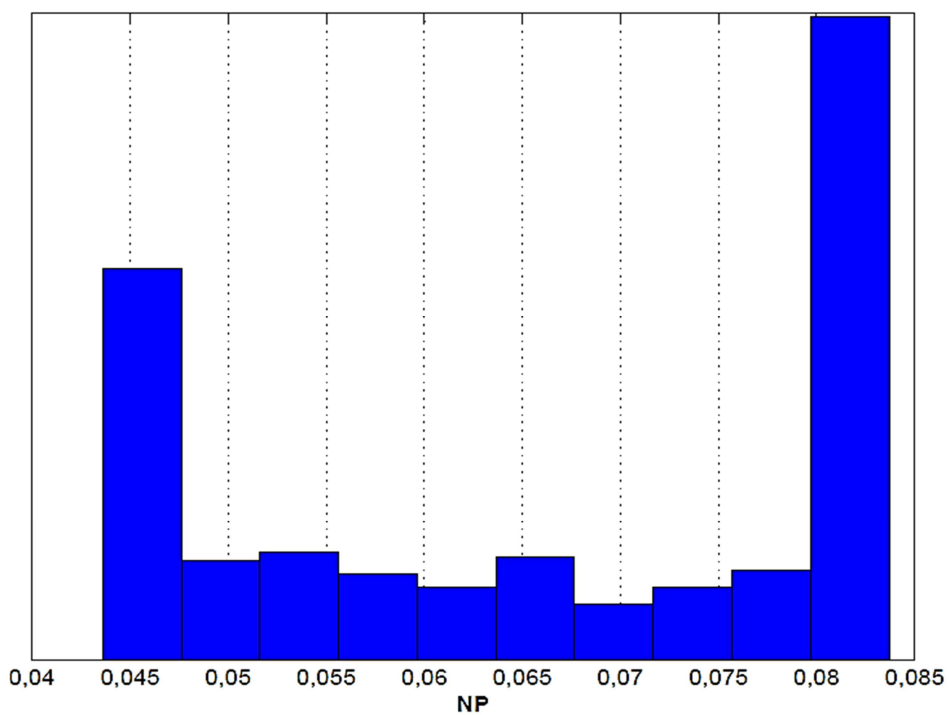


Figura 5.8 - Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro NP.
Fonte: Elaborado pela autora.

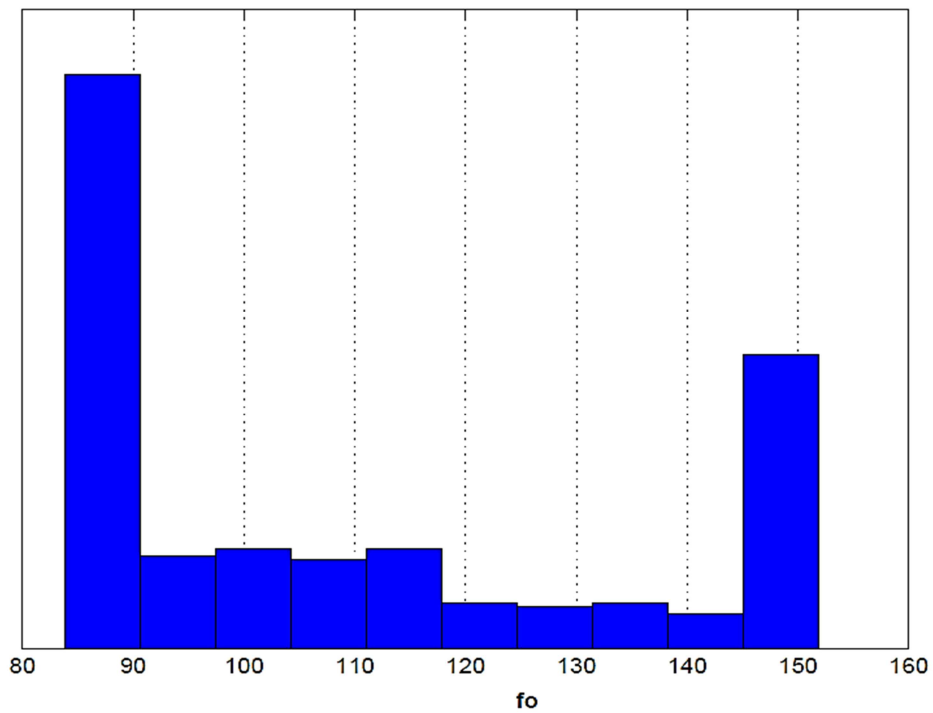


Figura 5.9 – Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro f_o .
Fonte: Elaborado pela autora.

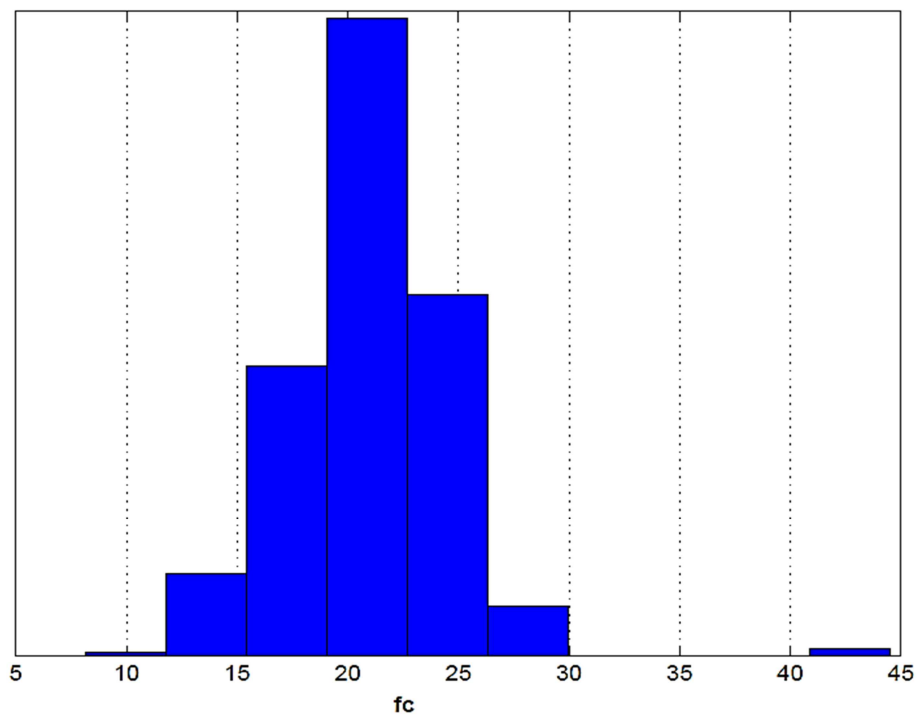


Figura 5.10 – Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro f_c .
Fonte: Elaborado pela autora.

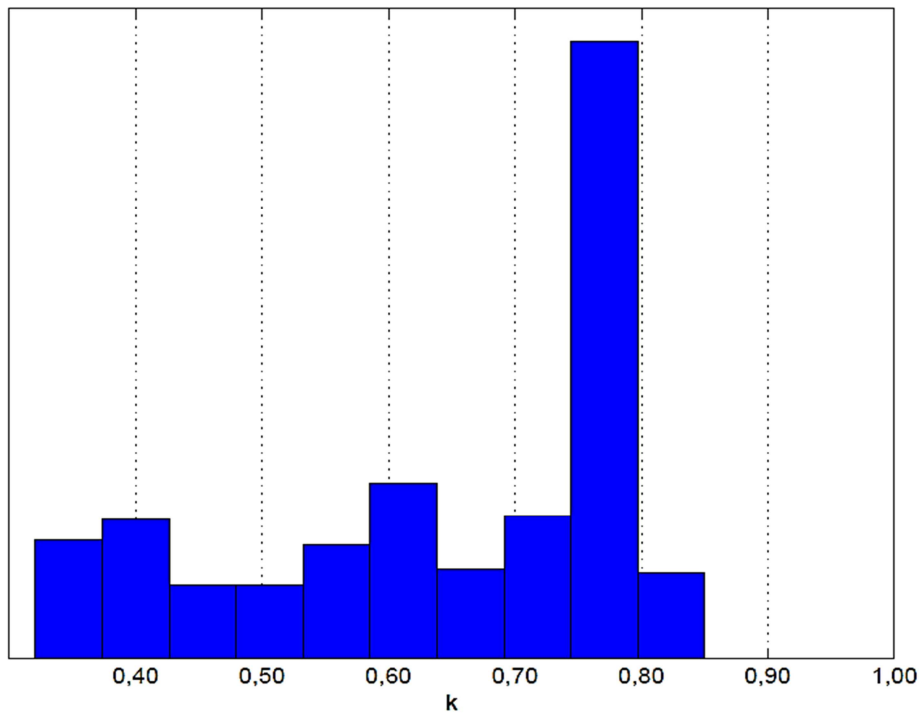


Figura 5.11 - Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro k .
Fonte: Elaborado pela autora.

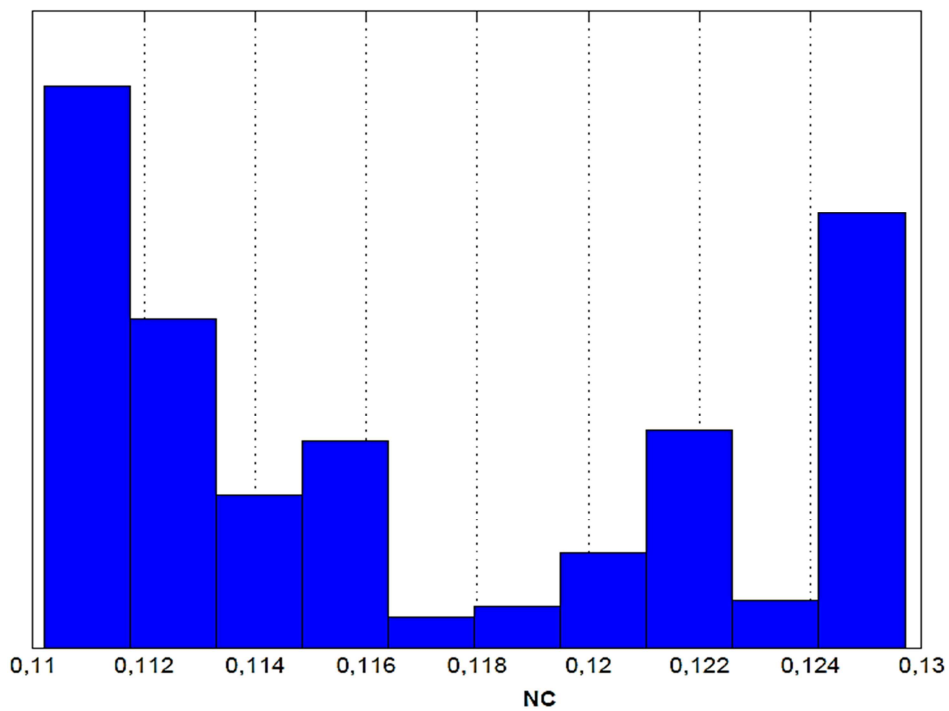


Figura 5.12 - Histograma de frequência dos valores calibrados para o parâmetro NC .
Fonte: Elaborado pela autora.

O tempo computacional médio requerido para o processo de calibração foi de aproximadamente 12 horas, utilizando um computador Intel® Core i7 2,3GHz com 8,00GB de memória RAM. O alto tempo computacional para o processo de calibração deve-se ao fato do modelo ainda está em processo de desenvolvimento e refinamento, necessitando de uma melhor otimização do código.

5.2 Validação do modelo

O modelo trabalha com o conjunto de soluções, parte-se do pressuposto que não há apenas uma solução ou um único grupo de parâmetros, mas uma faixa de parâmetros que iram representar o sistema com um determinado nível de incerteza. E devido a esse nível incerteza que se optou por trabalhar com um conjunto de soluções. A incerteza que aqui se refere está relacionado á:

- A complexidade inerente à transformação da natureza em um conjunto de equações matemáticas;
- Distribuição espacial das características da superfície (o modelo desenvolvido não considera características da superfície do terreno como, variação da altura da vegetação, aspereza do terreno, imperfeições do relevo, sendo a declividade constante para cada sub-plano e o coeficiente de rugosidade de Manning único para cada plano);
- O mesmo ocorre para a subsuperfície e os parâmetros de Horton, considerados constantes em toda a bacia. Sendo a capacidade inicial de infiltração altamente dependente da umidade do solo.

Assim, supor que apenas um grupo de parâmetros seja suficiente para representar uma natureza tão complexa, mesmo o modelo sendo bem detalhado, não é muito funcional. Segundo Shafii e De Smedt (2009), todas as soluções da frente de Pareto determinadas no período de calibração são candidatas dignas para a validação do modelo. Portanto, todos os 400 grupos de valores parmétricos não dominados foram considerados no período de validação do modelo, não se buscou encontrar um único conjunto de parâmetros ou uma melhor solução. A intenção é validar todas as soluções e criar uma faixa provável de vazões, e assim avaliar o comportamento do modelo. Para tanto, foram plotados os hidrogramas para a vazão observada, vazão calculada máxima e mínima.

Os cinco eventos de escoamento superficial foram utilizados na validação do modelo. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.13 a 5.17. Para melhor visualização dos

resultados dos hidrogramas, foram calculados os coeficientes de eficiência Nash & Sutcliffe (eNS) médios, apresentados na Tabela 5.3.

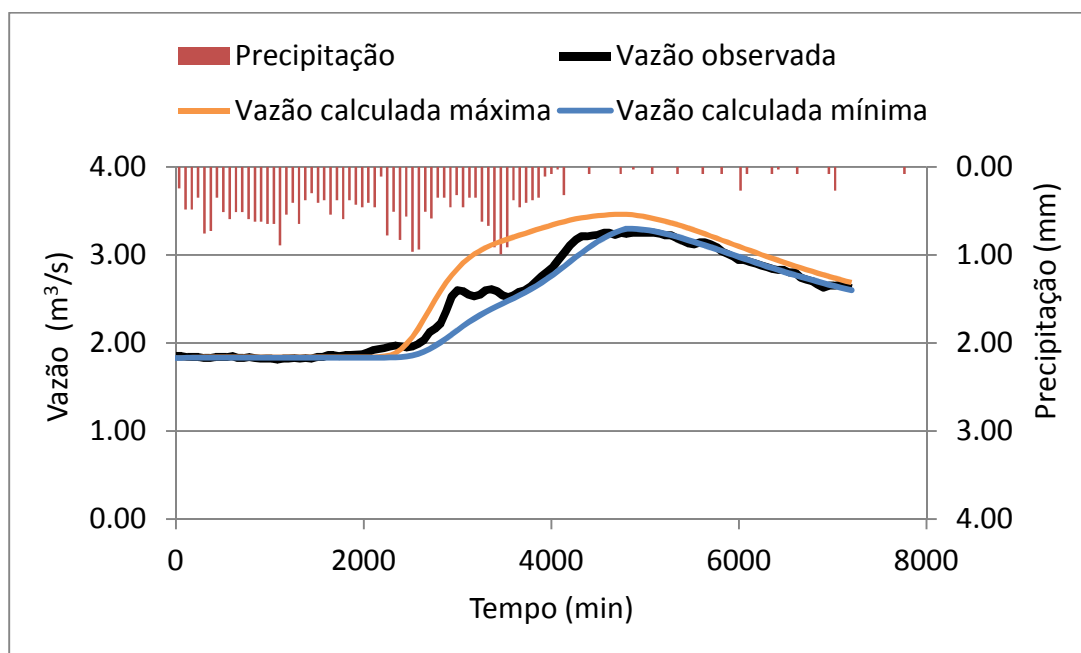


Figura 5.13 – Evento 8 ocorrido no dia 23/03/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

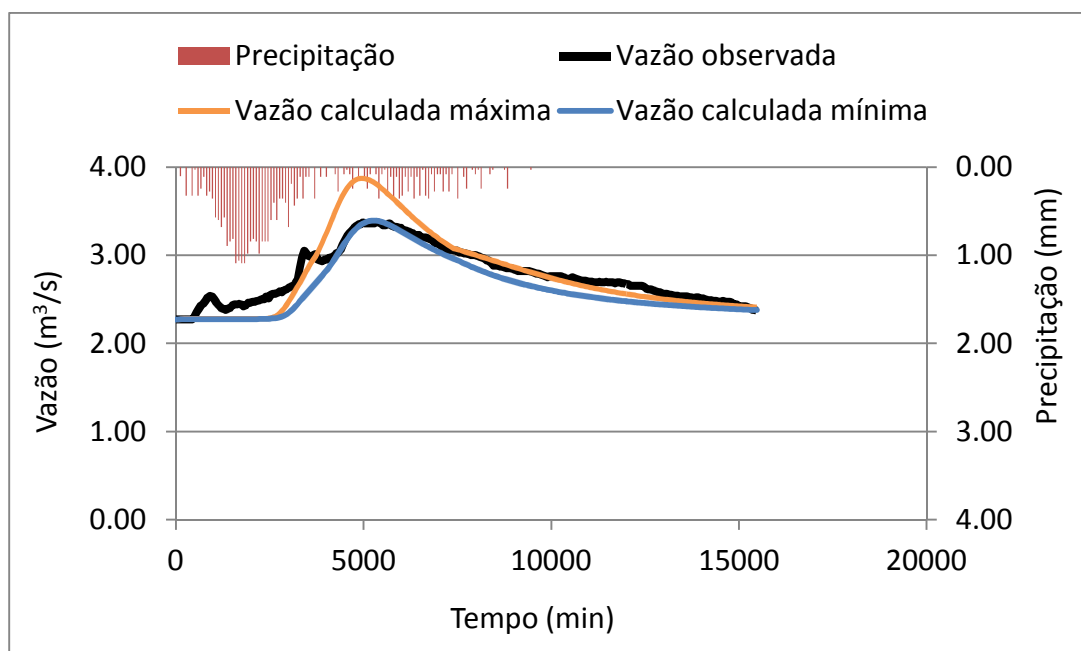


Figura 5.14 - Evento 9 ocorrido no dia 25/03/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

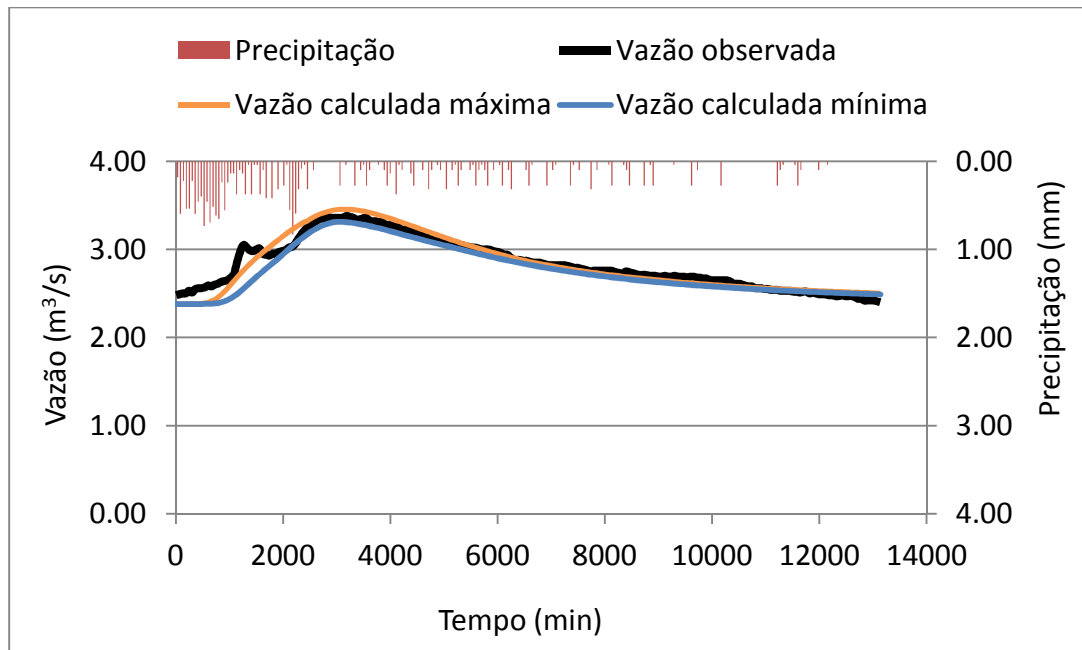


Figura 5.15 - Evento10 ocorrido no dia 26/03/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

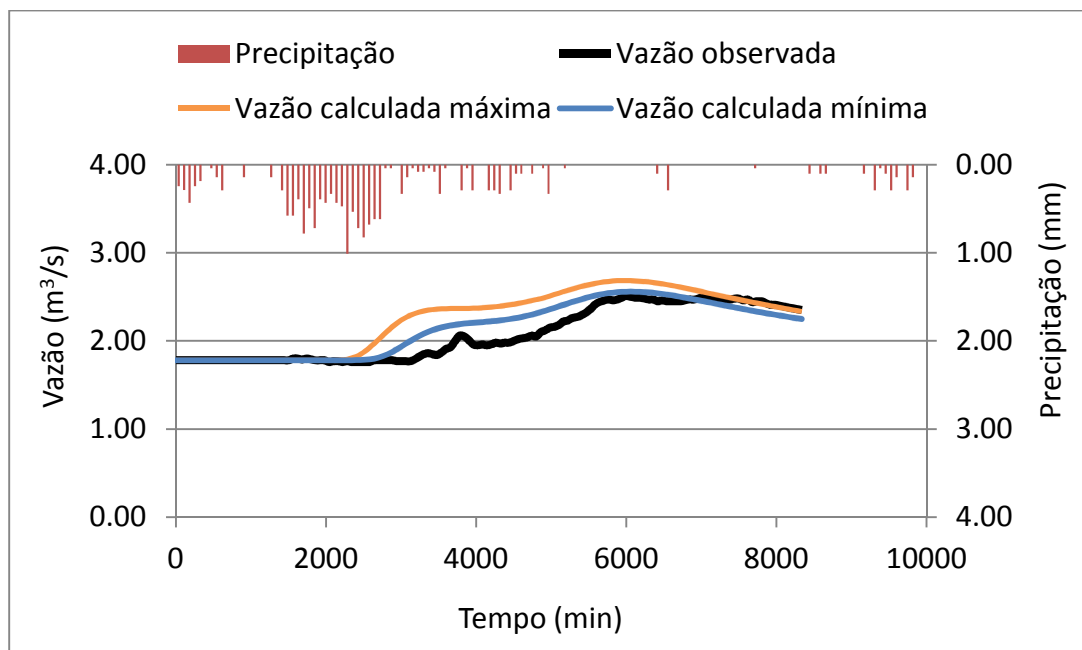


Figura 5.16 - Evento 16 ocorrido no dia 10/04/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

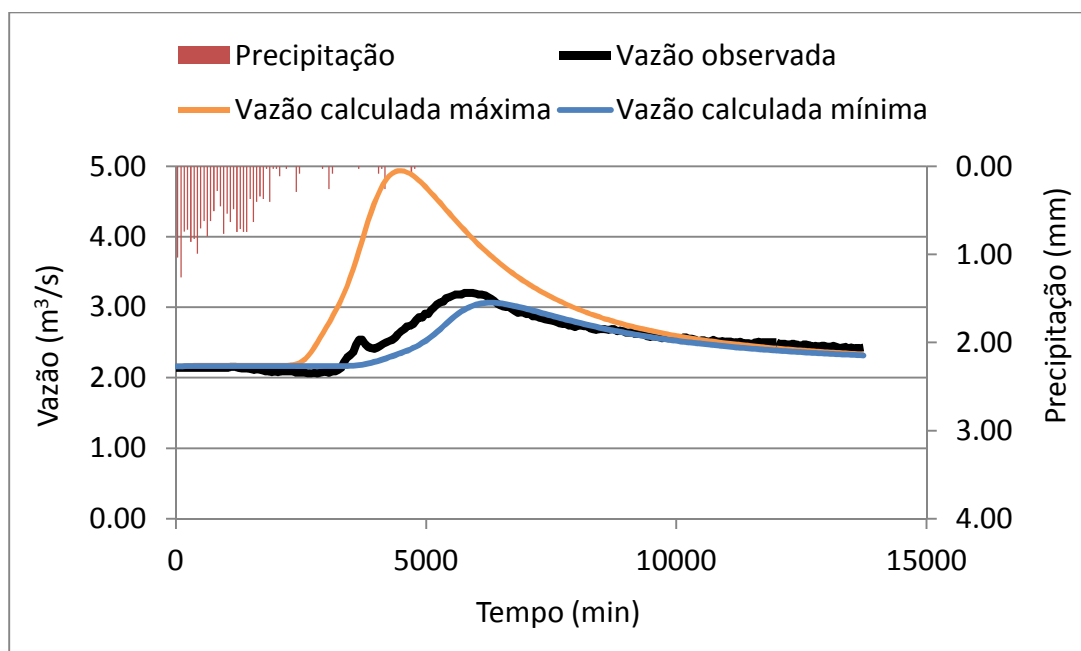


Figura 5.17 - Evento 17 ocorrido no dia 11/04/2013.

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5.3 – Coeficientes de eficiência Nash & Sutcliffe médios após a validação.

Evento	eNS Médio
8	0,72 (bom)*
9	0,76 (muito bom)*
10	0,90 (muito bom)*
16	0,60 (satisfatório)*
17	-1,49 (insatisfatório)*

*Segundo Moriasi et al. (2007).

Percebe-se nas figuras anteriormente apresentadas e nos dados Tabela 5.3 que o modelo apresentou dados aceitáveis de vazão, visto que a eficiência atingida foi boa. Exceção feita aos picos do evento 17, que possivelmente precisaria de um número maior de população para sua calibração. Outra interpretação para a previsão do evento 17 pode estar relacionada a uma série de fatores normalmente vinculados a erros nas séries de dados observados tomados como referência na determinação da qualidade do ajuste.

Nas Figuras 5.18 a 5.22, encontra-se a dispersão dos coeficientes de eficiência Nash & Sutcliffe para cada evento considerando os 400 grupos de soluções. Os eventos apresentaram valores representativos de avaliação, exceto para o evento 17, que obteve valores negativos, entretanto, uma parcela das soluções apresentaram valores de eNS próximo a região do ótimo teórico, conforme ilustrado na Figura 5.22.

Beven (1993) introduziu conceito de equifinalidade, onde afirma o fato de poder haver diferentes conjuntos de parâmetros igualmente adequados para reproduzir o comportamento observado do sistema. Este conceito se manifesta após a validação do modelo, uma vez que o modelo conseguiu selecionar um conjunto expressivo de soluções satisfatórias para a representação do comportamento observado. Para Lindstorm (1997), esta questão não é realmente um problema para aplicações de modelos, pois qualquer um destes conjuntos de parâmetros pode ser aplicado, pois é praticamente impossível obter um único conjunto de amostras representativas de todos os parâmetros de um modelo e que cubram todas as heterogeneidades da bacia hidrográfica.

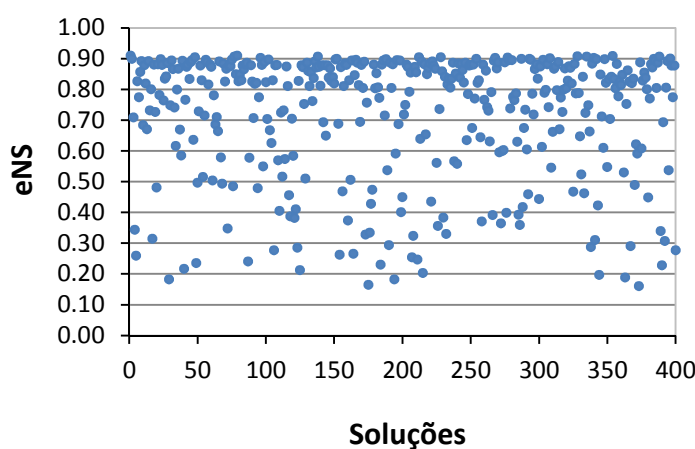


Figura 5.18 - Eficiência Nash & Sutcliffe – Evento 8 ocorrido no dia 23/03/2013.
Fonte: Elaborado pela autora

Apesar de se notar certa concordância entre os resultados simulados e observados, notam-se desvios na forma dos hidrogramas. Esses desvios podem ser decorrentes da inconsistência associada aos dados de entrada, estrutura do modelo, e/ou imprecisões nas vazões observadas. Assim, além de melhorar a estrutura do modelo, também é necessário fornecer métodos adequados para quantificar adequadamente as incertezas associadas aos parâmetros.

Shafii e De Smedt (2009) afirmam que a calibração multi-objetivo integrada à análise de incerteza pode definir um nível mínimo de incerteza associada à estrutura do modelo. E citam, como exemplo, a combinação de princípios probabilísticos e algoritmos evolutivos multi-objetivo para lidar com esta questão. Como não foram efetuadas análises de incertezas no presente trabalho, sugere-se para prováveis estudos posteriores a integração da calibração multi-objetivo e análise de incerteza tendo em vista o objetivo da modelagem.

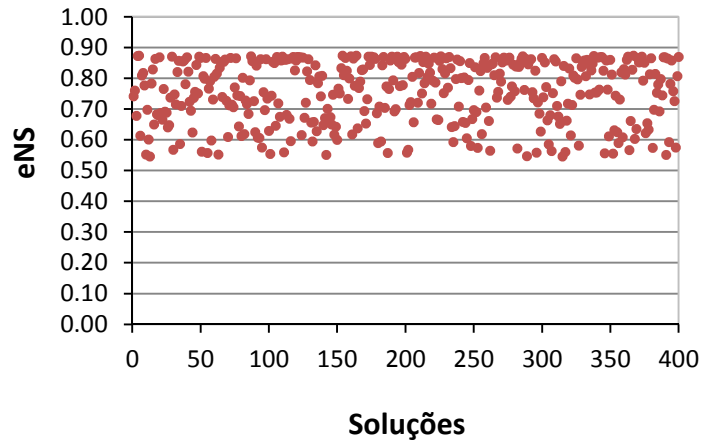


Figura 5.19 - Eficiência Nash-Sutcliffe – Evento 9 ocorrido no dia 25/03/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

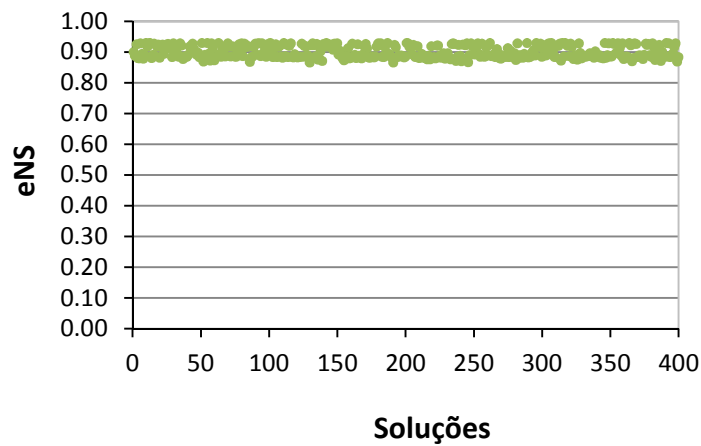


Figura 5.20 - Eficiência Nash-Sutcliffe – Evento10 ocorrido no dia 26/03/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

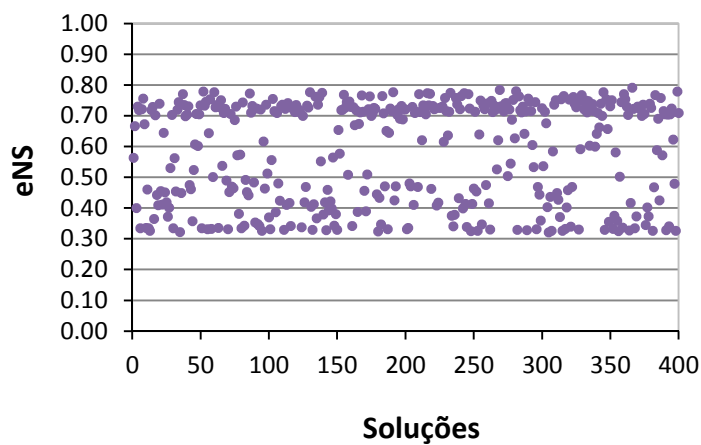


Figura 5.21 - Eficiência Nash-Sutcliffe – Evento 16 ocorrido no dia 10/04/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

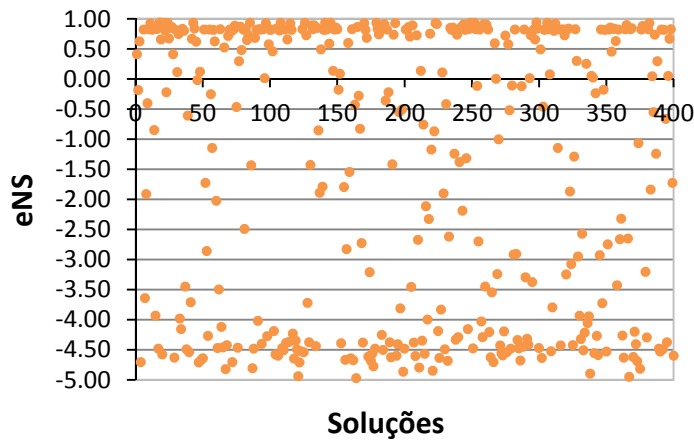


Figura 5.22 - Eficiência Nash-Sutcliffe – Evento 17 ocorrido no dia 11/04/2013.
Fonte: Elaborado pela autora.

5.3 Análise de Sensibilidade do modelo

Para saber o quão sensível é o modelo a cada parâmetro, o mesmo foi executado utilizando um conjunto de parâmetros variando os valores de cada parâmetro em -50% e +50% de seu valor inicial. Os parâmetros avaliados na análise de sensibilidade foram os selecionados para a calibração sendo eles: coeficiente de rugosidade de Manning para área impermeável (NI) e permeável (NP), os parâmetros de infiltração de Horton (fo, fc e k) e coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (NC). A influência de cada parâmetro no modelo foi calculada em termos de variações nas três funções objetivos adotadas. Os resultados encontram-se nas Figuras 5.23 a 5.25.

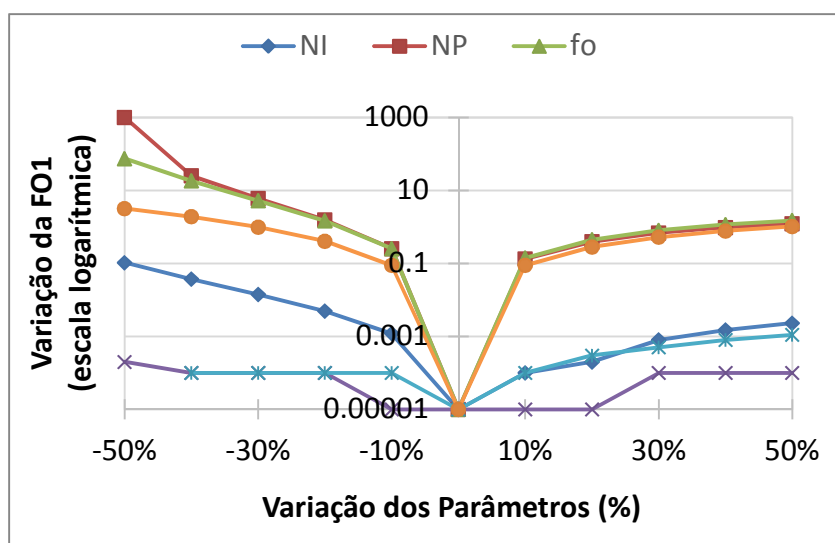


Figura 5.23 – Análise de sensibilidade – FO1. Fonte: Elaborado pela autora.

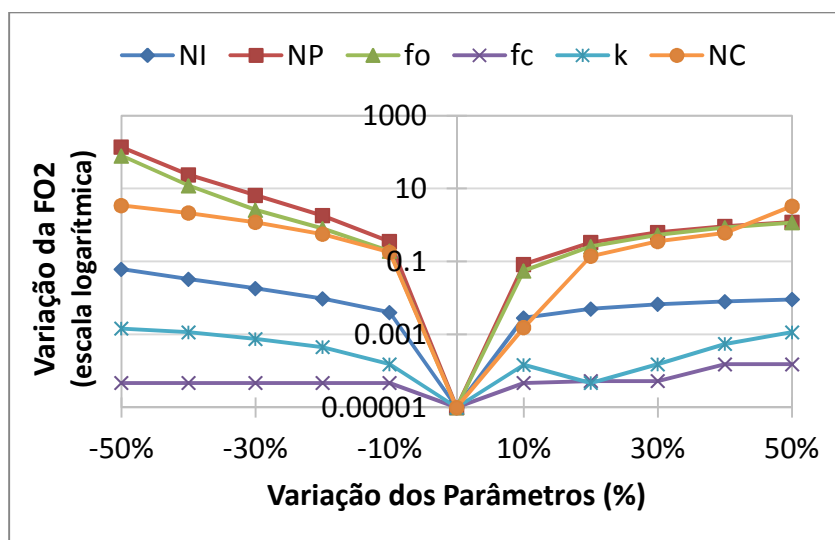


Figura 5.24 - Análise de sensibilidade – FO2. Fonte: Elaborado pela autora.

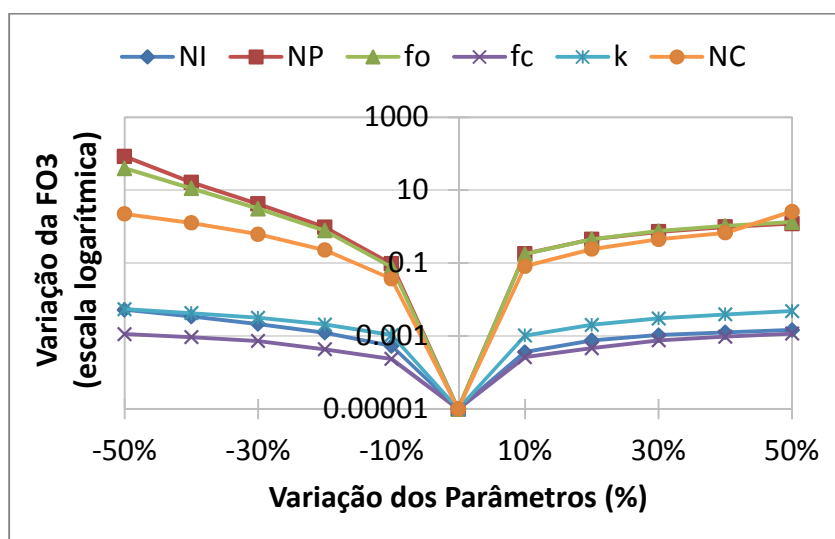


Figura 5.25 - Análise de sensibilidade – FO3. Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com as figuras apresentadas anteriormente, o modelo foi mais sensível aos parâmetros NP, fo e NC para as três funções objetivas analisadas, o que indica forte influência desses três parâmetros no desempenho do modelo. Os parâmetros NI, fc e k apresentaram pequenas variações. Para as três funções o parâmetro NI não apresentou sensibilidade, isso se deve ao fato da área selecionada para o estudo apresentar pequena porcentagem de áreas impermeáveis, portanto sem muita influência deste parâmetro no modelo.

O coeficiente de rugosidade de Manning interfere no deslocamento da água sobre a superfície do terreno. Este coeficiente proporciona menor velocidade de deslocamento da

água sobre as vertentes da bacia hidrográfica, aumentando, assim, o tempo de oportunidade para a ocorrência da infiltração. Assim, para superfícies mais rugosas (coeficientes de rugosidade maiores), ocorre uma maior infiltração da água. Portanto, um aumento no valor deste coeficiente, acarreta diminuição dos valores de vazão e volume escoado. O modelo foi desenvolvido para áreas peri-urbanas com pouca presença de área impermeável, assim, uma redução no coeficiente de rugosidade de Manning causa influência significativa nos resultados do modelo, pode-se citar a variação de 99177,02% na função FO1 quando reduzido em 50% o valor do parâmetro NP (coeficiente de rugosidade de Manning para área permeável), demonstrando que o modelo é altamente sensível a este parâmetro.

Dentre os parâmetros de infiltração de Horton (f_0 , f_c e k) o modelo apresentou maior sensibilidade quando alterado o valor da capacidade de infiltração inicial (f_0), este parâmetro apresenta grande relevância no cálculo do volume escoado na bacia. Destaca-se que o modelo é altamente dependente da umidade do solo, sendo que um abatimento de 50% no valor de f_0 apresentou variação de 7896,53% na função FO2. E um aumento no valor deste parâmetro causa um retardamento do início do escoamento superficial, causando efeitos também nos resultados do modelo.

Desta forma, os resultados obtidos na análise de sensibilidade demonstram que NP, f_0 e NC são os parâmetros que influenciam os hidrogramas resultantes de forma decisiva. E os parâmetros NI, f_c e k são os parâmetros que menos influenciam os resultados do modelo.

As Tabelas 5.4 e 5.5 apresentam as variações em porcentagem das funções objetivo, quando alterado os valores dos parâmetros em +50% e -50%.

Tabela 5.4 - Variação em porcentagem das funções objetivo, quando alterado o valor dos parâmetros em -50% para análise de sensibilidade.

Parâmetros	FO1	FO2	FO3
Coefficiente de rugosidade de Manning para área impermeável (NI)	10,50%	6,20%	0,52%
Coefficiente de rugosidade de Manning para área permeável (NP)	99177,02%	13711,10%	8421,00%
Capacidade de infiltração inicial (f_0)	7452,28%	7896,53%	3957,70%
Capacidade de infiltração final (f_c)	0,02%	0,00%	0,11%
Coefficiente de decaimento (k)	0,00%	0,15%	0,55%
Coefficiente de rugosidade de Manning para o canal (NC)	319,49%	344,04%	222,23%

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 5.5 - Variação em porcentagem das funções objetivo, quando alterado o valor dos parâmetros em +50% para análise de sensibilidade.

Parâmetros	FO1	FO2	FO3
Coeficiente de rugosidade de Manning para área impermeável (NI)	0,23%	0,92%	0,15%
Coeficiente de rugosidade de Manning para área permeável (NP)	122,01%	119,89%	120,88%
Capacidade de infiltração inicial (fo)	149,54%	117,17%	132,83%
Capacidade de infiltração final (fc)	0,01%	0,02%	0,12%
Coeficiente de decaimento (k)	0,11%	0,12%	0,48%
Coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (NC)	102,70%	332,15%	260,54%

Fonte: Elaborada pela autora.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver e calibrar um modelo hidrológico distribuído unidimensional do tipo chuva-vazão que permite a obtenção dos hidrogramas de escoamento superficial referente à vazão máxima e mínima em qualquer posição de uma bacia hidrográfica peri-urbana, considerando escoamento em planos e canais. O modelo utiliza, como dados de entrada: o modelo digital de elevação do terreno, mapa de uso e ocupação do solo e de informações relativas à precipitação, rugosidade do terreno e às condições de infiltração da água no solo. Para possibilitar a consideração da variabilidade espacial dos parâmetros de entrada do modelo proposto, dividiu-se a bacia hidrográfica em planos, sub-planos e canais.

O modelo considera os processos de precipitação, infiltração da água no solo e o escoamento superficial. Foram utilizados o método proposto por Barbalho (2012) e a equação de Horton modificada por Bauer para o cálculo da precipitação média sobre a bacia hidrográfica e a infiltração da água no solo, respectivamente. Para tornar possível a realização deste trabalho foram adotadas as rotinas computacionais desenvolvidas em ambiente MATLAB, o modelo foi denominado UFGModel 1D.

Para a avaliação do modelo instrumentou-se a bacia hidrográfica do córrego Samambaia, localizada em Goiânia-GO, monitorando-se a precipitação e o escoamento superficial durante o período de fevereiro a maio de 2013, período chuvoso na região, tendo sido coletados cinco eventos de precipitação que conduziram a escoamento superficial. O método de calibração do modelo utilizado foi o NSGA-II, com elitismo controlado.

As funções objetivo adotadas foram definidas como sendo o coeficiente de eficiência de Nash & Sutcliffe para três eventos, FO1 (eNS- evento 8), FO3 (eNS- evento 9) e FO3 (eNS- evento 10). As funções foram aplicadas simultaneamente na calibração dos parâmetros.

O algoritmo NSGA- II foi executado com o total de 100 gerações para estimar o conjunto de solução de Pareto definido com relação às seis variáveis de decisão do modelo, produzindo um total de 400 grupos de valores paramétricos não dominados. A calibração alcançou resultados satisfatórios, com coeficiente de eficiência Nash & Sutcliffe médio de 0,87. Os resultados garantem ao modelador uma ampla gama de conjuntos ótimos de parâmetros para selecionar, sem significativamente, perder a confiabilidade.

O modelo calibrado ajustou de maneira aceitável os dados observados, visto que a eficiência atingida foi satisfatória após a validação. O método adotado para a validação do modelo, considerando um grupo/faixa de parâmetros para representar o comportamento

observado, mostrou-se eficiente para avaliação do modelo. Entretanto, um maior número de hidrogramas observados para a validação do modelo poderia ter proporcionado resultados melhores.

A fim de se realizar a análise de sensibilidade do modelo, foram efetuadas simulações considerando variações nos valores das seguintes parâmetros: coeficiente de rugosidade de Manning para área impermeável (NI) e permeável (NP), os parâmetros de infiltração de Horton (f_0 , f_c e k) e coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (NC). Verificou-se que o modelo é mais impactado pelos parâmetros NP, f_0 e NC, sendo esses os parâmetros que influenciam diretamente na forma dos hidrogramas, portanto, seriam bons candidatos a compor isoladamente o processo de calibração.

A seguir apresentam-se algumas recomendações que deverão ser seguidas em etapas futuras, visando o aperfeiçoamento do modelo desenvolvido neste trabalho:

- a integração da calibração multi-objetivo a análise de incerteza em favor de se encontrar um grupo/faixa de parâmetros que melhor represente o comportamento observado e, assim, melhorar o desempenho do modelo;
- o baixo número de hidrogramas observados na bacia de estudo durante o período de monitoramento é um indicativo da necessidade de continuidade do monitoramento da bacia hidrográfica já instrumentada, visando à validação do modelo;
- estudar a influência do processo da discretização espacial nos resultados finais através do uso de esquemas diferentes, com mais ou menos planos e sub-planos;
- considerações de canais com geometrias diferentes da retangular e a inclusão dos processos de interceptação pela cobertura vegetal e armazenamento superficial na estrutura do modelo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. B.; J.C. BATHURST, J. C.; J.A. CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. Introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrologic**, n.87, p. 45-59, 1986a.

ABBOTT, M. B.; J.C. BATHURST, J. C.; J.A. CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. Introduction to the European Hydrological System - Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrologic**, n.87, p. 61-77, 1986b.

ALDRIGHETTI, E. **Computational hydraulic techniques for the Saint Venant equations in arbitrarily shaped geometry**. 2007. 125 f. PhD Thesis, Università Degli Studi di Trento, Trento, Italy, 2007.

ALLASIA, D. G., SILVA, B., COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Large basin simulation experience in South America. In: SIVAPALAN, M.; WAGENER, T.; UHLENBROOK, E. Z.; LAKSHMI, V.; LIANG, X.; TACHIKAWA, Y.; KUMAR, P. (Ed.). **Prediction in ungauged basins: Promises and progress**. Wallingford: IAHS Publication, 2006, p. 360-370.

ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. Modelling strategies. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. (Org.). **Hydrological forecasting**. Chichester: Wiley, 1985, p. 1-13.

BALASCIO, C. C. Multiquadric equations and optimal areal rainfall estimation. **Journal of Hydrology Engineering**, v. 6, n. 6, p. 498-505, 2001.

BASTOS, G. A. P. **Análise dos Parâmetros do Modelo Swmm para Avaliação do Escoamento em duas Bacias Periurbanas em Santa Maria-Rs**. 2007. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

BARBALHO, F. D. **Método para a determinação do fator de redução de área em bacias urbanas**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

BARBOSA, F. A. **Medidas de proteção e controle de inundações urbanas na bacia do rio Mamanguape-PB**. 2006. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006.

BARNARD, T. E.; KUCH, A. W.; THOMPSON, G. R.; MUDALIAR, S.; PHILLIPS, B.C. Evolution of an integrated 1D/2D modeling package for urban drainage. In: JAMES, W. (Org.). **Contemporary modeling of urban water systems**. Canada: Computational Hydraulics International, 2007, p. 343-365.

BARROS, R. S. **Avaliação da altimetria de modelos digitais de elevação obtidos a partir de sensores orbitais**. 2006. 172 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BAUER, S. W. A modified Horton equation for infiltration during intermittent rainfall. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 19, n. 2, p. 219-225, 1974.

BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of hydrologic models for forest management an climate change applications in British Columbia and Alberta**. Kamloops: Forum for Research and Extension in Natural Resources Society, 2009.

BEVEN, K.; WARREN, R.; ZAOUI, J. **SHE: towards a methodology for physically-based distributed forecasting in hydrology**. In: HYDROLOGICAL FORECASTING SYMPOSIUM, 1980, Oxford. **Proceedings...** Oxford: IAHS-AISH Publ., n. 129, 1980, p. 133-137.

BEVEN, K. J. Changing ideas in hydrology – the case of physically-based models. **Journal of Hydrology**, v. 105, n. 1-2, p. 157-172, 1989.

BEVEN, K. J. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, v.16, p. 41–51, 1993.

BEVEN, K.J., QUINN, P., ROMANOWICZ, R., FREER, J., FISHER, J. E LAMB, R. **TOPMODEL and GRIDATB distribution programs - a users guide to the distribution versions (94.01)**. CRES Technical Report TR 110/94, Lancaster University, 1994.

BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: The Primer**, England: John Wiley & Sons, 2001.

BRAVO, J. M.; ALLASIA, D.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Coupled hydrologic-hydraulic modeling of the upper Paraguay River basin. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 5, p. 635-646, 2012.

CAMPLING, P.; GOBIN, A.; BEVEN, K.J.; FEYEN, J. Rainfall-runoff modelling of a humid tropical catchment: The TOPMODEL approach. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 231-253, 2002.

CARAM, R. O. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. 2010. 140 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

CHEN, Z. Q.; KAVVAS, YOON, J. Y.; DOGRUL, E. C.; M. L. FUKAMI, K.; YOSHITANI, J. MATSUURA, T. Geomorphologic and soil hydraulic parameters for Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 9, n. 6, p. 465-479, 2004a.

CHEN, Z. Q.; KAVVAS, M. L. FUKAMI, K.; YOSHITANI, J. MATSUURA, T. Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model: Model application. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 9, n. 6, p. 480-490, 2004b.

CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. **Journal of Hydrology**, v. 19, p. 1-20, 1973.

CLOSE, C. **Converting digital elevation models into grids and TINs for use in ArcView and ArcGIS**. 2003. Disponível:<http://www.lib.uwaterloo.ca/locations/umd/digital/DEM_Documentation.doc>. Acessado em: 30 abr. 2013.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D.; SILVA, B. C.; COLLISCHONN, B.; ALLASIA, D.; PAZ, A. R. Modelo hidrológico distribuído para previsão de vazões incrementais na bacia do rio Paranaíba entre Itumbiara e São Simão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 3, p. 43-55, 2007a.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; BENEDITO C. DA SILVA, B. S.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878-895, 2007b.

COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M.; KAYSER, R. **Manual de exemplos de aplicação do modelo MGB-IPH: Rio das Almas**. Hidrologia de Grandes Bacias. 2010. Disponível: <<https://chasquebox.ufrgs.br/data/public/0409f44bdfd721c0d7439908c06e2a8a.php?lang=pt-br>>. Acessado: 20 mar. 2013.

CUNDERLIK, J. M. **Hydrologic model selection for the CFCAS project**: Assessment of water resources risk and vulnerability to changing climate conditions. Report I. 40 p. 2003.

CUNGE, J.A.; HOLLY JR., F.M.; VERWEY, A. **Practical aspects of computational river hydraulics**. London, England: Pitman Advanced Publishing Program, 1980.

DEB, K.; AGRAWAL, S.; PRATAP, A.; MEYARIVAN, T. A Fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 1917, p. 849-858, 2000.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. England: John Wiley eSons, Ltd. Chichester, 2001.

DESAI, C. S. **Elementary finite element method**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1979.

ET SpatialTechniques. **ET GeoWizards**. Versão 10.2. 2012. Disponível em:<<http://www.ian-ko.com/>>. Acessado em: 14 fev. 2013.

FEDAK, R. **Effect of spatial scale on hydrologic modeling in a headwater catchment**. 1999. 179 f. Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, U.S., 1999.

FETT, M.S. **Análise econômica de sistemas de cultivo de macieiras no município de Vacaria/RS**. 2000. 145 f. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) - Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

FRANCHINI, M.; WENDLING, J.; OBLED, C.; TODINI, E. Physical interpretation and sensitivity analysis of TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 175, p. 293-338, 1996.

FREEZE, R.A. Three-dimensional, transient, saturated unsaturated flow in a groundwater basin. **Water Resources Research**, v. 7, p. 347-366, 1971.

FREEZE, R.A. Role of subsurface flow in generating surface runoff : 1. Base flow contributions to channel flow. **Water Resources Research**, v. 8, p. 609-623, 1972a.

FREEZE, R.A. Role of subsurface flow in generating surface runoff: 2. Upstream source areas. **Water Resources Research**, v. 8, p. 1272-1283, 1972b.

FORMIGA, K. T. M. **Otimização multiobjetivo de projetos de redes de distribuição de água**. São Carlos. 2005. 276 f. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

GARBRECHT, J. OGDEN, F. L. DEBARRY, P. A. MAIDMENT, D. R. Gis and distributed watershed models I: Data coverages and sources. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 6, n. 6, p. 270-292, 2001.

GETIRANA, A. C. V. **Contribuições da altimetria espacial à modelagem hidrológica de grandes bacias na Amazônia**. 2009. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GINESTE, P.; PUECH, C. Radar remote sensing for runoff processes; modelling results from the French Coët-Dan catchment. In: CONFERENCE OF THE EUROPEAN NETWORK OF EXPERIMENTAL AND REPRESENTATIVE BASINS (ERB), 6th, 1996, Strasbourg. **Proceedings...** Strasbourg: Ecohydrological processes in small basins, 1996, p. 147-153.

GOIÁS (Estado). **Recorte do mapa de solos 1:250.000 do plano diretor da bacia do rio Paranaíba segundo corte da folha SE.22-X-B**. Sistema Estadual de Geoinformação - SIEG. 2005. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acessado em: 01 ago. 2013.

GOIÁS (Estado). **Recorte do mapa geomorfológico 1:500.000 segundo corte da folha SD.22-X-B**. Sistema Estadual de Geoinformação - SIEG. 2006. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acessado em: 01 ago. 2013.

GOIÁS (Estado). **Recorte do mapa geológico 1:500.000 segundo corte da folha SD.22-X-B**. Sistema Estadual de Geoinformação - SIEG. 2009. Disponível em: <<http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acessado em: 01 ago. 2013.

GOTSCHALK, L.; BELDRING, S.; ENGELAND, K.; TALLAKSEN, L.; SELTHUN, N. R.; KOLBERG, S.; MOTOVILOV, Y. Regional/macro scale hydrological modelling: A Scandinavian experience. **Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques**, v. 46, n. 6, p. 963-982, 2001.

HARDY, R. L. Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, n. 8, p. 1905-1915, 1971.

INGOL-BLANCO, E.; MCKINNEY, D.C. Modeling climate change impacts on flow in the Rio Conchos Basin. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 18, n. 3, p. 340-352, 2013.

JAFRI, A. M.; HASHIM, Z.; KAVVAS, M.L.; CHEN, Z.Q.; OHARA, N. **Development of Atmospheric Based Flood Forecasting and Warning System for Selected River Basins in Malaysia**. Malaysian Meteorological Department (MMD). 2010. Disponível em: <http://www.met.gov.my/index.php?option=com_content&task=view&id=2935&Itemid=2329>. Acessado em: 20 mar. 2013.

JOHNSON, L. E. **Geographic information systems in water resources engineering**. Ed. Ilustrada. New York: IWA Pub, 2009.

JØNCH-CLAUSEN, T. **A short description of SHE - Système Hydrologique Européen**. SHE Report, n. 1, 1979.

KARMAKAR, S. Kinematic channel modeling. In: KARMAKAR, S. **Hydrologic analysis (contd.)**. National Programme on Technology Enhanced Learning. 2012. Disponível em: <<http://www.nptel.iitm.ac.in/courses/105101002/downloads/module4/lecture1.pdf>>. Acessado em: 30 abr. 2013.

KAVVAS, M. L.; CHEN, Z. Q.; DOGRUL, C.; YOON, J. Y.; OHARA, N.; LIANG, L.; AKSOY, H.; ANDERSON, M. L.; YOSHITANI, J.; FUKAMI, K.; T. MATSUURA, T. Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model based on upscaled conservation equations: Hydrologic module. **Journal of Hydrology**, v. 9, n. 6, p. 450-464, 2004.

KAVVAS, M.; YOON, J.; CHEN, Z.; LIANG, L.; DOGRUL, E.; OHARA, N.; AKSOY, H.; ANDERSON, M.; REUTER, J.; HACKLEY, S.; Watershed environmental module and its application to a California watershed. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 11, n. 3, p. 261-272, 2006.

KOUWEN, N., SOULIS E., PIETRONIRO A., Donald J., HARRINGTON R. Grouped response units for distributed hydrologic modeling. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 119, n. 3, p. 289-305, 1993.

LANÇA, R. M. M.; RODRIGUES, A. C. Apresentação de um modelo distribuído de precipitação/escoamento superficial. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 5, 2000, Lisboa. **Anais...**Lisboa: Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, 2000, p. 1-14.

LANÇA, R. M. Contribuição para o estudo de cheias recorrendo a um modelo distribuído. 2000. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Solo e da Água) – Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora, Faro, Portugal, 2000.

LASTORIA, B. **Hydrological Processes on the Land Surface**: A survey of modelling approaches. FORALPS Technical Report, 9, 2008. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Trento, Trento, Italy.

LEE, P. S.; LYNN, P. P.; SHAW, E. M. Comparison of multiquadric surfaces for the estimation of areal rainfall. **Hydrology Sciences Journal**, v. 19, n. 3, p. 303-317, 1974.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGESS, S. J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, 1994.

LIANG, L.; KAVVAS, M. L.; CHEN, Z. Q.; ANDERSON, M.; OHARA, N.; WILCOX, J.; MINK, L. Modeling river restoration impact on flow and sediment in a California watershed. In: KABBES, K. C. (Ed.). **World environmental and water resources congress 2007**: Tampa: American Society of Civil Engineers, 2007, p. 1-10.

LIGHTHILL, M. J. WHITHAM, G. B. On kinematic waves I: Flood movement in long rivers. **Proceedings the Royal Society**, v. 229, n. 1178, p. 281-316, 1955.

LINDSTORM, G. A simple automatic calibration routine for the HBV model. **Nordic Hydrology**, v. 28, p. 153-168, 1997.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do rio Piabanha-RJ**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

LUCAS, E. W. M.; SOUZA, F. S. S.; SILVA, F. D. S.; LUCIO, P. S. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu – Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.3, p. 308-322, 2009.

LUDWIG, K.; BREMICKER, M. **The water balance model LARSIM—design, content and applications**. Freiburger Schriften zur Hydrologie, 22. Ed. Freiburg: Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, 2006.

MAGALHÃES, L.P.C. **Modelo integrado para simulação de sistemas hídricos**. 2005. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MAINARDI, F. F.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; CAUDURO, R.; KAYSER, R. **Manual ArcHydro para aplicação do modelo MGB-IPH**. Hidrologia de Grandes Bacias. 2009. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/hge/mgb-iph/downloads/>>. Acessado em: 15 mar. 2013.

MARSHALL, H.E., Sensitivity analysis. In: DORF, R.C. (Org.). **Technology management handbook**. Boca Raton: FL. CRC Press LLC, 1999, p.59-63.

MAYS, L.W. **Water resources engineering**. John Wiley & Sons, 2005.

MENDES, C. A. B. Integração de modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: Fundamentos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, n. 1, p. 48-66, 1996.

MIGUEZ, M. G. **Modelação matemática de grandes planícies de inundação, através de um esquema de células de escoamento, com aplicação ao Pantanal Matogrossense**. 1994. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.

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

MOORE, I. D.; O'LOUGHLIN, E. M.; BURCH, G. J. A contour-based topographic model for hydrological and ecological applications. **Earth Surface Processes And Landforms**, v. 13, p. 305-320, 1998.

MORIASI, D. N., J. G.; ARNOLD, VAN LIEW M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineering**, v.50, p.885-900, 2007.

MOUSSA, R.; CHAHINIAN, N.; BOCQUILLON, C. Distributed hydrological modelling of a Mediterranean mountainous catchment – Model construction and multi-site validation. **Journal of Hydrology**, v. 337, p. 35-51, 2007.

MULETA, M. K; NICKLOW, J. W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. **Jornal of Hydrology**, v. 306, p. 127-145, 2005.

NASH, J. E; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NIJSSEM, B.; LETTENMAIER, D. P.; LIANG, X.; WETZEL, S. W.; WOOD, E. F. Stream flow simulation for continental scale river basins. **Water Resour. Res.**, v. 33, n. 4, p. 711-724, 1997.

OLIVEIRA, F. A. **Calibração de um modelo hidrodinâmico unidimensional para canais urbanos**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.

PAIVA, F. M. L. **Estudo Comparativo Entre Três Modelos de Base Física na Modelagem Hidrossedimentológica em Microbacias na Região Semi-Árida Paraibana**. 2008. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)- Centro de tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

PALACIOS-VÉLEZ, O. L., GANDOY-BERNASCONI, W.; CUEVAS-RENAUD, B. Geometric analysis of surface runoff and the computation order of unit elements in distributed hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 211, p. 266-274, 1998.

PAZ, A. R. **Modelo hidrológico distribuído MGB-IPH: Etapa MGBgis – manual do usuário.** Divisão de Processamento de Imagens – DPI. 2008. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/~alexandre/ThReleases/MANUAL_MGBgis_v2mar2008.pdf>. Acessado: 20 mar. 2013.

PECHLIVANIDIS, I. G.; JACKSON, B. M.; MCINTYRE, N. R.; WHEATER, H. S. Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. **Global NEST Journal**, v. 13, n. 3, p. 193-214, 2011.

PRADHAN, N. R.; TACHIKAWA, Y.; TAKARA, K. **Development of scale invariant physically based hydrological model: Scale invariant TOPMODEL.** Kyoto University. 2004. Disponível em: <<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/dat/nenpo/no47/47b0/a47b0t22.pdf>>. Acessado em: 02 mar. 2013.

PREISSMANN, A.; ZAOUI, J. Le module “Ecoulement de surface” due Systeme Hydrologique Europeen (SHE). In: IAHR WORLD CONGRESS, 18th, 1979, Cagliari. **Proceedings...**Cagliari: IAHR World Congress, 1979.

ROCHA, N. Ocupações irregulares dos fundos de vale e a degradação dos cursos d'água – Estudo de caso do córrego Samambaia em Goiânia. **Revista Especialize On-line IPOG**, v. 01, n. 006, 2013.

RIOS, F. P.; FORMIGA, K. T. M. Estimativa da erosão de margem no córrego samambaia com uso do modelo HEC-RAS. In: CONGRESSO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO, 10, 2013, Goiânia. **Anais...**Goiânia: UFG, 2013, p. 10509 – 10509.

RODRÍGUEZ-ITURBE, I.; RINALDO, A. **Fractal river basins: Chance and self-organization.** Cambridge: Cambridge University Press, 1997.

ROSSMAN, L. A. Storm Water Management Model, Version 5.0: **User's Manual.** U. S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Oh. 2010. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100ERK4.pdf>>. Acessado em: 30 mar. 2014.

SARTORI, A.; NETO, F. L.; GENOVEZ, A. M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos parte 1: Classificação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 05-18, 2005.

SAULNIER, G; BEVEN, K. J.; OBLED, C. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 202, p. 158-172, 1997.

SEIBT, A. C. **Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do córrego Botafogo – Goiânia – GO.** 2013. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

SHAW, E. M.; LYNN, P. P. Areal rainfall evaluation using two surface fitting techniques. **Bulletin of the International Association of Hydrological Sciences**, v. 17, n. 4, p. 419-433, 1972.

SHAFII, M.; DE SMEDT, F. Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a genetic algorithm. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 13, p. 2137-2149, 2009.

SHINMA, T. A. **Calibração multiobjetivo do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

SILVA, R.V. **Análise comparativa de três formulações do TOPMODEL na bacia do rio Pequeno – PR**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SILVA, L. P. **Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do rio Cuiá**. 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

SILVA, R. V.; KOBAYAMA, M. TOPMODEL: Teoria integrada e revisão. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, n. 14, p. 97-110, 2007.

SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Littleton: Water Resources Publications, 1995.

SINGH, V. P.; FREVERT, D. K. **Watershed models**. USA: CRC Press, 2006.

SLEIGH, P.A; GOODWILL, I. M. **The St Venant equations**. 2000. School of Civil Engineering, University of Leeds, Reino Unido. Disponível em: <<http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE3400/stvenant.pdf>>. Acessado em: 28 abr. 2013.

SMEDT, F.; YONGBO, L.; GEBREMESKEL, S. Hydrologic Modelling on a Catchment Scale Land Use Information. In: BREBBIA, C. A. (Org.). **Risk Analysis II**, Southampton, Boston: WIT press, 2000, p. 295-304.

SOUZA, M. M. **Comparação entre ferramentas de modelagem unidimensional e quasi-bidimensional, permanente e não-permanente, em planejamento e projetos de engenharia hidráulica**. 2010. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SOUZA, R. M.; FORMIGA, K. T. M.; VEIGA, A. M. Caracterização morfométrica e delimitação da bacia hidrográfica do córrego Samambaia – GO a partir de dados do SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2013, p. 5880-5887. 1 DVD.

SRINIVAS, N. E.; DEB, K. multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. **Evolutionary Computation**, v. 2, n. 3, p. 221-248, 1994.

SZILAGYI, J.; PARLANGE, M.B. A geomorphology-based semi-distributed watershed model. **Advances in Water Resources**, v. 23, p. 177-187, 1999.

TORRES, A. S. **Modelling the future water infrastructure of cities**. 2013. 231 f. Doctoral dissertation, Delft University of Technology and UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, Netherlands, 2013.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R.L.; BARROS, M. T. Drenagem urbana. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1995.

TUCCI, C. E. M.; MARENGO, J. A.; SILVA DIAS, P. L.; COLLISCHONN, W.; SILVA, B. C.; CLARKE, R. T.; CARDOSO, A. O.; JUAREZ, R. N.; SAMPAIO, G.; CHAN, C. S.; TOMASELLA, J. **Previsão de vazões na bacia do São Francisco com base na previsão climática**. Relatório Técnico ANEEL/OMM/98/00. Porto Alegre: IPH-UFRGS, 2004.

TUCCI, C. E. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005.

VAN LIEW, M. W.; ARNOLD, J. G.; BOSCH, D. D. Problems and potencial of autocalibrating a hydrologic model. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 48, n. 3, p. 1025-1040, 2005.

VERDIN, K.L.; VERDIN, J.P. A. Topological system for delineation and codification of the Earth's river basins. **Journal of Hydrology**, v. 218, p.1-12, 1999.

VIDAL, D. H. F. **Modelagem hidrodinâmica como suporte ao diagnóstico e avaliação de alternativas compensatórias para mitigação dos problemas de cheias urbanas na bacia do riacho Reginaldo em Maceió-AL**. 2012. 222 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

WEME, A. **Quasi-2D modelling of the River Elbe: A comparison of different inundation models for flood risk assessment within a decision support system**. 2005. 83 f. Master thesis, Faculty of Engineering Technology, University of Twente, Enschede, Netherlands, 2005.

YAPO, P. O.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. Multi-objective global optimization for hydrologic models. **Journal of Hydrology**, v. 204, p. 83-97, 1998.

XIONG, L.; GUO, S. A two-parameter monthly water balance model and its application. **Journal of Hydrology**, v. 216, n.1, p. 111-123, 1999.

ZANETTI, S. S. **Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2007.