



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

ANA CAROLINA SEIBT

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BOTAFOGO
– GOIÂNIA – GO**

**GOIÂNIA/GO
29/07/2013**

ANA CAROLINA SEIBT

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BOTAFOGO – GOIÂNIA - GO

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

Área de concentração do programa: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga.

Apoio Financeiro: CNPq/CAPES

GOIÂNIA/GO
JULHO, 2013

ANA CAROLINA SEIBT

MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO BOTAFOGO – GOIÂNIA - GO

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, aprovada em 29 de julho de 2013 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dr. Klebber Teodomiro Martins Formiga – UFG
Presidente da Banca

Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira – UFG
Examinador Interno

Prof. Dr. Ricardo de Aragão - UFS
Examinador Externo

Ao meu Deus, dono de toda a sabedoria. À minha amada família, meu equilíbrio. Ao meu amado esposo, minha alegria e aos meus futuros filhos, minhas preciosidades.

AGRADECIMENTOS

Uma das maiores qualidades do ser humano é o sentimento de gratidão e a humildade para com as graças e o reconhecimento alcançado. Tudo isso seria impossível se não fosse à fé em Deus. Saber que tudo podemos e que nada é impossível é sua obra de maior perfeição. Por isso que o primeiro agradecimento vem a essa grande luz inspiradora: DEUS! Agradeço a Ele pela minha família, meu esposo, por minha saúde, meu lar, meus amigos, meu trabalho e meus estudos.

Agradeço a Deus pela graça de viver em uma família maravilhosa, com pais extraordinários que me proporcionaram o apoio necessário, o carinho e tudo de necessário para o meu crescimento humano e profissional. Obrigada pai e mãe! À minha irmã Taís Carolina Seibt Rick e meu cunhado Amauri José Rick Figueiredo Oliveira que demonstraram confiança e ânimo em todos os momentos. Vocês são grandes detentores da minha inspiração.

Ao meu esposo André José Rick Guimarães. Todas as palavras possíveis ainda seriam insuficientes para que eu pudesse expressar o meu enorme carinho e amor por essa pessoa tão especial. À você eu dedico parte da minha essência e existência, à você eu dedico o meu desenvolvimento, o meu mestrado e parte do meu conhecimento como ser humano. O caminho percorrido com o seu apoio tornou-se muito mais leve e prazeroso.

Deus coloca em nossas vidas, pessoas com a intenção de provar que uma das maiores dádivas existentes é a amizade. Entre essas dádivas estão as minhas grandes amigas e irmãs de coração: Aline Arvelos Salgado, Duane Izabel Barbosa, Rafaela Wolf, Rávilla Souza e Fernanda Posch. A todas estas eu tenho muito a agradecer, principalmente, pelo apoio e carinho a mim sempre demonstrado. Obrigada pela ajuda profissional e espiritual.

Aos meus amigos Paulo Araújo, Vilmar Filho, Eduardo Lana Zadi, Rodrigo Brito, Fernanda Almeida, Patrícia Layne, Fernando Barbalho, Maíra Carvalho, Wellington Nunes de Oliveira, Victor Tomaz, Natália Lino, Prof. Eduardo Queija de Siqueira, agradeço a paciência, apoio nas horas de dúvidas, compreensão, ajuda nas medições de campo e coleta de dados, enfim, em todos os momentos.

Aos meus colegas da Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMARH, pela confiança, pelo entusiasmo e por acreditarem que tudo daria certo.

Aos meus amigos Daniela Sbabo Flores, Hidelberto Matos e afilhadinha Maria Clara Sbabo Flores e Silva, pelo carinho, compreensão e apoio. Vocês não sabem o quanto foram importantes nessa fase da minha vida.

Ao meu querido orientador Klebber Teodomiro Martins Formiga pela compreensão, estímulo, persistência, paciência e empenho em todas as horas. Devo a você todo o conhecimento adquirido, não só profissional, mas pessoal, considere-se um exemplo de humildade e sabedoria que sempre terei como referência.

À Secretária do Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia do Meio Ambiente (PPGEMA), Deuzélia Rosa Gomes dos Santos, pela paciência, apoio, conversas edificantes e descontraídas.

À todos os meus colegas de mestrado que de alguma forma me ofereceram apoio e auxílio.

Aos seguintes órgãos e seus respectivos funcionários, pelo apoio institucional, financeiro e/ou logístico: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Engenharia do Meio Ambiente (PPGEMA) e a Universidade Federal de Goiás (UFG).

À todos que contribuíram de alguma maneira singular para a conclusão desse trabalho.

"Ame como a chuva fina. Esta cai em silêncio, quase sem fazer notar, mas é capaz de transbordar rios."

(Paulo Coelho)

RESUMO

Os inúmeros problemas advindos do aumento da quantidade das áreas impermeabilizadas e do sistema de drenagem das águas pluviais defasado consistem em um árduo desafio para as gestões públicas. A modelagem hidrológica aparece como um forte suporte da engenharia, porém, está sujeita a um conjunto de restrições distintas, raramente consideradas explicitamente através da análise de incerteza associada aos resultados obtidos. O presente trabalho propõe-se a ressaltar o papel desempenhado pela modelagem hidrológica através de um modelo de transformação do processo precipitação-vazão para bacia hidrográfica do córrego Botafogo (Goiânia – GO), denominado de UFGModel1.0 e averiguar a análise de incerteza aplicada na simulação de vazões. Para o cumprimento do objetivo, após a exposição do problema, propõe-se uma metodologia de análise da incerteza através do método de Monte Carlo, baseada no método de estimação de incerteza GLUE. Ressalta-se a importância dada em consideração aos campos de precipitação, e ao efeito de sua simplificação na resposta de um modelo do tipo precipitação-vazão. Os resultados obtidos demonstram que vários conjuntos de parâmetros foram considerados ótimos possibilitando uma alta eficiência do modelo para eventos intensos de precipitação. O modelo apresentou maior sensibilidade ao parâmetro de área impermeabilizada e Manning do plano.

Palavras-Chave: Modelagem hidrológica, vazão, incerteza, GLUE.

ABSTRACT

The numerous problems arising from the increased amount of impermeable areas and drainage system of rainwater lagged consist of a hard challenge for public administrations. The hydrological modeling appears as a strong support engineering, however, is subject to a distinct set of constraints rarely explicitly considered by analysis of uncertainty to the results. The present study aims to highlight the role of hydrological modeling through a model transformation process for rainfall-runoff watershed stream Botafogo (Goiania - GO), called UFGModel1.0 and ascertain the uncertainty analysis applied in simulation flows. To achieve the goal, after exposure of the problem, we propose a methodology for uncertainty analysis using the Monte Carlo method, based on the method of estimation uncertainty GLUE. We stress the importance given in consideration of the precipitation fields, and the effect of simplifying the response of a model of a precipitation-runoff. The results demonstrate that multiple sets of parameters were considered excellent high efficiency enabling a model for events intense precipitation. Parameters studied concluded that the sealed area holds great sensitivity, significantly altering the design flow.

Keywords: Hydrologic modeling, flow, uncertainty, GLUE.

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Otimização multiobjetiva ideal.	37
Figura 2. Otimização multiobjetiva em preferência.	38
Figura 3. Superfície de resposta para duas dimensões de parâmetros com contornos bem representados.	42
Figura 4. Mais complexas superfícies de resposta em duas dimensões de parâmetro.	42
Figura 5. Localização bacia do córrego Botafogo e seus afluentes.	50
Figura 6. Córrego Botafogo.	51
Figura 7. Estrutura em gabião	51
Figura 8. Solos característicos da bacia do córrego Botafogo.	53
Figura 9. Geologia da bacia do córrego Botafogo.	54
Figura 10. Geomorfologia da bacia do córrego Botafogo.	55
Figura 11. Uso do solo na bacia do córrego Botafogo.	57
Figura 12. Levantamento Planialtimétrico – estação total.	59
Figura 13. Estrutura para fixação em talvegue.	61
Figura 14. Estrutura para fixação em talvegue - vista superior.	61
Figura 15. Estrutura para fixação em gabião – vista frontal.	61
Figura 16. Estrutura para fixação em gabião - vista superior.	61
Figura 17. Estrutura para fixação em gabião.	61
Figura 18. Linígrafos utilizados em campo.	62
Figura 20. Instalação dos equipamentos.	64
Figura 21. Instalação de equipamentos.	64
Figura 22. Pluviógrafos.	65
Figura 23. Pontos onde foram instalados os pluviógrafos.	66
Figura 24. Treze eventos adotados no estudo.	67
Figura 25. Precipitação x vazão do Evento 01.	68
Figura 26. Precipitação x vazão do Evento 02.	68
Figura 27. Precipitação x vazão do Evento 06.	68
Figura 28. Precipitação x vazão do Evento 08.	69
Figura 29. Precipitação x vazão do Evento 11.	69
Figura 30. Precipitação x vazão do Evento 12.	69
Figura 31. Escoamento ao longo do plano e do canal.	70
Figura 32. Três sub-bacias estudadas.	71
Figura 33. Fluxograma de escoamento para 03 sub-bacias.	72
Figura 34. Dez sub-bacias estudadas.	72
Figura 35. Fluxograma de escoamento para 10 sub-bacias.	73
Figura 36. Representação esquemática da superposição de superfícies cônicas para formação da superfície de precipitação.	74
Figura 37. Propagação da onda cinemática.	78
Figura 38. Esquemas Explícitos e Implícitos	80
Figura 39. Canal considerado nas três sub-bacias de estudo.	81

Figura 40. Canais inseridos para estudo das dez sub-bacias de estudo.....	81
Figura 41. Canal retangular.	81
Figura 42. Etapas seguidas para implantação da metodologia do modelo GLUE.	85
Figura 43. Distribuição espacial da chuva. Eventos 01, 02 e 06.....	89
Figura 44. Distribuição espacial da chuva. Eventos 08 e 12.	90
Figura 45. Vazão observada x vazões calculadas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 01 - 12/03/2012.	91
Figura 46. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 02 - 15/03/2012	91
Figura 47. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 06 - 21/03/2012.	92
Figura 48. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 08 - 23/03/2012.	92
Figura 49. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 12 - 27/03/2012.	92
Figura 50. Eficiência Nash - Sutcliffe - Parâmetro 01.....	94
Figura 51. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 02.....	94
Figura 52. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 03.....	94
Figura 53. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 04.....	95
Figura 54. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 05.....	95
Figura 55. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 06.....	95
Figura 56. Variações dos parâmetros por evento estudado.....	97
Figura 57. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Manning do Plano.....	97
Figura 58. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Área Impermeável.	98
Figura 59. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Infiltração Inicial.	98
Figura 60. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Infiltração Final.	98
Figura 61. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Condutividade Hidráulica.....	99
Figura 62. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Manning do Canal.	99
Figura 63. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 01.....	100
Figura 64. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 02.....	100
Figura 65. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 06.....	100
Figura 66. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 08.....	101
Figura 67. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 12.....	101
Figura 68. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash-Sutcliffe - Evento 01 - 12/03/2012.	103
Figura 69. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 02 - 15/03/2012.	104
Figura 70. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 06 - 21/03/2012.	104
Figura 71. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 12 - 27/03/2012.	104
Figura 72. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 01.....	105
Figura 73. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 02.....	106

Figura 74. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 03.....	106
Figura 75. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 04.....	106
Figura 76. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 05.....	107
Figura 77. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 06.....	107
Figura 78. Variações dos parâmetros por evento estudado.....	108
Figura 79. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Manning do Plano.....	109
Figura 80. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Área Impermeável.	109
Figura 81. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Infiltração Inicial.	109
Figura 82. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Infiltração Final.	110
Figura 83. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Condutividade Hidráulica... 110	
Figura 84. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Manning do Canal.	110
Figura 85. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 01.....	111
Figura 86. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 02.....	112
Figura 87. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 06.....	112
Figura 88. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 12.....	112

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Variáveis de entrada do modelo para o plano e o canal.....	83
Tabela 2. Variáveis de saída e de estado do modelo - plano e canal.....	84
Tabela 3. Parâmetros físicos do modelo.....	84
Tabela 4. Parâmetros a serem calibrados pelo modelo e suas variações.....	86
Tabela 5. Três sub-bacias e suas características.....	126
Tabela 6. Dez sub-bacias e suas características.....	127
Tabela 7. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 01 – Três Sub-Bacias.....	130
Tabela 8. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 02 – Três Sub-Bacias.....	131
Tabela 9. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 06 – Três Sub-Bacias.....	132
Tabela 10. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 08 – Três Sub-Bacias.....	132
Tabela 11. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 11 – Três Sub-Bacias.....	132
Tabela 12. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 12 – Três Sub-Bacias.....	133
Tabela 13. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 01 – Dez Sub- Bacias.....	134
Tabela 14. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 02 – Dez Sub- Bacias.....	136
Tabela 15. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 06 – Dez Sub- Bacias.....	141
Tabela 16. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 08 – Dez Sub- Bacias.....	141
Tabela 17. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 11 – Dez Sub- Bacias.....	141
Tabela 18. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 12 – Dez Sub- Bacias.....	142

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

AGs – Algoritmos Genéticos;

ANSWERS - Area Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation;

APP - Área de Preservação Permanente;

EIA - Estudo de Impacto Ambiental;

EIV - Estudo de Impacto de Vizinhança;

eNS – Coeficiente Nash-Sutcliffe;

GENSAT - Gene Expression Nervous System Atlas;

GLIM - Generalized Linear Interactive Modelling;

GLUE - Generalized Likelihood Uncertainty Estimation;

HEC-HMS - Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System;

MATLAB - Matrix Laboratory;

MOCOM - Multiobjective Complex Evolution;

MOGA - Multiobjective Genetic Algorithm;

MOSCEM - Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis;

MOUSE - Modelling of Urban Sewers;

MSX - método simplex;

NPGA - Niche Pareto Genetic Algorithm;

NSGA - Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm;

PNL - programação não linear;

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental;

RN - Rio Grande do Norte;

RNA - Rede Neural;

SCE - UA - Shuffled Complex Evolution University of Arizona;

SGA - Análise de Sensibilidade Global;

SHE - System Hydrologic European;

SPEA - Strength Pareto genetic Algorithm;

SWAT - Soil and Water Assessment Tool;

SWMM - Storm Water Management Model;

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO	18
1.2 OBJETIVO GERAL	19
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4 ESTRUTURA DO DOCUMENTO	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 CONCEITOS SOBRE MODELOS HIDROLÓGICOS.....	21
2.1.1 Históricos dos modelos hidrológicos.....	22
2.1.2 Utilização de modelos hidrológicos.....	24
2.1.3 Estrutura dos modelos precipitação-vazão.....	26
2.2 CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS.....	27
2.2.1 Calibração Manual.....	28
2.2.2 Calibração Automática.....	29
2.2.3 Otimização.....	30
2.2.3.1 Função Objetivo	32
2.2.3.2 Otimização local e otimização global.....	32
2.3.1 Métodos de calibração por otimização mono-objetivo.....	33
2.3.1.1 Programação Linear	33
2.3.1.2 Programação não linear	35
2.3.2 Métodos de Calibração por otimização multiobjetivo.....	37
2.3.2.1 Algoritmos Genéticos	39
2.3.2.2 Modelos estatísticos	40
2.3.2.2.1 Calibração dos modelos hidrológicos através da metodologia GLUE.....	41
2.3.2.3 Análise de Sensibilidade e Incerteza	44
2.4 VALIDAÇÃO	48
3 MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	49
3.1.1 Relevo	52
3.1.2 Solo	53
3.1.3 Geologia	53
3.1.4 Geomorfologia.....	54
3.1.5 Vegetação	55
3.1.6 Uso do solo	56
3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS	58
3.2.1 Levantamento topográfico	58
3.2.2 Monitoramento fluviométrico	59
3.2.2.1 Suporte para os linígrafos	60
3.2.2.2 Linígrafos	62
3.2.3 Monitoramento Pluviométrico	65
3.2.3.1 Pluviógrafos (Rainfall Sensor Onsetcomp)	65
3.2.4 Eventos.....	67
3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO	70
3.3.1 Planos.....	71
3.3.1.1 Sub-bacias	71
3.3.2 Precipitação.....	73
3.3.3 Infiltração	75
3.3.4 Interceptação e Evaporação	77
3.3.5 Propagação do escoamento.....	77

3.3.2 Canal	80
3.3.2.1 Geometria do canal.....	81
3.3.2.2 Propagação do escoamento.....	82
3.3.2.3 Contribuição Lateral.....	82
3.4 VARIÁVEIS DE ENTRADA DO MODELO	83
3.5 VARIÁVEIS DE SAÍDA	83
3.6 PARÂMETROS FÍSICOS.....	84
3.7 AJUSTE DO MODELO.....	84
3.7.1 Equifinalidade.....	85
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	89
4.1 ANÁLISE ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO.....	89
4.2 TRÊS SUB-BACIAS	90
4.2.1 Cálculo da Probabilidade – Critério de Avaliação.....	93
4.2.2 Combinação das probabilidades adotadas.....	97
4.2.3 Análise de Sensibilidade dos parâmetros	100
4.3 DEZ SUB-BACIAS	102
4.3.1 Cálculo da Probabilidade – Critério de Avaliação.....	105
4.3.2 Combinação das probabilidades adotadas.....	108
4.3.3 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros.....	111
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	114
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
ANEXO A.....	126
ANEXO B.....	130

1 INTRODUÇÃO

As elevadas taxas de crescimento populacionais urbanas observadas nos países em desenvolvimento são responsáveis por significativas mudanças sobre o meio ambiente. No Brasil, várias cidades apresentam população superior a 1 milhão de habitantes, como Goiânia, e várias pequenas cidades apresentam densidade populacional alta e crescimento rápido. No entanto, as megacidades como São Paulo, Porto Alegre e Curitiba, que apresentam mais que 2,5 milhões de habitantes, estão mostrando estabilidade (CAMPANA & TUCCI, 2001) e/ou queda da densidade populacional, já que atualmente muitos casais têm menos filhos e também, devido ao processo de envelhecimento da população.

Apesar da suave estabilidade da densidade populacional observa-se ainda um aumento da ocupação das áreas urbanas, sem distinção quanto ao tipo de uso do solo (comercial, residencial, industrial), ocasionado pela melhoria da renda da população e diminuição do tamanho das famílias o que provoca uma redução da densidade populacional, porém, aumenta a extensão das áreas impermeabilizadas. Esta ocupação desenfreada de áreas urbanas simboliza a falta de planejamento urbano.

Conforme Canholi (2008), todo espaço urbanizado, anteriormente destinado ao armazenamento natural em áreas permeáveis, são substituídos, em sua maioria, por áreas impermeáveis, resultando em escoamento superficial excessivo e subsequentemente acentuando um problema local para novas áreas à jusante. Este problema associa-se ao frequente efeito da canalização dos mananciais urbanos que ocorrem em consequência da elevação e frequência dos níveis das cheias.

A crescente quantidade de áreas impermeabilizadas aliada ao aumento populacional altera a disponibilidade e a distribuição dos recursos hídricos e suas consequências não são inteiramente conhecidas. Sabe-se que ocasionam modificações no ciclo hidrológico, qualidade das águas e principalmente, na drenagem urbana. Silveira (1997) concluiu que a relação causa-efeito entre a urbanização e o aumento das precipitações, se não é comprovada, não quer dizer que não seja a hipótese mais provável. Para Alcântara *et al* (2002) os resultados da urbanização sobre o clima, principalmente os impactos hidrológicos, são de pequena escala, no entanto a longo prazo, podem introduzir alterações significativas no balanço hídrico.

Sob a ótica de planejamento urbano, a desatenção do Poder Público e a inexistência de Planos Diretores de Drenagem Urbana, que fundamentem planejamento com base

legal e administrativa, e que venham a solucionar os problemas da bacia hidrográfica perante a urbanização se expressa de maneira insatisfatória sobre a infraestrutura urbana destinada aos recursos hídricos e os sistemas de drenagem. Assim, os sistemas de drenagem que trabalham sob condições não planejadas, tornam-se ineficientes e de alto custo.

O intuito de prever e minimizar os impactos da urbanização e da impermeabilização sobre os mecanismos de drenagem urbana é uma das razões para que os modelos hidrológicos fossem desenvolvidos.

1.1 Importância do estudo

De acordo com Meller (2004) perante o desenvolvimento tecnológico existe a necessidade de incorporação de ferramentas para desenvolver planos de ações preventivas e corretivas da drenagem urbana de maneira integrada na bacia. Neste contexto, a modelagem matemática ligada à informatização mostra-se eficiente, já que permite entender o comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia. Os modelos para simulação da drenagem urbana podem promover uma análise abrangente nos vários campos da drenagem urbana, através da vinculação de diversos modelos numa estrutura modular.

A modelação destaca-se como uma ferramenta importante no que tange às questões hídricas e hidrológicas, e principalmente, na avaliação de cheias de projeto, pois possibilita uma ampla abordagem sobre os principais mecanismos e interações que se desenvolvem em uma área urbana. Os modelos hidrológicos permitem representar a fundamentação teórica, a disparidade espacial, a variabilidade temporal, considerando as características da bacia, como o solo, a vegetação, a topografia e os eventos chuvosos.

A avaliação e a comparação dos méritos de alguns desses modelos têm sido relatados na literatura, no entanto, devido a inúmeras variáveis envolvidas na avaliação e sua natureza subjetiva, o modelador enfrenta a dificuldade em conhecer as vantagens (dimensionar e prever cenários de planejamento, preencher falhas de dados observados, analisar os efeitos resultantes da modificação do uso do solo na bacia, prever variáveis hidrológicas em tempo real, entre outras) e desvantagens (restrição na aplicação do modelo relacionada com o problema de escala, calibração, validação e incerteza inerentes aos valores dos parâmetros e dados de entrada, combinação de conceitos,

sistemas de equações que originam erros difíceis de serem eliminados) relativas dos vários modelos propostos para a gestão urbana de águas pluviais (AGYEI et al, 1981).

Para Bastos (2007) o conhecimento dos parâmetros utilizados nos modelos para representar os processos hidrológicos é de grande importância, no entanto, alguns não são mensuráveis ou podem ser difíceis de serem determinados em campo, pode ocorrer ainda, falta de informação sobre a bacia e informações desatualizadas. Neste sentido, utiliza-se a calibração, que permite ajustar os parâmetros de acordo com os dados observados.

A calibração pode medir os desvios entre os dados observados e os dados estimados através da minimização ou maximização das funções objetivo. Sabe-se que na modelagem hidrológica os objetivos são conflitantes, ou seja, várias respostas podem atender aos objetivos, por isso, uma única solução não seria satisfatória. Para resolver todos os conflitos visualizados no modelo, utiliza-se o modo multiobjetivo, que se mostrou bastante confiável de acordo com um levantamento de estudos desenvolvidos em uma década por Efstradiadis & Koutsoyiannis (2010).

Neste trabalho um modelo de simulação quantitativa de transformação chuva-vazão será desenvolvido para eventos discretos incidentes na bacia do córrego Botafogo no município de Goiânia. Sabe-se que modelos computacionais como o Storm Water Management Model (SWMM) e o Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) podem ser utilizados para a mesma finalidade, no entanto, esses modelos não consideram a contribuição lateral do canal de maneira contínua, apenas pontual. Este aspecto é importante na análise de sistemas brasileiros, visto que o sistema de drenagem existente não é capaz de absorver toda água gerada, fazendo com que grande parte do escoamento ocorra fora das galerias chegando ao canal de forma difusa.

1.2 Objetivo Geral

Esta dissertação visa desenvolver um modelo hidrológico, conceitual, na reprodução do processo de transformação chuva-vazão, pelo método da onda cinemática, aplicado a bacia hidrográfica do Córrego Botafogo, na cidade de Goiânia – GO.

1.3 Objetivos Específicos

Para o cumprimento do objetivo geral fez-se necessário à definição de alguns objetivos específicos. São eles:

- Desenvolver um programa no ambiente MATLAB;
- Desenvolver um processo de calibração empregando a metodologia GLUE e avaliar a aplicação da metodologia GLUE no ajuste de parâmetros;
- Projetar estruturas metálicas para a proteção de equipamentos que forem utilizados em campo;
- Desenvolver um método de leitura das vazões;

1.4 Estrutura do documento

No segundo capítulo, consta a revisão bibliográfica sobre os modelos hidrológicos e a calibração, com âmbito sobre: o histórico dos modelos, suas características, suas utilizações e classificações. Bem como os tipos de calibração, otimização (mono e multiobjetivo), metodologia GLUE, análise de sensibilidade e incerteza e validação.

O terceiro capítulo descreve a metodologia empregada, o desenvolvimento do software, definição dos dados e parâmetros do modelo, a calibração e as áreas de estudo, com suas localizações, climas, tipos de solos, relevos, usos e ocupações do solo.

O capítulo quatro demonstra os resultados das simulações para vazão.

E por fim, o capítulo cinco, traz as conclusões e recomendações para futuras pesquisas e estudos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conceitos sobre modelos hidrológicos

De acordo com Cadier *et al.* (1987), modelo hidrológico é a representação de algum objeto ou sistema numa forma ou linguagem de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Esta definição requer uma análise mais aprofundada sobre o tema hidrológico.

Tucci (1998) define modelo hidrológico como uma ferramenta utilizada para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

De maneira geral, um modelo hidrológico é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Os parâmetros mantêm seu valor inalterado durante todo o processo estudado. Assim, um parâmetro possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que ele não possa variar espacialmente. Os modelos hidrológicos precipitação-vazão apresentam parâmetros que caracterizam determinada bacia e necessitam ser ajustados com os dados observados de vazão (COLLISCHONN & TUCCI, 2003). Por outro lado, as variáveis podem mudar ao longo do tempo que o modelo estiver sendo executado (RENNÓ & SOARES, 2000).

Para Rennó & Soares (2000), num modelo, podem ser distinguidos três tipos de variáveis. A primeira, chamada variável de estado, representa o foco de estudo do modelo. O estado de um sistema pode ser descrito apenas checando-se o valor de cada variável de estado. O segundo tipo de variável num modelo é a variável processo, também chamada de fluxo. Os fluxos são representados pelas entradas e saídas das variáveis de estado. O terceiro e último tipo é a variável forçante que é usada no modelo, mas não é calculada por ele e, dessa forma, a variação desta variável deve ser explicitada para o modelo. Esta variável pode representar um fluxo (fluxo forçante) ou um estoque externo ao modelo (estoque forçante) que alimenta o modelo funcionando como um propulsor.

Para Singh (2002) os modelos precipitação-vazão podem ser realizados dentro de um quadro puramente analítico, baseado em observações das entradas e saídas para uma área de captação. A captação é tida como caixa preta, sem qualquer referência aos processos internos que controlam a precipitação para a transformação em vazão.

Dessa forma, é possível afirmar que modelos hidrológicos são ferramentas desenvolvidas para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas.

2.1.1 Históricos dos modelos hidrológicos

Um dos métodos mais antigos e conhecidos para a determinação da vazão máxima de escoamento superficial a partir de dados de chuvas é o método racional, que foi apresentado pela primeira vez, em 1851 por Mulvaney e usado nos Estados Unidos por Emil Kuichling, em 1889. No entanto, este método é utilizado para pequenas bacias, com área de, no máximo, 500 ha. De forma geral, limita-se a aplicação do método racional para bacias de 2 km² e, não raro, 5 km² de área, reproduzindo as recomendações atualmente aceitas na literatura (TUCCI, 2000; PINTO *et al.*, 1975; LINSLEY & FRANZINI, 1964).

O método racional parte do princípio de que a vazão máxima, provocada por uma chuva de intensidade uniforme e constante, ocorre quando todas as partes da bacia contribuem simultaneamente com escoamento na seção de deságue. Porém, o método despreza o armazenamento de água na bacia, às variações da intensidade de precipitação e do coeficiente de escoamento superficial durante a precipitação. Outra barreira do método é que ele não permite caracterizar o volume de escoamento superficial e a distribuição temporal das vazões, e sim a vazão de pico ou vazão máxima de escoamento superficial.

Os modelos que surgiram posteriormente ao método racional, descreviam os processos de cada componente do ciclo hidrológico, como o Modelo Muskingun e Puls (PULS, 1928) para o escoamento em reservatório e armazenamento, respectivamente; infiltração, por Horton na década de 30 (HORTON, 1933) e o escoamento em rios, por McCarthy (1939).

Na década de 1950, o aumento do investimento econômico em infraestrutura no pós-guerra, levou a construção de aproveitamentos de recursos hídricos, drenagem de cidades e de rodovias, controle de enchentes, melhorias e avanços no setor de saneamento, entre outros. Assim, com o aparecimento dos computadores, surgiram modelos hidrológicos que reuniam os processos para descrever a transformação da precipitação em vazão, como o modelo SSARR (ROCKWOOD, 1958). Os objetivos do

modelo eram simular o processo hidrológico e a regularização de vazão no rio Columbia, que corta o Canadá e os Estados Unidos da América.

As duas décadas seguintes introduziram modelos que contribuíram com características singulares como o Stanford IV (CRAWFORD & LINSLEY, 1966) que buscou detalhar todos os processos da bacia com discretização temporal de 15 minutos e inicializou o uso da distribuição espacial da avaliação da infiltração. Outros modelos utilizados datados da mesma época são: Modelo de Dawdy e O'Donnell (1965), MIT (HARLEY *et al.*, 1970), SWMM (METCALF & EDDY, 1971), Ibbitt (1973), Modelo Mero (CLARKE, 1973), HEC (1974), todos de uma maneira geral, buscaram a otimização dos parâmetros de um modelo hidrológico, entre outros. Surgiram a partir de então, variadas combinações de diferentes métodos e modelos, e cada um buscava atingir os melhores resultados ou os melhores ajustes de parâmetros. Beven (1989) e Grayson (1992a, b) publicaram artigos sobre as variadas adversidades enfrentadas pela modelagem hidrológicas desde 1960. Entre elas, destaca-se a necessidade de dados que dificilmente são encontrados, além de um grande número de parâmetros empíricos. Como consequência, os fenômenos são retratados por formulações baseadas em parâmetros fundamentados na experiência e que possuem apenas relação qualitativa com as características físicas da bacia.

Após a década de 80 as novas versões dos modelos hidrológicos tinham as seguintes características: (a) atender os objetivos específicos, (b) reduzir o número de parâmetros para agilidade na aplicação e (c) obter resultados com informações limitadas. Esses modelos passaram a ser chamados de determinísticos e consideram a bacia homogênea no tempo.

Porém, a noção de que a bacia hidrográfica e os recursos hídricos não são estacionários e que a variabilidade do seu comportamento é grande, permitiram uma discretização mais detalhada da bacia, incorporando as simulações mais físicas dos processos. Esse estabelecimento de parâmetros e características físicas visava: (a) estimar o escoamento para cenários relativos ao uso do solo e (b) estimar o escoamento em bacias sem dados de vazão. Os modelos de detalhamentos físicos passaram a ser conhecidos como físicos – distribuídos, neste grupo encontram-se: ANSWERS (Area Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation) – (BEASLEY & HUGGINS, 1981), InfoWORKS CS (1982), SHE (System Hydrologic European) (ABBOTT *et al.*, 1986) entre outros.

No início década de 90 e 2000 merecem destaque os modelos como: KINEROS (WOOLHISER *et al.*, 1990), TOPMODEL (BEVEN *et al.*, 1995), MOUSE (2003), entre outros. Viessman Jr & Lewis (1996) classificaram os modelos de acordo com suas características:

- Modelos conceituais: são aqueles que levam em consideração os processos físicos utilizados nas funções, geralmente utilizam a equação da continuidade, associada a uma ou mais equações empíricas que relacionam variáveis e parâmetros dos processos.
- Modelos empíricos: são aqueles que se ajustam aos dados calculados e observados através de funções empíricas, utilizam equações sem relação com os processos físicos na bacia.
- Modelos físicos-distribuídos: utilizam as equações de continuidade e dinâmica dos processos envolvidos, integrado dessa forma, a descrição de todos os processos físicos que ocorrem na bacia.

Cabe ressaltar ainda a pesquisa desenvolvida por Beven & Binley (1992) que consistiu em uma metodologia alternativa para a análise da incerteza dos modelos hidrológicos, o método GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*), baseado em simulações utilizando o procedimento de Monte Carlo, fundamentado no conceito de equifinalidade. Seguindo uma proposta semelhante Kuczera & Parent (1998) apresentaram o algoritmo Metropolis (METROPOLIS *et al.*, 1953) para a análise da incerteza da resposta de modelos hidrológicos.

A busca por modelos cada vez mais eficientes e ágeis prevalece atualmente, mas existem ainda muitas dúvidas sobre o futuro da modelagem hidrológica.

2.1.2 Utilização de modelos hidrológicos

Uma das aplicações dos modelos é servir para a melhor compreensão do comportamento dos fenômenos hidrológicos na bacia, entendendo os elementos e a sensibilidade das variações para bacias com diferentes características.

Outros aproveitamentos envolvem previsão de vazão em tempo real, efeitos resultantes da modificação do uso do solo e ainda, como antevistas de cenários de planejamento, abrangendo a realização de prevenções, considerando as implicações de planos alternativos. Os modelos são utilizados ainda para análise de consistência e preenchimento de falhas, para identificar lacunas e precisar as incógnitas relações do

sistema estudado, buscando delinear pesquisas futuras e desenvolvimento de enunciados e teorias de sistemas hidrológicos.

A utilização e aplicação de modelos hidrológicos foram impulsionadas pela divulgação de pacotes de programas que permitem fácil acesso, no entanto, a metodologia nem sempre é compreensível, assim como as suas vantagens e limitações (MELLER, 2004).

Os modelos podem ser aplicados para descrever a distribuição espacial da precipitação, as perdas por interceptação, evaporação, depressão do solo, o fluxo através do solo pela infiltração, percolação e água subterrânea, escoamento superficial, subsuperficial e no rio (TUCCI, 1998).

Atualmente, vários modelos matemáticos detalhados estão disponíveis para prever a qualidade, a quantidade e as características das águas pluviais nos sistemas de drenagem urbana.

Andreássian *et al* (2001) afirmam que os modelos de transformação precipitação- vazão são aproximações da realidade e nenhum deles é capaz de representar plenamente o processo. Afirmam que o campo real de precipitação é impossível de ser atingida, no entanto, acreditam que os estudos de sensibilidade devem considerar a análise de uma chuva média na área, calculada com base de dados consistentes que possa ser transformada em escoamento. Para tal transformação os autores defendem o emprego de uma rede de pluviômetros.

Para as três bacias estudadas por Andréassian *et al* (2001) foram observados dois comportamentos típicos: a) os parâmetros convergem para o aumento da eficiência de Nash-Sutcliffe – que classifica uma amostra de modelo de desempenho, através de medidas de probabilidade diferentes – e b) apresentam um comportamento errático, onde a melhoria nos índices de estimativa de chuva parece não influenciar no comportamento dos parâmetros. As possíveis causas do segundo acontecimento podem se dar, devido a super parametrização ou falhas estruturais dos modelos. Segundo os autores, o número de tamanhos de bacia estudados não foi suficiente para estabelecer relações entre o tamanho da bacia e a precisão das estimativas de chuvas médias em área.

Garcia e Paiva (2005) por meio do modelo SWMM, observaram que os grupos de parâmetros calibrados para eventos com faixas similares de intensidade de precipitação apresentaram resultados melhores que o grupo com os parâmetros médios de todos os eventos. Os eventos de baixa intensidade de precipitação apresentaram uma perda na

qualidade da calibração quando utilizados os parâmetros médios de todos os eventos. A calibração realizada para um conjunto de eventos de características semelhantes apresentou melhores resultados do que a calibração obtida para eventos de características diferentes, mesmo que em maior número.

Métodos para reduzir o volume de escoamento e a taxa máxima de escoamento são necessários para solucionar problemas e beneficiar a utilização de modelos avançados. O desenvolvimento das estratégias de gestão para grandes bacias hidrográficas é complexo quando a rede de fluxo possui grandes proporções, como afirmaram Barco *et al* (2008) para a modelagem da bacia hidrográfica do rio Ballona (Los Angeles - EUA).

Na prática, a aplicação bem sucedida dos modelos, principalmente, os de previsão de fluxos futuros ou para a concepção de sistemas de drenagem urbana são dependentes de calibrações precisas, ou seja, estimativa precisa de seus parâmetros.

2.1.3 Estrutura dos modelos precipitação-vazão

Os modelos de transformação precipitação – vazão surgiram com a necessidade da obtenção de séries hidrológicas de vazões mais longas e representativas para projetos de recursos hídricos.

Segundo Tucci (2005) a estrutura atual dos modelos hidrológicos precipitação – vazão é baseada nos seguintes elementos:

1) Discretização da bacia hidrográfica: os modelos empregam critérios de subdivisão espacial para representar a bacia. E podem ser:

- Concentrado: toda a bacia é representada por uma precipitação média e os processos hidrológicos por variáveis concentradas no espaço.
- Distribuído por sub-bacias: o modelo permite a subdivisão da bacia em sub-bacias, conforme a drenagem principal da mesma.
- Distribuído por módulos: realizada por formas geométricas sem relação direta com a forma da bacia, mas caracterizando internamente os componentes do processo.

2) Variáveis de entrada: as variáveis mais frequentemente utilizadas são precipitação e evapotranspiração.

- Precipitação: é a principal variável de entrada. Apresenta limitações quanto à falta de dados, tamanho das séries e densidade de postos. Uma das principais fontes de erro do uso destes modelos é a incerteza nas precipitações.

- Evapotranspiração: apesar de existirem poucos dados a respeito da evapotranspiração, é possível fazer uma estimativa da mesma através de informações climatológicas.
- 3) Estrutura básica da integração dos processos:** processos que integram a representação da parte do ciclo hidrológico estudado. Esta é separada em dois módulos:
- Bacia: o balanço vertical dos fluxos e o escoamento na sub-bacia são simulados.
 - Canal: o escoamento em rios, canais definidos, propagando a vazão de montante e recebendo contribuição da bacia são simulados.
- 4) Aquisição dos dados físicos das bacias:** diversidade de características naturais e do uso do solo deriva em grande quantidade de informações a serem acrescentadas para os modelos.
- 5) Determinação dos parâmetros:** alguns parâmetros de modelo são estimados com base nas características físicas da bacia, os demais devem ser ajustados com base em observações das variáveis de entrada e de saída.

2.2 Calibração de modelos hidrológicos

À medida que os modelos hidrológicos tornam-se específicos e complexos, passam a exigir um maior número de dados de entrada, alguns parâmetros que caracterizam o processo da modelagem de precipitação-vazão não podem ser monitorados e nem medidos, portanto, utiliza-se a calibração para que os mesmos possam ser estimados, um exemplo, é a taxa de infiltração do solo, que necessita de parâmetros como diferença do teor de umidade e frente de umedecimento do solo, valores difíceis de serem adquiridos em campo, e que possuem metodologia complexa.

A calibração consiste em atribuir valores aos parâmetros, de maneira a promover o ajuste às respostas esperadas do modelo. A calibração do modelo visa obter um bom ajuste entre os dados observados (medidos) e estimados (calculados pelo modelo), por meio da variação dos parâmetros (coeficientes) do modelo.

No caso dos modelos precipitação-vazão, o processo usual consiste em um ajuste da hidrógrafa calculada pelo modelo à observada. Um dos trabalhos pioneiros a ser citado é o de Nash & Sutcliffe (1970).

A calibração pode ser definida também como o processo através do qual os parâmetros de determinado modelo são ajustados tendo como base a minimização de uma função objetivo, função da série utilizada e dos valores calculados pelo modelo.

Porto *et al* (2008) relata que várias funções objetivos podem ser utilizadas durante o processo de calibração, cabe ao usuário escolher a que melhor se adéqua ao problema em questão. Se existe apenas uma função a ser analisada, então, o objetivo da calibração é único, se existem funções objetivos diferentes, as mesmas podem ser combinadas e tornar a calibração multiobjetivo. Esta combinação pode ocorrer da seguinte forma: programação por metas, método das restrições, ponderação por pesos, entre outros. Porém, estas técnicas são subjetivas e omitem a competição entre os critérios.

A calibração pode ser feita manualmente, pelo método de tentativa e erro, o que demanda muito tempo do modelador, no entanto, lhe fornece melhor entendimento do modelo, ou automaticamente, que torna o processo mais ágil e vantajoso.

Uma vasta discussão sobre a calibração manual e a calibração automática é apresentada por Yapo *et al* (1998), Diniz (1999) e Collischonn (2001).

2.2.1 Calibração Manual

O método de tentativa e erro permite testar diferentes conjuntos de parâmetros, prosseguindo nesta operação, até alcançar um vetor de parâmetros que, quando utilizado no modelo, possa tanto quanto possível representar a resposta natural da bacia àquela precipitação.

O método de tentativa e erro pode ser ainda uniparamétrico ou multiparamétrico. No primeiro caso, tem-se apenas um parâmetro para calibrar, caso o valor calculado e monitorado esteja suficientemente próximo, considera-se o modelo calibrado; caso contrário, estipula-se outro valor para a constante e novamente testa-se a adequação desta, rodando o modelo e comparando os valores calculados e medidos. Este processo iterativo prossegue até que modelo seja considerado calibrado. Obviamente este método apresenta dificuldade quando se deseja calibrar um modelo com grande número de constantes (multiparamétrico). Nestas situações o número de combinações possíveis entre os parâmetros cresce demasiadamente, o que torna o processo de calibração prolongado e cansativo.

2.2.2 Calibração Automática

A calibração automática passou a ser bastante utilizada pelo fato de proporcionar maior rapidez, conforto e menor subjetividade ao processo. No método automático a busca por um vetor adequado de parâmetros, ocorre através de métodos matemáticos de otimização, podendo ser obtida pela minimização (ou maximização) de uma função objetivo que mede o desvio entre as séries de vazão observada e simulada. A função objetivo é a representação matemática desta diferença, e a calibração busca um vetor de parâmetros representativo, capaz de achar o ponto ótimo da função. A cada passo, o algoritmo calcula novo valor da função objetivo, compara com o último valor calculado e segue na direção do valor ótimo para a função objetivo, quando então se verifica a convergência, encerra-se o processo iterativo. O processo termina ao ser encontrado um ponto ótimo da função (TUCCI *et al.*, 1981; GERMANO *et al.*, 1998).

As primeiras técnicas de calibração automática, como o método univariacional e o de variação de coordenadas (ROSENBROCK, 1960), receberam críticas e foram considerados métodos de busca local, ou seja, mais de um conjunto de parâmetros poderia ser considerado como resposta. Para tanto, três conceitos importantes devem ser levados em conta na calibração de modelos hidrológicos: (a) Equifinalidade; (b) Parcimônia; (c) Representatividade dos dados utilizados (BEVEN & BENLEY, 1992).

Quando vários conjuntos de parâmetros dispostos de forma adequada fornecem a resposta desejada ocorre a equifinalidade, enquanto a parcimônia objetiva representar um modelo com a menor quantidade de parâmetros possíveis, visando um melhor ajuste do modelo e os dados necessitam ser representativos, ou seja, precisam descrever o problema estudado (BEVEN & BENLEY, 1992). Segundo Beven (2001) o problema da equifinalidade da modelagem ambiental é endêmico, então uma abordagem baseada na falsificação do modelo requer estratégias bem elaboradas e com teor científico para a definição de hipóteses e programas de coleta de dados para o refinamento do espaço do modelos viáveis.

O grande desafio da calibração de um modelo hidrológico é que não existe um conjunto de parâmetros que represente todos os processos hidrológicos, já que ocorrem incertezas referentes aos dados, redução significativa do modelo e figuração dos parâmetros.

Diferente de Beven, Abbaspour (2005) relata que um modelo é considerado calibrado se: 1) apresenta propagação de incertezas dos parâmetros de 95% entre o

percentis 2,5 e 97,5 dos parâmetros e abrange mais de $x\%$ de dados medidos (isto é, $(100 - x\%)$ dos dados são tratados como discrepantes), e 2) a distância média entre os percentis de previsão de 2,5 e 97,5 é menor do que o desvio padrão da medida dos dados. Se, os dois critérios acima são atingidos e ocorre um R^2 significativo (e/ou coeficiente de Nash-Sutcliffe) entre a melhor simulação e os dados medidos para a calibração de um conjunto de dados, em seguida, o modelo pode ser considerado calibrado.

Confesor & Whittaker (2007) utilizaram a calibração automática por meio do SWAT (Soil and Water Assentment Tool) para otimização de duas funções objetivos conflitantes, para um modelo hidrológico semi-distribuído e contínuo de uma bacia.

Barco *et al* (2008) realizaram a calibração automática dos parâmetros por meio do SWMM (Storm Water Management Model) para uma bacia urbana. O procedimento de otimização utilizou um método complexo e foi incorporado para estimar parâmetros de escoamento. Foram utilizados dados de 10 eventos tempestivos para a calibração e validação. O modelo calibrado previu os resultados observados com precisão razoável.

Enfim, a calibração é um problema de infinitas soluções igualmente possíveis já que existem mais equações do que incógnitas, podendo existir soluções que atendam às equações, mas não representam a realidade lógica do problema e mesmo dos valores esperados dos parâmetros. De outro lado, existirão várias soluções que possuem justificativa técnica e resposta adequada para o problema, e entre as quais não é possível, em geral, distinguir a mais aceitável ou melhor (COLLINSCHONN & TUCCI, 2003).

Para obter uma otimização dos parâmetros faz-se o uso da calibração multiobjetivo. Na etapa da otimização, existem problemas nos quais existem vários objetivos a serem alcançados.

2.2.3 Otimização

É a busca do valor de uma variável ou de n variáveis, que proporcionem o melhor resultado para uma função dependente destas variáveis, dentro de um objetivo e obedecidas as restrições. A função objetivo e as restrições são representadas por expressões matemáticas em função das variáveis de decisão.

Não existe, porém, um procedimento de otimização geral que possa resolver eficientemente qualquer tipo de problema. A maioria das técnicas depende da forma e

propriedades matemáticas da função objetivo e restrições (DAHLQUIST & BJORCK, 1974; MATEUS & LUNA, 1986).

As técnicas de otimização podem ser classificadas de acordo com o tipo de função objetivo e suas restrições:

- Otimização sem ou com restrições: no primeiro caso, encontram-se os métodos que resolvem a otimização da função objetivo em que as variáveis não têm limitação de variação. No segundo, os métodos que aperfeiçoam problemas em que as variáveis possuem restrições.
- Função objetivo e restrições linear ou não-linear: a programação linear ocorre pelo método simplex e é preparada para resolver a função objetivo e restrições que são expressões lineares. A programação quadrática resolve problemas onde a função objetivo é quadrática e as restrições não lineares.
- Função explícita ou implícita: quando a função objetivo é expressa com relação às variáveis a serem otimizadas ela é explícita e, implícita, caso contrário.

A dificuldade da otimização se dá através da maximização ou minimização de uma função definida sobre um determinado domínio. A otimização significa o valor ótimo obtido sobre um domínio infinito. O desafio da programação linear e não linear é justamente otimizar funções num domínio infinito, definido em um conjunto de expressões, envolvendo a maximização e a minimização, como a expressão (CAIXETA FILHO, 2001):

$$\begin{aligned} & \text{Otimizar } f(x) \\ \text{Sujeito à } & \begin{cases} g_i(x) =, \leq, \geq b_i, \\ x_j \geq 0 \end{cases} \\ & i = 1, 2, \dots, m \\ & j = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Sendo $f(x)$ a função a ser otimizada (maximizada ou minimizada); $g_i(x)$, ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) restrições do modelo, que relacionam os recursos disponíveis; x_j ($j = 1, 2, 3, \dots, n$), variáveis de decisão do problema (denominadas incógnitas do problema); $b_i \in \mathbb{R}$, ($i = 1, 2, 3, \dots, m$) níveis de disponibilidade de recursos ou quantidade mínima a ser suprida. Quando a função $f(x)$ e $g_i(x)$, são funções lineares, sabe-se que o sistema é um problema de programação linear; caso $f(x)$ ou pelo menos uma das funções $g_i(x)$ é uma função não-linear, diz-se que o sistema é um problema de programação não-linear (HILLIER & LIEBERMAN, 1988).

2.2.3.1 Função Objetivo

Para a otimização de modelos hidrológicos é importante estabelecer as funções objetivo. A função objetivo deve ser representativa quanto à qualidade dos resultados desejados. No entanto, quando se escolhe uma função objetivo pode-se obter resultados tendenciosos, pois cada uma tem suas funções, o que poderá priorizar determinados resultados.

As principais funções objetivo que são utilizadas são as seguintes:

1) Função Quadrática

$$F1 = \sum_{i=1}^N (QO_i - QC_i)^2$$

Onde, QO_i são os dados observados; QC_i , são os dados simulados. Essa função oferece um peso maior para dados maiores.

2) Função Módulo

$$F2 = \sum_{i=1}^N |QO_i - QC_i|$$

Onde, QO_i são os dados observados; QC_i , são os dados simulados. Oferece peso maior para valores maiores.

3) Função Inversa

$$F3 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{QO_i} - \frac{1}{QC_i} \right)^2$$

Onde, QO_i são os dados observados; QC_i , são os dados simulados. Essa função oferece maior importância aos dados menores, invertendo as propriedades da função F1.

4) Função Relativa:

$$F4 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{QO_i - QC_i}{QO_i} \right)^2$$

Onde, QO_i são os dados observados; QC_i , são os dados simulados. Essa função procura retirar o peso excessivo dado aos valores absolutos da função F1, enfatizando o melhor ajuste dos valores relativos.

2.2.3.2 Otimização local e otimização global

Segundo Gupta *et al.* (1999), nos métodos de busca local, existem três elementos que devem ser levados em consideração quando se está calibrando modelos, que são:

(a) função objetivo, é a medida da diferença entre os valores observados e calculados

das vazões e representa a qualidade do ajuste do modelo, (b) algoritmo de otimização, métodos que resolvem a otimização da função objetivo em que as variáveis não têm limitação de variação (sem restrições) ou métodos que otimizem problemas em que as variáveis possuem restrições (com restrições) e (c) critério de parada, envolve a definição de critérios para aceitar uma determinada solução como o ótimo da função.

Dentre as limitações destes métodos pode-se destacar: (a) a função objetivo nem sempre retrata bem o comportamento esperado, apresentando anomalias na vizinhança de solução, (b) a solução pode convergir para parâmetros inconsistentes e podem ser irreais do ponto de vista físico, (c) o mínimo obtido pode ser local e não global, (d) quanto maior o número de parâmetros, a série terá maiores intervalos de tempo o processo pode se tornar lento e o usuário perder a noção do ótimo desejado, (e) muitas incertezas podem existir nos dados observados, as mesmas são transferidas para o ajuste o que pode ocasionar resultados absurdos, (f) interdependência de parâmetros, (g) descontinuidades da função objetivo devido às características da estrutura do modelo.

Assim, as chamadas técnicas de busca global foram desenvolvidas e hoje são bastante utilizadas. As técnicas utilizadas na busca de mínimos globais precipitação-vazão são: (a) técnicas aleatórias de pesquisa, baseada em extensivo uso de computação e na amostragem aleatória (DUAN *et al.*, 1992); (b) algoritmos genéticos: baseados em técnicas que utilizam conceitos de probabilidades associados a uma seleção “genética” dos parâmetros (FRANCHINI, 1996).

2.3.1 Métodos de calibração por otimização mono-objetivo

Os modelos de otimização são formulados para encontrar os valores de um conjunto de variáveis de decisão que otimizem (maximizem e/ou minimizem) uma função objetivo sujeita a restrições. Yeh (1985) fornece uma extensa revisão de modelos de operação e dimensionamento de reservatórios onde os métodos disponíveis são classificados em: métodos de otimização (programação linear e programação não-linear).

2.3.1.1 Programação Linear

As aplicações pioneiras da programação linear (PL) na área de recursos hídricos remontam à década de 1960, no contexto dos trabalhos do Harvard Water Resources Group, especificamente num problema de gerenciamento de água subterrânea

(BARBOSA, 1997), e tem sido uma das técnicas mais aplicadas no gerenciamento de recursos hídricos, apesar de todas as relações entre as variáveis serem lineares, tanto na função objetivo como nas funções de restrição.

De acordo com Yeh (1985) e Labadie (2004) a programação linear tem vantagens como: (a) convergir sempre para um ótimo global; (b) abstrair tratamentos de problemas complexos; (c) aplicar a teoria da dualidade bem desenvolvida para análise de sensibilidade; (d) disponibilizar códigos computacionais; (e) não requer solução inicial e (f) apresenta capacidade de tratar problemas grandes.

A forma padrão de um problema de programação linear é dada pela equação, abaixo:

$$\min F^t x$$

$$A x X = b$$

$$X \geq 0$$

Onde:

A – é a matriz m x n dos coeficientes das restrições;

X – é o vetor n-dimensional das variáveis de decisão;

b – é o vetor m-dimensional com os valores dos recursos disponíveis;

F – é o vetor n-dimensional dos coeficientes da função objetivo.

Para transformar as restrições de desigualdade (<, ≤, > e ≥) em igualdade (=) utilizam-se variáveis de folga ou artificiais, convertendo, assim, a representação do problema original para a forma padrão.

O método mais utilizado para a solução dos modelos de programação linear é o método simplex e suas variações, como simplex de Nelder e Mead (NELDER & MEAD, 1965) e o SCE – UA, Shuffled Complex Evolution (DUAN et al, 1992; DINIZ, 1999). Sua aplicação na área de recursos hídricos apresenta o número de restrições bem maior que o número de variáveis de restrição.

Ressalta-se que nem sempre o uso repetido de um algoritmo de busca local é eficaz na busca de um ótimo global, conforme o demonstrado com o MSX, em múltiplas inicializações do algoritmo simplex de Nelder e Mead (SOROOSHIAN & GUPTA, 1995).

Hermann (1971) utilizou a programação linear para dimensionar e operar sistema de vários reservatórios em uma análise comparativa com outras técnicas. Nayak *et al* (1971) utilizaram o método para minimizar a função objetivo que era o custo total do sistema de recursos hídricos. Bhaskar & Whitlatch (1987) realizaram uma comparação

entre programação linear e programação dinâmica para um reservatório, e a primeira metodologia produziu resultados aceitáveis.

Crawley & Dandy (1993) apresentaram e aplicaram um modelo determinístico de programação linear para planejamento e operação mensal do sistema de reservatórios que abastece a cidade de Adelaide, Austrália, visando à minimização dos custos de bombeamento sujeito à manutenção de níveis de armazenamento nas represas. Righetto & Guimarães Filho (2003) apresentaram um estudo preliminar da operação dos reservatórios Cruzeta e Armando Ribeiro Gonçalves, RN, via programação linear, no sentido de verificar a magnitude de oferta hídrica destes reservatórios quando se dispõe de vazão firme proveniente de fonte exógena.

Percebe-se que a programação linear é bastante utilizada na literatura, todavia, uma das dificuldades da aplicação da programação linear, nas áreas de recursos hídricos é a ocorrência de não linearidades presentes nas restrições ou função objetivo. Sendo assim, primeiramente deve-se trabalhar a linearização das funções não-lineares por partes. Quanto menores os segmentos lineares melhor será a representação da função. Outra forma de solucionar a não-linearidade é adotar procedimentos iterativos de uso da programação linear.

2.3.1.2 Programação não linear

A Programação Não-Linear (PNL) não apresenta tanto enfoque quanto a programação linear na análise de sistemas de recursos hídricos. O fato é explicado em razão de que o processo de otimização é usualmente lento, requerendo maior tempo de processamento, quando comparado com outros métodos, uma vez que a matemática envolvida nos modelos não lineares é muito mais complicada do que nos casos de programação linear (YEH, 1985). Os recursos computacionais existentes estão auxiliando e facilitando a utilização da PNL na prática de solução de problemas de sistemas de recursos hídricos, sendo já extensivamente tratada na literatura (SIMONOVIC, 1992).

Segundo Cirilo (1997), um problema de PNL pode ser escrito na forma padrão como:

$$\begin{aligned} & \min F(x) \\ & \text{sujeito} \\ & g_j(x) < 0; j = 1, \dots, m1 \\ & h_k(x) = 0; k = 1, \dots, m2 \\ & x^l \leq x \leq x^u \end{aligned}$$

Onde x é o vetor de variáveis de decisão cujos valores ótimos se deseja determinar, $F(x)$ a função objetivo, g_i , h_k , x^l , x^u representam as fronteiras, restrições e/ou limites do domínio de busca (região viável) da solução ótima.

Ainda de acordo com Cirilo (2002), a PNL pode ser classificada quanto aos métodos utilizados na solução dos problemas em:

- técnicas analíticas - as soluções ótimas são obtidas pela resolução de sistemas de equações, com apoio de derivadas, podendo a otimização ser reduzida à procura das raízes desses sistemas;
- técnicas de busca numérica - esses métodos usam informações passadas em um processo iterativo, para gerar melhores soluções no processo de otimização. Esse tipo de técnica de otimização permite ainda o emprego de métodos numéricos para resolver problemas dos quais não se conhece a solução analítica.

Os métodos para a obtenção do ponto ótimo também são estruturados de acordo com a existência ou não de restrições. São métodos de algoritmos sem restrições: Método de Newton-Rahpson, Método do Maior Gradiente, Método dos Gradientes Conjugados, Métodos Quase-Newtonianos, Método de Fletcher – Powell, Método do Hooke e Jeeves, entre outros (BRONSON, 1985; EHRLICH, 1991; CIRILO, 1997). São métodos de algoritmos com restrições: Método das Penalidades, Método das Direções Viáveis, Método da Lagrangeana Projetada (programação quadrática), Método dos Gradientes Reduzidos Generalizados, Método das Variações nas Coordenadas (BRONSON, 1985).

Apesar da maior complexidade, a grande vantagem da PNL é a sua abrangência, que oferece uma formulação matemática mais geral, não necessitando de simplificações, o que, uma vez elaborado o modelo matemático que descreve o sistema a otimizar, aumenta a precisão nos resultados a serem alcançados (CIRILO, 1997; SIMONOVIC, 1992). Como desvantagem, destaca-se a incerteza de que, em muitos casos, a solução ótima obtida não é a melhor dentre todas as soluções ótimas no espaço viável, dado à natureza de não linearidade dos problemas.

2.3.2 Métodos de Calibração por otimização multiobjetivo

O processo decisório na área de recursos hídricos envolve múltiplos objetivos e múltiplos decisores, estabelecendo conflitos de interesses entre grupos de idéias distintas acerca de metas a serem adotadas no planejamento e gestão dos recursos hídricos. A análise multiobjetivo apresenta conceitos para o tratamento e quantificação dos processos de tomada de decisão com múltiplos objetivos (BRAGA & GOBETTI, 2002).

Pappa (2002) afirmou que mesmo levando em conta essa diferença fundamental entre problemas com um ou vários objetivos sabe-se que, independente do tipo de problema a ser resolvido, no mundo real, sob o ponto de vista prático, necessita-se de apenas uma solução.

A Figura 1 demonstra o esquema de um procedimento de otimização multiobjetiva ideal. A princípio múltiplas soluções são encontradas, no entanto, uma delas pode ser selecionada e escolhida, de acordo com as necessidades do usuário. Observa-se que a otimização com apenas um objetivo é resultado da multiobjetiva.

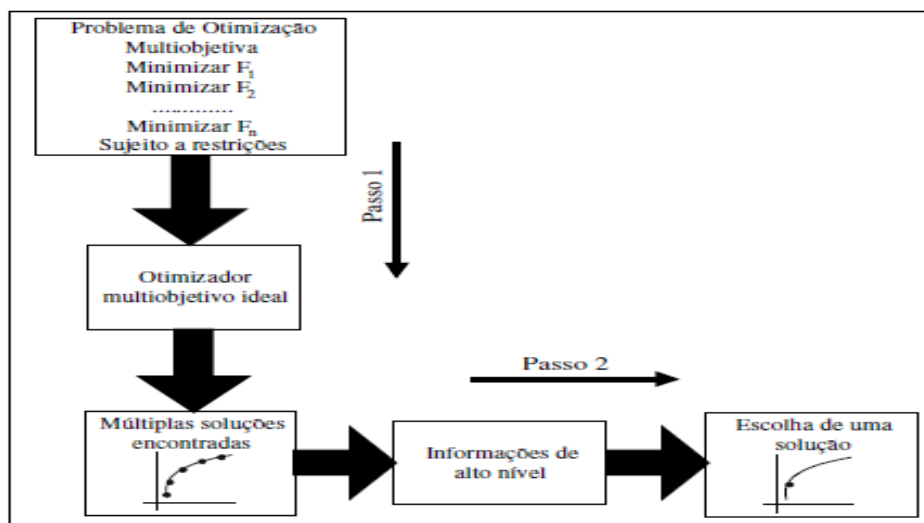


Figura 1. Otimização multiobjetiva ideal (DEB, 2001 *apud* PAPPA, 2002).

Outra forma de utilização da otimização multiobjetiva é a baseada em preferência. No método ideal, a informação do problema não é utilizada para buscar uma nova solução, e sim para escolher uma solução dentre um conjunto de soluções ótimas já escolhidas. No método da otimização baseada em preferência, a informação deve ser fornecida antes da busca ser iniciada, sem nenhum conhecimento das possíveis consequências (PAPPA, 2002), conforme a Figura 2.

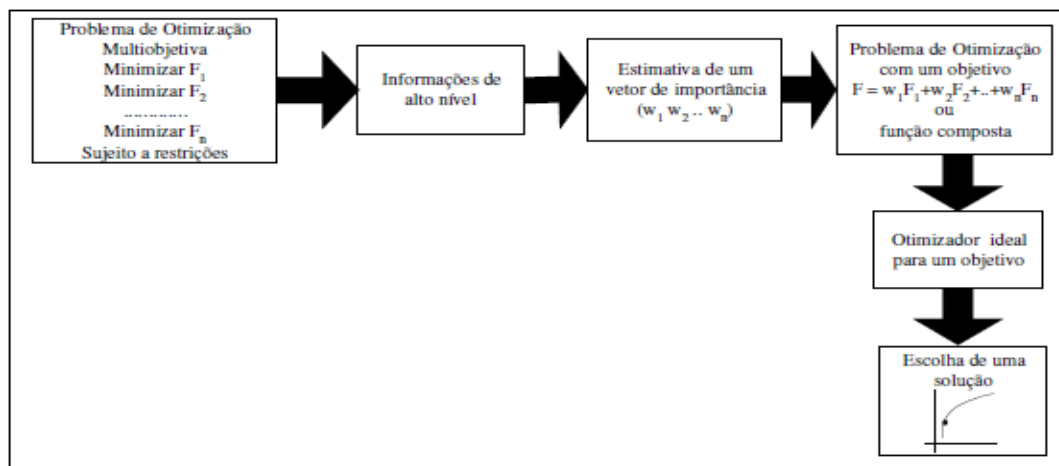


Figura 2. Otimização multiobjetiva em preferência (DEB, 2001 *apud* PAPPA, 2002).

Formiga & Chaudhry (2002) declararam que os métodos de otimização comuns trabalham tentando encontrar uma única solução ótima. No entanto, trabalhar com apenas uma perspectiva de projeto pode não ser a melhor escolha, particularmente quando essa alternativa é ótima com relação a apenas algum aspecto. Com isso, surgiram muitos métodos para converter problemas multiobjetivos em problemas com um único objetivo (DEB, 2001).

Na otimização multiobjetivo se ocorrerem diferenças suficientes entre as soluções ótimas às funções objetivo são ditas conflitantes entre si. Quando isso ocorre, um conjunto de soluções ótimas surge. A essas soluções ótimas são denominadas ótimas de Pareto.

O ótimo de Pareto pode ser interpretado da seguinte forma: um ponto no espaço de decisão variável é ótimo de Pareto, se não houver outro ponto, é considerado melhor em todos os objetivos. É obtido através de técnicas de análise de agrupamento que assegurem a concorrência local entre conjunto de variáveis de decisões (os chamados indivíduos) no espaço de variáveis de decisão e que permitem a identificação de ótimos locais separados simultaneamente. Esta propriedade preserva a diversidade e ajuda o algoritmo a convergir para encontrar ótimos (SCHAEFLI *et al*, 2004).

Nos problemas multiobjetivos o cálculo da aptidão e o processo de seleção dos indivíduos, devem considerar os múltiplos objetivos do problema. Para encontrar a região ótima de Pareto utilizando técnicas evolucionárias é necessário introduzir uma forma de busca onde soluções distintas dentro dessa zona possam ser encontradas. Para superar essa deficiência, foram desenvolvidas várias técnicas sendo que as mais utilizadas são: divisão da aptidão e restrição de recombinação, que fazem parte do grupo dos Algoritmos Genéticos.

2.3.2.1 Algoritmos Genéticos

Uma das técnicas utilizadas na busca de mínimos globais nos modelos hidrológicos precipitação-vazão é o uso dos algoritmos genéticos: baseados em técnicas que utilizam conceitos de probabilidades associados a uma seleção “genética” dos parâmetros (FRANCHINI *et al*, 1998)

O primeiro idealizador dos algoritmos genéticos (AGs) foi John Holland e ultimamente os mesmos vêm sendo utilizados para métodos de otimização. Os algoritmos genéticos (AGs) baseiam-se na seleção natural e envolvem a sobrevivência do indivíduo mais apto. São muito utilizados, já que não exigem que se encontre uma solução ótima para o problema, mas ajudam a reconhecê-la como ótima.

Os algoritmos genéticos são técnicas inspiradas na teoria de Darwin, ou seja, são técnicas de buscas baseadas na teoria da evolução, combinando a sobrevivência dos mais aptos com a troca de informações de uma forma estruturada, onde um problema do mundo real é modelado através de um conjunto de indivíduos que são soluções potenciais que melhor se ajustam ao ambiente.

Cada indivíduo na população representa uma possível solução para um dado problema, o que o Algoritmo Genético faz é buscar aquela solução que seja muito boa ou a melhor do problema analisado através da criação de população de indivíduos cada vez mais aptos levando à otimização da função objetivo.

O algoritmo genético básico é o que realiza as seguintes funções: inicializa a população de cromossomos; avalia cada cromossomo da população; cria novos cromossomos a partir da população atual (realiza cruzamento e mutação); e termina, se o critério de fim for alcançado, se não, reinicializa (HOLLAND, 1975; BITTENCOURT, 1998; SANTA CATARINA & BACH, 2003).

Diversos pesquisadores desenvolveram distintas versões de algoritmos genéticos multiobjetivos. Entre elas, destacam-se o MOGA (*Multiobjective Genetic Algorithm*) (FONSECA & FLEMING, 1993), que enfatiza soluções não dominadas e ao mesmo tempo mantém a diversidade entre elas; o NSGA (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm) (SRINIVAS & DEB, 1994) que é bastante similar ao MOGA, porém as diferenças encontram-se na maneira como a função de avaliação é atribuída ao indivíduo e na estratégia de *nicho* (PAPPA, 2002); o NPGA (*Niched Pareto Genetic Algorithm*) (HORN *et al* 1994) difere dos algoritmos descritos anteriormente, baseado em torneios de dominância de Pareto e o SPEA (*Strength Pareto genetic Algorithm*)

(ZITZLER & THIELE, 1999) une todas as potencialidades de diversos algoritmos em um único. Ele é caracterizado por armazenar em um conjunto externo P' todas as soluções não dominadas encontradas da primeira à última geração do algoritmo (PAPPA, 2002).

Yapo *et al* (1998) também atingiu um progresso expressivo com o algoritmo MOCOM (*Multiobjective Complex Evolution*) que classifica o Pareto baseado em um algoritmo simplex. Vrugt *et al* (2003) apresentou o MOSCEM (*Multiobjective Shuffled Complex Evolution Metropolis*) para avaliação de incertezas por meio de modificações do modelo Metropolis.

As duas maiores dificuldades enfrentadas para a aplicação dos AGs a problemas multiobjetivos são (ZITZLER, 1999):

- acoplar a adaptabilidade aos processos de seleção de modo a buscar a região ótima de Pareto;
- manter a diversidade da população evitando uma convergência prematura e manter uma boa distribuição das soluções ao longo da fronteira não dominada.

2.3.2.2 Modelos estatísticos

Análises estatísticas aplicadas a hidrologia consistem em: (a) estimar a frequência futura ou a probabilidade de eventos hidrológicos com base em informações contidas em registros hidrológicos e (b) relacionar variáveis hidrológicas. Em análises de probabilidade, métodos estatísticos permitem uma coordenação de observar os dados para produzir uma estimativa mais precisa de frequências futuras do que é indicado pelos dados brutos, e também fornecer critérios para julgar a confiabilidade das estimativas de frequências. Na análise de correlação, os métodos estatísticos fornecem meios para derivar a relação mais provável entre duas variáveis, e também fornecer critérios para julgar a confiabilidade das previsões ou estimativas.

Segundo Clarke (2007), a formulação de modelos é um processo iterativo, iniciando com um modelo escolhido que, por inspeção gráfica dos dados ou de outra forma, pode representar razoavelmente suas principais características. Posteriormente, determina-se onde o modelo falha nas suas intenções. As discrepâncias entre os dados ajustados e observados dará idéia de como o modelo escolhido deve ser modificado. Alterando o modelo da melhor forma é possível continuar o processo iterativo até que nenhuma melhora seja encontrada.

Dentro dos modelos estatísticos o conceito mais importante é a parcimônia, pois é o princípio que limita os parâmetros a um número pequeno que adequadamente resume as características dos dados.

Alguns programas computacionais como GLIM, GENSAT e MATLAB proporcionam um ajuste rápido de modelos estatísticos, pois apresentam recursos de linguagem de programação, além de capacidade gráfica e a possibilidade de operar com instruções simbólicas.

2.3.2.2.1 Calibração dos modelos hidrológicos através da metodologia GLUE

O método *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* - GLUE estima a probabilidade de incerteza, proposta por Beven & Binley (1992) que já foi usada em uma variedade de contextos de modelagem hidrológica com uma variedade de medidas de verossimilhança. A atualização das distribuições de probabilidade com dados de calibração se enquadra dentro do quadro Baesiano.

No método GLUE, uma distribuição de valores de parâmetros é usada para gerar os conjuntos de parâmetros aleatórios com a utilização da simulação Monte Carlo. Uma sequência de entrada é observada para cada modelo e os resultados são utilizados como os dados de calibração disponíveis. Um conjunto de parâmetros é utilizado para avaliar a aceitabilidade de cada modelo baseado nos resíduos de modelação. Qualquer método de probabilidade das Figuras 3 e 4 pode, de fato servir a esse propósito. Os únicos requisitos são de que as medidas devem aumentar conforme o bom ajustamento e os pesos baixos devem ser descartados. Os modelos devem ter uma medida de probabilidade igual a zero. Medidas de probabilidade diferentes ou combinações de probabilidades, no entanto, levam a diferentes estimativas da incerteza preditiva.

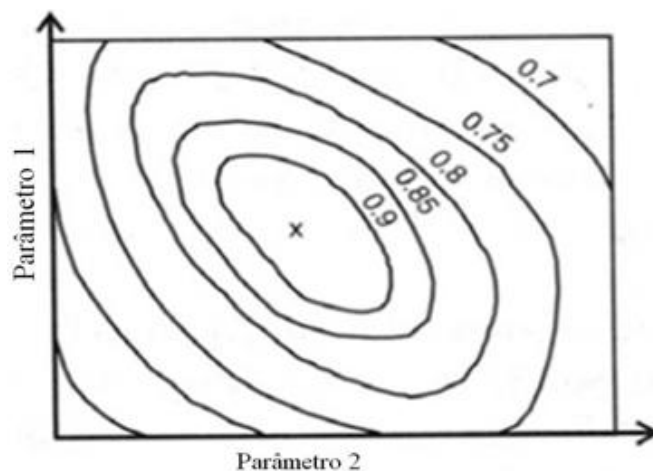


Figura 3. Superfície de resposta para duas dimensões de parâmetros com contornos bem representados (BEVEN, 2001).

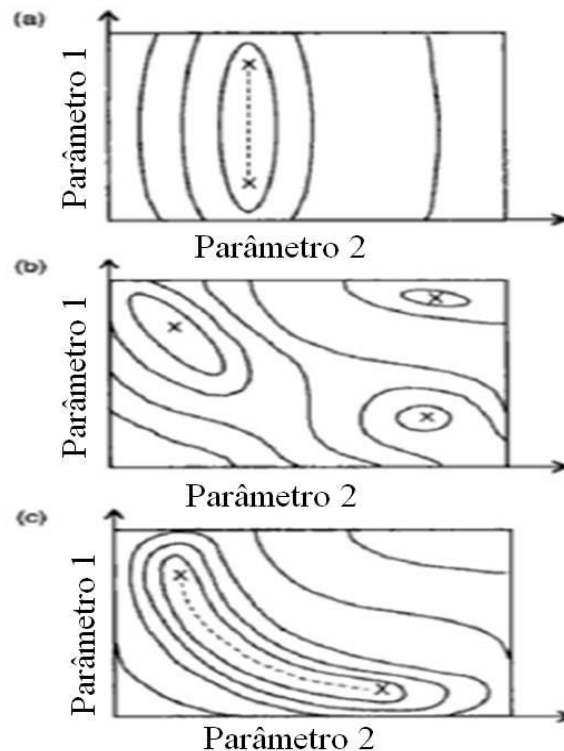


Figura 4. Mais complexas superfícies de resposta em duas dimensões de parâmetro. (a) Áreas da superfície de resposta revelando insensibilidade de ajuste a variações nos valores de parâmetro. (b) Picos múltiplos na superfície de resposta indicando um mínimo local. (c) Cristas na superfície de resposta revelando iterações de parâmetro (BEVEN, 2001).

A metodologia GLUE requer um grande número de simulações e a amostragem aleatória dos parâmetros individuais a partir de distribuições de probabilidade, utilizada para determinar um conjunto de valores de parâmetro. Os conjuntos de parâmetros individuais são caracterizados por pesos, sendo calculados e comparados com as respostas observadas utilizando a probabilidade. Conjuntos de parâmetros com pesos baixos para as probabilidades são classificados como não-comportamentais e devem ser rejeitados. Todos os outros pesos comportamentais ou aceitáveis são retidos e rescalonados, de modo que, a sua soma total cumulativa seja igual a 1. A distribuição cumulativa da probabilidade pode então ser utilizada para estimar as previsões a qualquer tempo.

A metodologia GLUE transforma o problema da busca de um parâmetro melhor definido em conjuntos de valores de parâmetros que forneçam resultados confiáveis. Esta abordagem não exige minimização ou maximização de uma função objetivo, mas o desempenho de diferentes conjuntos de parâmetros para conseguir um bom ajuste.

A diferença desta metodologia em relação as outras é que a mesma baseia-se no conceito de que, para um modelo, os conjuntos de parâmetros não representam as respostas observadas, e sim, as combinações de conjuntos de parâmetros podem representar o comportamento.

Este é o conceito de equifinalidade defendido por Beven, que sustenta que, devido aos erros inerentes à estrutura do modelo (por exemplo, devido à simplificação e agregação), erros em dados observados e à dificuldade de determinar um erro exato, é inadequado se realizar a calibração com base em um conjunto ótimo de parâmetros.

Aronica *et al* (2005) avaliaram a influência da resolução temporal da chuva sobre a incerteza da resposta de precipitação-vazão de modelagem em ambientes urbanos. A forma de comparação entre o "verdadeiro" e dados escalonados de precipitação foi levada a risca, usando um índice de desempenho não-dimensional. Simulações de Monte Carlo foram realizadas na aplicação de dois diferentes modelos de precipitação e escoamento, utilizando os dados gravados e simulando os eventos. Os resultados das simulações foram utilizados para obter, em ambos os modelos, probabilidades de descargas de pico condicionadas à observação de acordo com a metodologia GLUE.

Mantovan & Todini (2006) demonstraram a incoerência, em termos de inferência bayesiana, do GLUE. Eles afirmam que esse modelo reduz a capacidade da técnica para extrair informações, por outras palavras, para "aprender", a partir de observações. Discutem ainda as implicações desta capacidade de aprendizado reduzida para estimativa de parâmetros e avaliação da incerteza hidrológica, o que levou à definição da "equifinalidade". Estes conceitos são úteis para mostrar que a metodologia GLUE define um processo de inferência estatística, que é inconsistente e incoerente.

Beven *et al* (2008), frente a crítica sugerida por Mantovan & Todini (2006), responderam que a identificação Bayesiana formal dos modelos é um caso especial do GLUE que pode ser utilizado quando o modelador está preparado para fazer pressupostos muito fortes sobre a natureza dos erros de modelagem. Demonstraram por pequenas modificações do exemplo hipotético sugerido por Mantovan & Todini que a má especificação do erro do modelo e as não – estacionariedades relacionadas com a presença de erro de entrada e o erro estrutural do modelo na abordagem Bayesiana produziram parâmetros bens definidos, porém, distribuições incorretas, ocasionando uma falta de compreensão do conteúdo e de informação real de dados do modelo de condicionamento.

Freni *et al* (2009a) avaliaram a metodologia GLUE em várias hipóteses definidas pelo usuário na seleção de uma formulação específica da medida de probabilidade. Apresentaram uma pesquisa que visava avaliar a influência da formulação através da medida de probabilidade na avaliação de incerteza na modelagem de um sistema de drenagem urbana integrado.

Hansen *et al* (2011) e Thorndahl *et al* (2011) desenvolveram metodologias semelhantes, no entanto, aprimoraram a aquisição de dados através de tecnologias de acompanhamento em tempo real dos níveis d'água e utilizaram o modelo MOUSE para a calibração dos parâmetros.

A metodologia GLUE visa determinar as incertezas. O objetivo da incerteza é avaliar um certo parâmetro, tal como um pico de vazão de determinado evento, estando este dentro de um determinado intervalo de tempo, mas é importante notar os diferentes tipos de intervalo.

2.3.2.3 Análise de Sensibilidade e Incerteza

A análise de sensibilidade mostra que uma pequena variação no dado de entrada ocasiona uma grande variação no dado de saída, a conclusão é de que esforços devem ser concentrados na determinação confiável do dado de entrada. Existem diferentes técnicas para a análise de sensibilidade, entre elas: (a) análise informal, (b) análise de erros de primeira ordem e c) simulação Monte Carlo.

A análise de sensibilidade informal consiste em simular o modelo com diferentes valores de dados e interpretar se os resultados do modelo são sensíveis a esta variação, um exemplo é o modelo de Streeter-Phelps, esse modelo considera o escoamento permanente uniforme e simula os parâmetros DBO (Demanda Biotônica de Oxigênio) e OD (Oxigênio Dissolvido). A análise de erros de primeira ordem trabalha com coeficientes de sensibilidade, que representam a porcentagem de variação na variável de saída resultante de uma alteração de determinada porcentagem em cada variável de entrada. O método de Monte Carlo é estatístico e utilizado em simulações estocásticas com diversas aplicações. Envolve a geração de observações de alguma distribuição de probabilidades e o uso da amostra obtida para aproximar a função de interesse.

A incerteza de um modelo refere-se às variações aleatórias e aos erros de aquisição das variáveis de entrada e saída. Além dessas variações existem ainda as limitações do modelo em representar o sistema estudado e as incertezas nas estimativas dos

parâmetros. Os resultados obtidos devem minimizar as incertezas de modo que se tornem adequados aos objetivos.

As incertezas referentes à estrutura do modelo mencionam às formulações matemáticas e se as mesmas são capazes de representar os processos envolvidos.

O'Donnell & Canedo (1980) apresentaram de forma ordenada as principais fontes de incerteza consideradas quando da modelagem hidrológica, divididas em três classes:

1) Registro de dados:

- erros na coleta de dados brutos,
- informações pontuais são tomadas como médias espaciais,
- informações contínuas são referenciadas por médias temporais,
- processos de estimativa para variáveis não diretamente observadas (por exemplo, evaporação).

2) Estrutura do modelo:

- conhecimento imperfeito dos processos físicos que ocorrem na bacia,
- substituição de propriedades variáveis espacialmente na bacia por valores concentrados (por exemplo, capacidade de infiltração),
- tratamento de processos que ocorrem simultaneamente como se cada um desses processos ocorresse isoladamente,
- omissão de alguns processos que ocorrem, dados que não atendem o objetivo de uma certa modelagem.

3) Calibração do modelo:

- escolha da função objetivo,
- tamanho da amostra a ser utilizada na fase de ajuste do modelo,
- variabilidade que pode afetar o processo de calibração em virtude do uso de diferentes amostras,
- critérios para definir a convergência dos parâmetros no processo de otimização,
- dificuldades na estimação adequada dos parâmetros.

Limitações das estruturas do modelo e os dados disponíveis relativos aos parâmetros, às condições iniciais e as condições de contorno, dificultam a aplicação de um modelo hidrológico sem alguma forma de calibração ou acondicionamento de conjuntos de parâmetros do modelo.

A análise de incerteza permite obter resultados expressos em termos probabilísticos, e não como simples valores únicos determinísticos e a análise de

sensibilidade da resposta do modelo aos dados de entrada dá um indicativo da influência da incerteza nos resultados da simulação.

A avaliação da incerteza associada com um conjunto de previsões do modelo é também uma avaliação do risco de um determinado resultado que pode ser utilizado em uma análise de decisão baseada no risco.

Binley *et al* (1991) investigaram a determinação e a utilidade de uma medida de incerteza de previsão em um modelo distribuído fisicamente, utilizando os métodos de Rosenblueth e simulação Monte Carlo. O papel da incerteza preditiva na avaliação do efeito hidrológico da mudança no uso da terra também foi realizada. Os resultados do estudo sugerem que, mesmo restringindo os parâmetros através da calibração, a incerteza foi elevada e o modelo foi sensível aos efeitos da mudança de uso do solo.

Beven & Freer (2001) utilizaram a equifinalidade para modelagem precipitação-vazão através do modelo GLUE para alcançar a incerteza do modelo e verificaram que quaisquer efeitos da não-linearidade do modelo, covariação dos valores dos parâmetros e erros na estrutura do modelo, os dados de entrada ou variáveis observadas, com o qual as simulações são comparados, são tratados implicitamente dentro deste procedimento.

Ratto *et al* (2001) combinaram a técnica do GLUE com a Análise de Sensibilidade Global (GSA). O método baseia-se em avaliações de vários modelos. A GSA é um modelo de abordagem quantitativa, independente e baseia-se em estimar a contribuição de cada fator fracionário de entrada para a variância da saída do modelo, também responsável por termos de iteração. No GLUE, as execuções do modelo são classificadas de acordo com a probabilidade e o condicionamento de rodar os dados observados.

Khu & Werner (2003) utilizaram a simulação Monte Carlo e o GLUE para a estimativa das incertezas em modelos hidrológicos devido a parâmetros incertos. Uma das principais desvantagens da simulação Monte Carlo é o grande número de execuções necessárias para estabelecer estimativas fiáveis de incertezas do modelo. Para reduzir o número de execuções necessárias, um algoritmo genético híbrido e rede neural artificial, conhecida como GAANN, foram aplicados. Neste método, os AG's foram utilizados para identificar a área de importância e RNA (Rede Neural) foi usada para obter uma estimativa inicial do desempenho do modelo por meio do mapeamento da superfície de resposta. Conjuntos de parâmetros não comportamentais do modelo foram descartados antes de executar o modelo hidrológico. O método proposto foi aplicado para um modelo com dois parâmetros simples e conhecidos, assim como a captação de um

modelo amplamente usado em que os parâmetros são calculados. Os resultados de ambas as aplicações indicam que o método proposto é mais eficiente e eficaz, o que exige menor número de simulações que o modelo GLUE. O método proposto aumentou ainda a viabilidade da aplicação de análise de incerteza a modelos de simulação de computação intensiva.

Lindblom *et al* (2007) compararam a incerteza obtida através do GLUE e a incerteza obtida através do modelo reformulado para caixa-cinza das descargas de cobre nos sistemas de águas pluviais. A incerteza obtida pelo GLUE demonstrou que a massa total de cobre está prevista em um intervalo de aproximadamente +/- 50% do valor da média da massa de cobre, enquanto o modelo reformulado mostrou uma margem de incerteza de menos de 30%.

Blasone *et al* (2008) desenvolveram, através de uma aplicação, um quadro abrangente para multi-critérios de calibração e avaliação de incertezas distribuídos fisicamente e integrados aos modelos hidrológicos. Uma versão revista do GLUE com base na cadeia de Markov de Monte Carlo foi aplicada, a fim de melhorar o desempenho do método de estimação de parâmetros e distribuições de saída posterior.

Thorndahl *et al* (2008) utilizaram o GLUE para realizar análise de incerteza para o modelo MOUSE em um sistema de drenagem pluvial urbana. Ele foi utilizado para testar diferentes configurações conceituais, a fim de determinar qual a configuração proporciona ao modelo uma melhor qualidade de ajuste. A dificuldade encontrada foi de gerar bons ajustes a uma série de temporal inteira.

A metodologia do modelo GLUE em estimar a incerteza de um modelo de drenagem urbana foi utilizada a fim de obter percepções sobre o seu efeito nos resultados do modelo. O modelo foi aplicado à Savena, estudo de caso (Bologna, Itália), onde a qualidade da água e quantidade de dados estavam disponíveis. O modelo mostrou uma forte influência da seleção na aceitabilidade e confirmou a importância da experiência do modelador na aplicação da análise de incertezas do GLUE (FRENI *et al*, 2008).

Freni *et al* (2009b) compararam oito modelos com base em estudos de casos com poucos dados disponíveis para a calibração. A análise de incerteza foi então realizada utilizando três métodos diferentes: o método de Monte Carlo Bayesiano, o método GLUE pseudo-Bayesiano e o método GLUE revisto por meio de uma distribuição formal de resíduos entre o modelo e dados medidos (GLUE_f). A avaliação da incerteza dos modelos permitiu analisar as vantagens e limitações das três metodologias adotadas.

Os resultados revelaram que todos os modelos ofereceram uma boa calibração dos resultados, mesmo a fiabilidade do modelo tendo variado. Além disso, uma comparação das análises de incertezas mostrou que, em relação aos modelos avaliados, o método Bayesiano clássico é mais eficaz em modelos discriminadores de acordo com as suas incertezas, porém o GLUE executa de forma semelhante quando se baseia nos mesmos pressupostos fundamentais como o método Bayesiano.

VIOLA *et al* (2009) utilizaram o GLUE para a análise de incerteza da modelagem precipitação-vazão para uma bacia mediterrânea. O desempenho dos conjuntos de parâmetros também foi avaliado por meio de três medidas de verossimilhança como fator inicial. Demonstrou-se então, que com a metodologia GLUE, a incerteza aumenta com a variação de vazão, enquanto que o tamanho da amostra permanece o mesmo.

2.4 Validação

A validação tem por objetivo analisar a habilidade da calibração implementada em gerar resultados próximos a realidade, quanto mais próximo, maior é a eficiência do modelo. Dados diferentes dos observados e dos estimados são utilizados para a validação do modelo.

As séries originais dos dados observados e estimados podem apresentar tendências e comportamentos cíclicos e introduzem limitações para a utilização de testes estatísticos mais convencionais. De acordo com Reckhow (1990) é menos provável a ocorrência destes fenômenos com análise de resíduos, fazendo com que seja preferível a sua utilização.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para o cumprimento dos objetivos e do trabalho foram programadas as seguintes etapas:

- Caracterização da área de estudo;
- Uso de técnicas de geoprocessamento para caracterização das bacias e obtenção de parâmetros para a modelagem e análise de mapas e cartas das bacias com o intuito de realizar levantamentos topográficos, caracterização das áreas como, tipo de solo, cobertura vegetal, uso do solo, relevo e clima;
- Análise dos dados hidrológicos do local, por meio de visitas em campo para coleta de parâmetros a serem aplicados no modelo e instalação dos equipamentos necessários para a coleta;
- Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Botafogo para estimativa do nível d'água e das vazões dos canais principais por meio do modelo precipitação – vazão através de simulações computacionais.

Para a elaboração do trabalho foram utilizados diversos softwares. A composição dos mapas foi realizada através da utilização do software Arcgis 9.3. As planilhas e gráficos foram obtidos por meio do programa Microsoft Excel e para interpolação de valores e dados utilizou-se o software MATLAB.

3.1 Caracterização da área de estudo

De acordo com o Diagnóstico Ambiental da Sub-bacia do Botafogo, realizado pela Prefeitura de Goiânia (2008), o córrego Botafogo está inserido na bacia do Rio Meia Ponte, afluente do Rio Paranaíba, e situa-se nas porções das regiões sul e central do município de Goiânia apresentando extensão de 11,3 km, encontrando-se na zona 22 K, entre os paralelos sul 685078,21 m e 685588,54 m e os meridianos de longitude oeste 8159097,63 m e 8149655,25 m, percorrendo a área urbana da cidade de Goiânia, passando pelos bairros: Jardim das Esmeraldas, Bairro Santo Antônio, Vila Maria José, Vila São João, Vila Redenção, Pedro Ludovico, Jardim Goiás, Setor Sul, Setor Central, Setor Leste Universitário, Setor Vila Nova, Setor Leste, Setor Norte Ferroviário, Setor Criméia Leste e Setor Criméia Oeste (MARTINS JÚNIOR, 1996).

As nascentes do córrego Botafogo encontram-se no bosque municipal Jardim Botânico, que drena uma área de 31,55 km², contribui com a drenagem da cidade no sentido Sul/Norte, recebendo as vazões dos Córregos Areião e Capim Puba pela

margem esquerda e pela margem direita o Córrego Sumidouro, desaguando no Ribeirão Anicuns pela margem direita (Figura 5).

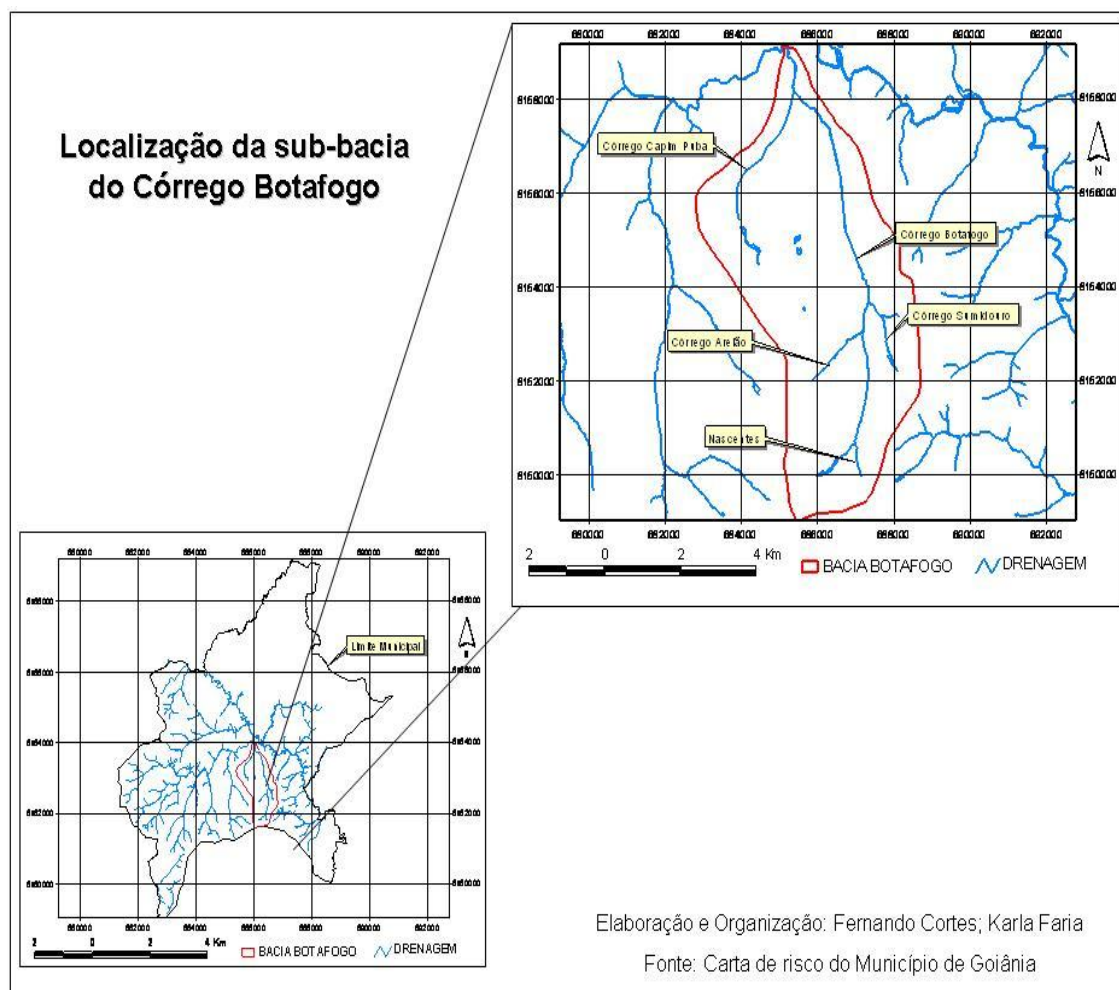


Figura 5. Localização bacia do córrego Botafogo e seus afluentes.

Fonte: Agência Municipal de Meio Ambiente (AMMA, 2009).

Elaborado por: Fernando Cortês e Karla Faria

O bosque municipal Jardim Botânico, local onde se encontram as nascentes do córrego, compõe uma das maiores reservas biológicas do município, possuindo 1 km². Localiza-se ao sul da capital entre o setor Pedro Ludovico e o bairro Santo Antônio. Foi inaugurado em 1978 e recebeu a denominação de Chico Mendes em 1989 (NOGUEIRA, 1999).

O córrego Botafogo (Figura 6) teve seu curso canalizado no final da década de 80 e começo de 90 quando ocorreu a construção da via Marginal Botafogo. Para tanto foi realizado um Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA-RIMA), elaborado pela empresa TECNOSAN Engenharia s/c Ltda (IPLAN, 1990).

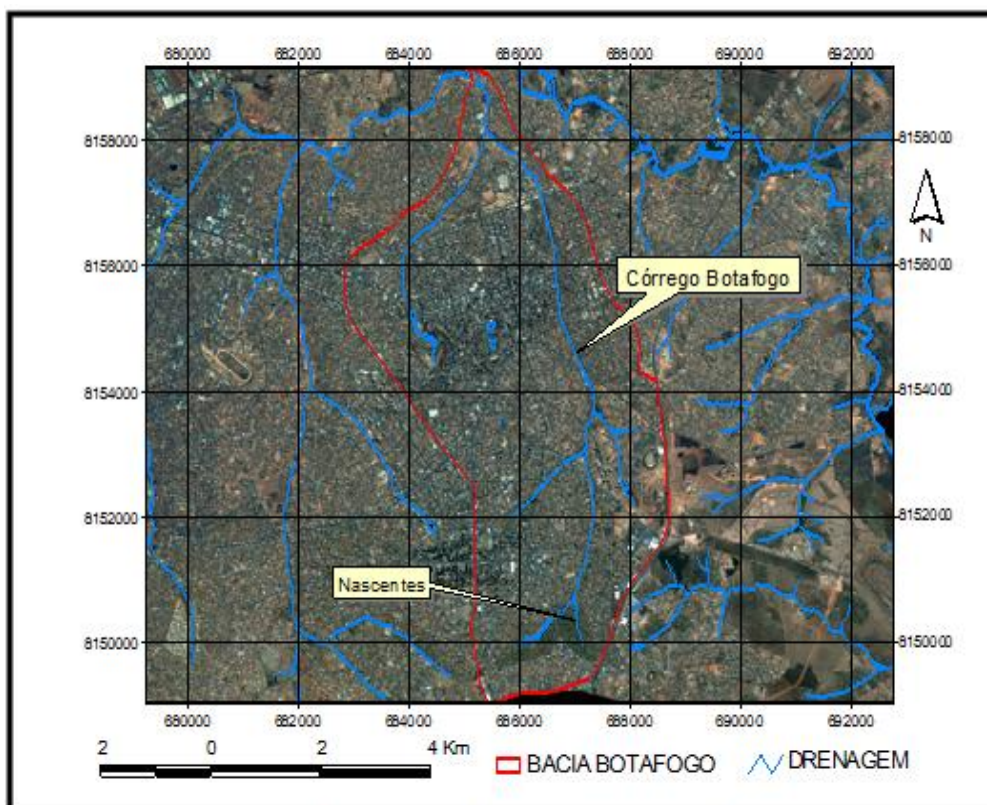


Figura 6. Córrego Botafogo.

Fonte: Agência Municipal de Meio Ambiente (AMMA).

Elaborado por: Karla Maria Silva de Faria.

O trecho estudado apresenta extensão de 5 km e está situado após as nascentes do córrego Botafogo, abrangendo os afluentes córrego Areião e córrego Sumidouro, terminando no segmento canalizado em estruturas de gabião (Figura 7)., próximo do início onde inicia-se a retificação em concreto. A parte canalizada em gabião se encontra quase que em sua totalidade com algum tipo de interferência, seja por acúmulo de sedimentos, presenças de blocos de concreto ou por presença de vegetação alta (OLIVEIRA, 2012)

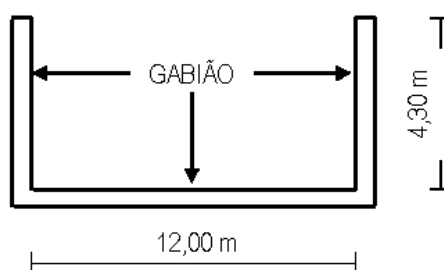


Figura 7. Estrutura em gabião (OLIVEIRA, 2012).

O segmento em estudo possui singularidades a cada seção transversal, essas foram levantadas, cadastradas e registradas fotograficamente para composição dos dados de entrada.

3.1.1 Relevô

Através de análise do mapa Geomorfológico proposto por CASSETI (1992), observa-se na sub-bacia do Córrego Botafogo os seguintes compartimentos morfológicos:

- Fundos de Vale: ocorre ao longo de toda a drenagem onde é acentuada a declividade que pode ultrapassar 40% e onde se encontram exposições do material rochoso e grande complexidade de depósitos. São áreas onde existe a ruptura de declive estrutural com relação às superfícies de relevo; as erosões em sulco evoluem, rapidamente, para ravinas e voçorocas, quando existe escoamento superficial concentrado e a ocupação urbana não recomendada.

- Planalto Embutido Convexado de Goiânia: encontra-se distribuído por toda a porção leste da sub-bacia, coincidindo com vertentes longas e apresenta maior variação de altitude entre 700 e 900 m e declividades entre 0 e 10% mais acentuadas ao sul. Corresponde à área com concentração de enxurradas devido à impermeabilização provocada pela ocupação urbana.

- Planalto Embutido Tabular de Goiânia: encontra-se situado a nordeste da sub-bacia, em pequena porção, apresenta área urbanizada com concentrações de enxurradas, com pequena variação de altitude entre 730 e 770 m e declividade até 10%, predominando as áreas de declividade entre 0 e 5%. É apto à ocupação urbana desde que implantada adequadamente.

- Chapadas Rampeadas de Goiânia: mais a oeste e em pequena mancha ao sul da sub-bacia, ligando os topos dos relevos dos fundos de vales. Com altitudes de 800 a 850 m e declividades entre 5% e 10%, apresenta erosão laminar generalizada e ravinamentos, provavelmente relacionados aos solos permeáveis e já antropizados embora em baixa densidade. Aptos à ocupação urbana desde que se adotem medidas de contenção dos processos erosivos.

- Chapadas Aplainadas de Goiânia: na porção sul/sudoeste da sub-bacia apresentando declividade de até 5% e altitudes entre 850 e 900 m. Aí está localizada importante faixa de recarga do aquífero. Apto à ocupação urbana e industrial desde que de forma correta, possui restrições quanto à poluição, principalmente das águas. Sua aptidão à ocupação está ligada à presença de solos estáveis e adequada implementação de infraestrutura básica.

3.1.2 Solo

Os solos que ocorrem na área considerada de interesse para os estudos ambientais da Via Marginal do Córrego Botafogo, dão origem predominantemente à Latossolos vermelho escuro distróficos, que ocorrem sempre em relevo plano a suavemente ondulado, em diferentes altitudes, envolvendo a cidade de Goiânia (GOIÂNIA, 2008) (Figura 8).

Os fundos de vales ocorrem ao longo de todo sistema de drenagem do córrego Botafogo onde se acentuam as declividades formando encostas abruptas com alto grau de degradação (CASTRO, 2009).

Naves *et al.* (2003) classificaram o solo da área de estudo em duas áreas amostrais: a) com presença de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, situada à margem esquerda do córrego Botafogo; iniciando-se no Jardim Botânico de Goiânia, à altura da nascente do córrego, a que estende-se até a Avenida Segunda Radial, na Vila Redenção; b) com presença de solos hidromórficos situada à margem direita do córrego Botafogo até a Avenida Jamel Cecílio, também na Vila Redenção.

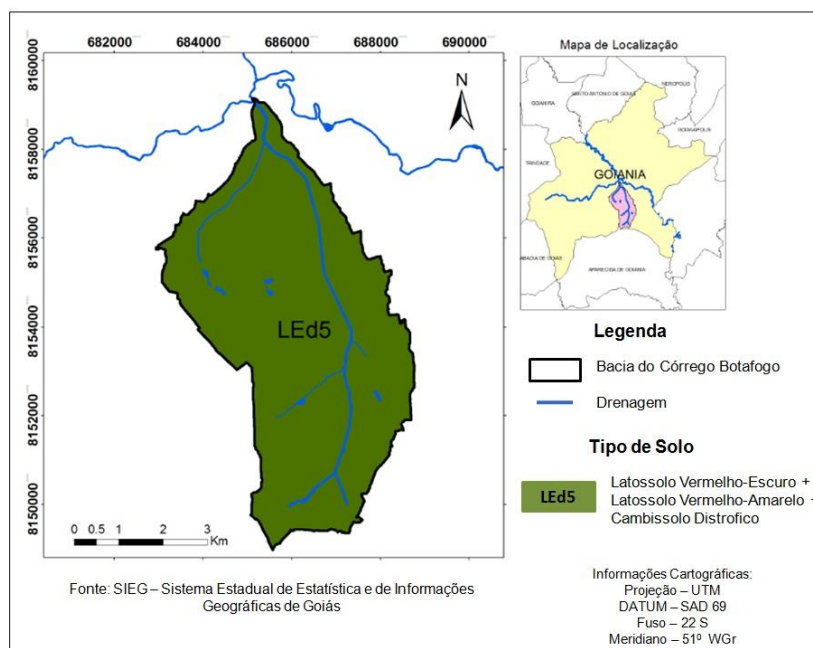


Figura 8. Solos característicos da bacia do córrego Botafogo.
Elaborado por: Rávilla Marques, 2013

3.1.3 Geologia

De acordo com a Goiânia (2008) a geologia da área, na qual se situa o vale do córrego é constituída de rochas, e, por depósitos aluvionares holocênicos. Estes depósitos são constituídos por argilas, areias argilosas, areias finas e grossas, cascalhos

finos a grossos, inconsolidados e pouco espessos, depositados nas margens das principais drenagens que ocorrem na cidade de Goiânia, ao longo do Rio Meia Ponte e Ribeirão João Leite.

O ponto mais crítico do vale, sob o ponto de vista geotécnico é a intervenção humana desordenada que ocorre por longos anos, com enormes prejuízos para a drenagem (GOIÂNIA, 2008). Trata-se de um vale com trechos distintos, sendo que na parte mais alta apresenta-se aberto, com os córregos ligeiramente encaixados, seguidos de um trecho de vale fundo e largo, pequenas áreas de planície, correspondendo praticamente ao trecho canalizado, posteriormente, é seguido por trecho de vale fechado, córrego encaixado e ainda, trecho de planície até sua foz (Figura 9).

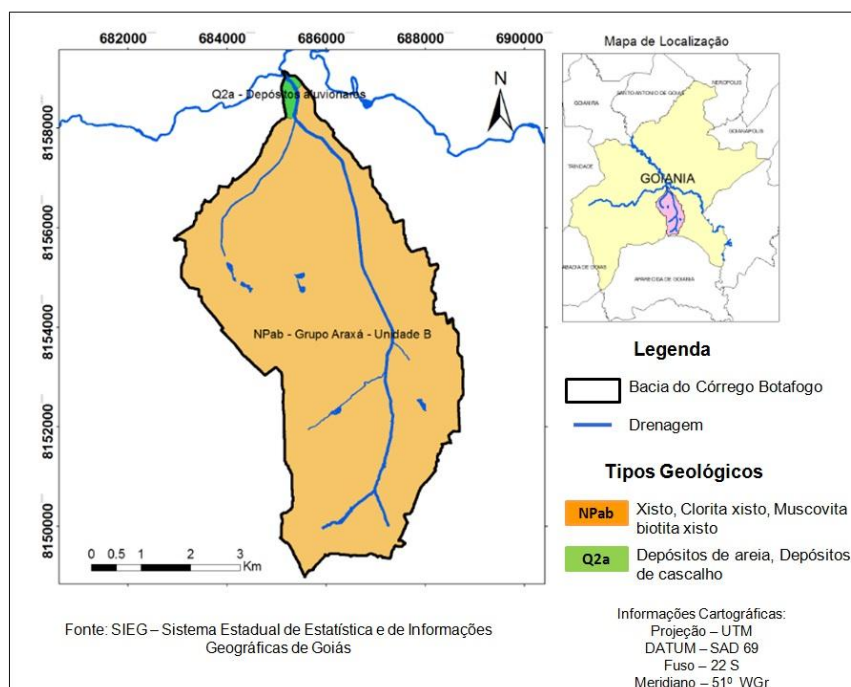


Figura 9. Geologia da bacia do córrego Botafogo.
Elaborado por: Rávilla Marques, 2013

3.1.4 Geomorfologia

Observa-se no local a geomorfologia de Planalto Central Goiano, este compartimento tem como características relevos de topos tabulares e/ou planos rampeados. Estes relevos estão esculpidos nos terrenos granulíticos, parcialmente recobertos por latossolos vermelhos, profundos e de textura argilosa, desenvolvidos, principalmente, nas áreas com declividades entre 0 e 5% (GOIÂNIA, 2008) (Figura 10);

O vale do Botafogo desde a nascente até a foz apresenta compartimentos geomorfológicos distintos (GOIÂNIA, 2008):

- Vale aberto com córrego ligeiramente encaixado: corresponde ao trecho compreendido entre suas nascentes e a afluição com córrego Areião, apresenta corpos de aluviões restritos a calha do rio ou uma pequena expressão lateral.
- Vale aberto de flancos simétricos: corresponde ao trecho compreendido entre a margem do córrego Areião e a Av. Independência, abrigando praticamente todo o trecho canalizado. Nota-se a ocorrência de pequenas áreas de planície com desenvolvimento de aluviões, inclusive, na margem esquerda.
- Vale fechado com córrego encaixado: compreende o trecho situado entre a Av. Independência e a margem do córrego Capim Puba, sendo que, neste trecho, o córrego encontra-se entalhado em solo coluvionar.
- Áreas de planície: corresponde ao trecho Capim Puba até a sua foz no Rib. Anicuns, com desenvolvimento de aluviões marginais e áreas com lençol freático superficial.

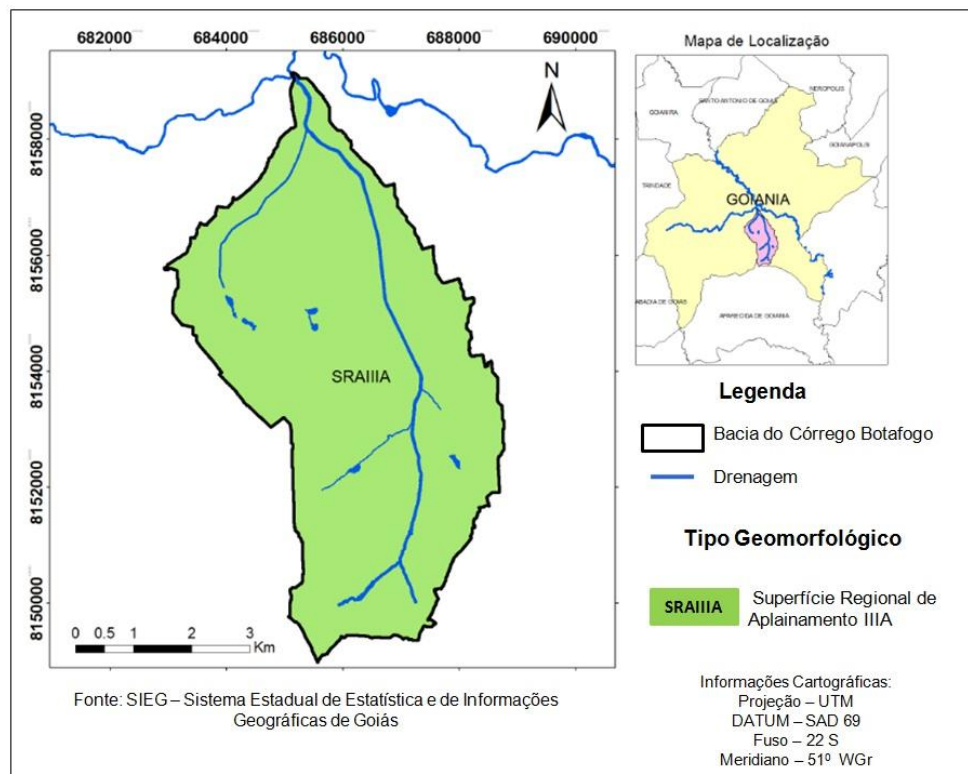


Figura 10. Geomorfologia da bacia do córrego Botafogo.
Elaborado por: Rávilla Marques, 2013

3.1.5 Vegetação

Inicialmente, as margens do córrego Botafogo eram formadas por ambientes ciliares (MUELLER, 2000) que se fazem presentes atualmente em fragmentos vegetacionais de regiões como a do Jardim Botânico. Moreira (1995) a identificou a

vegetação como floresta estacional semidecidual e Sano & Almeida (1998) a reclassificou como mata seca semidecídua – formações vegetais ribeirinhas que ocupam as acumulações fluviais quaternárias. A Figura 11 demonstra a ocorrência de vegetação em parte da bacia hidrográfica do córrego Botafogo, até o seu encontro com o afluente córrego Capim Puba.

A supressão da vegetação ocorreu devido às ocupações urbanas residenciais e comerciais, obras de infraestrutura urbana, como, rede de drenagem, redes de esgoto, ruas, canalização e contenção superficial.

Em alguns trechos do córrego, principalmente, em toda a Marginal Botafogo, via de trânsito rápido, a vegetação nativa encontra-se de forma dispersa, com raras ocorrências nas áreas urbanizadas, com diversos graus de antropismo e ausência de mata de galeria.

De acordo com Naves *et al.* (2003) a Prefeitura Municipal de Goiânia esteve buscando a relocação de ocupações ilegais às margens do córrego, embora enfrente resistência por parte de seus habitantes.

3.1.6 Uso do solo

A cidade de Goiânia teve um rápido crescimento desde sua construção em 1930. Desde os primeiros anos constituiu um espaço com grande potencial de imigrantes e assim a expansão urbana aconteceu de maneira rápida e irregular. Esse crescimento resultou em uma ocupação urbana descontínua, com poluição dos recursos hídricos, falta de infra-estrutura básica e aumento das invasões e ocupações irregulares (RODRIGUES, 2006).

A ordenação do território deve ser garantida por meio do planejamento contínuo e do regrado controle do uso do solo da sua ocupação. A regulação do uso e de sua densificação deve considerar sempre os elementos naturais e culturais da paisagem, bem como, as condições ambientais, de mobilidade urbana, a oferta existente ou projetada de saneamento básico, de transporte coletivo, de drenagem e de outros serviços urbanos necessários, sendo indispensável o respeito aos princípios e critérios discutidos quando da aprovação da legislação em vigor.

De acordo com o Estudo de Impacto de Vizinhança (EIV) elaborado por Cardoso & Resplandes (2009), para um empreendimento situado nas proximidades do manancial e segundo a Secretaria de Planejamento Municipal (SEPLAM), os setores que se encontram parcialmente ou totalmente na sub-bacia do córrego Botafogo são: Setor

Pedro Ludovico, Vila Redenção, Setor Marechal Rondon, Setor dos Funcionários, Vila Maria José, Bairro Alto da Glória, Setor Aeroporto, Setor Oeste, Vila São João, Jardim Goiás, Setor Marista, Setor Bela Vista, Setor Sul, Setor Leste Universitário, Setor Criméia Oeste, Setor Criméia Leste, Setor Central, Setor Leste Vila Nova, Setor Megale, Setor Fróes, Setor Norte Ferroviário e Loteamento Nova Vila (Figura 11).

Segundo Araújo & Pasqualetto (2008) o Jardim Botânico, onde se localiza a nascente do Córrego Botafogo, há anos vem sofrendo com habitações irregulares à suas margens e conseqüentemente vem sofrendo os impactos decorrentes desse tipo de moradia ilegal. Além disso, foi feita a pavimentação de uma área de Preservação Permanente (APP) para a construção de uma via de trânsito e para a construção da Marginal Botafogo foi utilizado material impermeabilizante, o que agrava as condições ambientais, uma vez que esse tipo de material aumenta o escoamento superficial, impede a infiltração da água no solo, aumenta as ilhas de calor, prejudica a qualidade da água, dentre outros.

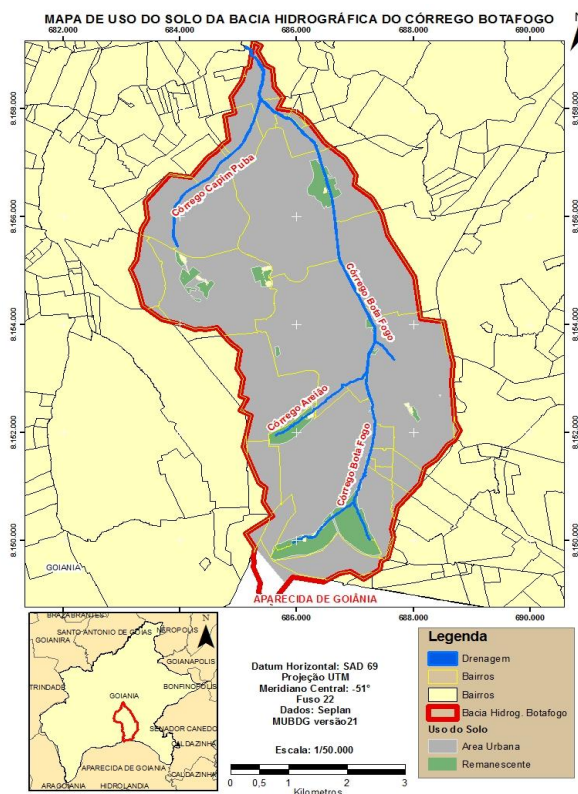


Figura 11. Uso do solo na bacia do córrego Botafogo.
Elaborado por: Wellington Nunes de Oliveira (2011)

3.2 Aquisição de dados

A aquisição de dados constituiu-se basicamente em observar e acompanhar os fenômenos naturais para deles adquirir um conhecimento claro e preciso, evitando, com isto, a redução do estudo da realidade e de suas leis a simples conjunturas e adivinhações.

As observações e experimentações são realizadas no sentido de testar alguma teoria, e apenas aquelas observações consideradas relevantes foram registradas.

A aquisição de dados foi ordenada da seguinte maneira:

- Levantamento topográfico;
- Monitoramento fluviométrico;
- Monitoramento pluviométrico.

Nesta etapa várias dificuldades foram encontradas, como, roubo e perda de equipamentos e materiais, dificuldade de acesso aos locais de medição, problemas de leitura do software e outros, que ocasionaram mudanças durante a realização da pesquisa. As mudanças referem-se aos locais acesso e aos equipamentos e materiais utilizados na pesquisa.

3.2.1 Levantamento topográfico

Anteriormente a coleta da velocidade do fluxo fluvial do canal, foram estabelecidos procedimentos para o mapeamento da morfologia do fundo do canal da secção transversal, a fim de determinar as distâncias entre os perfis verticais e suas respectivas profundidades.

Foi realizado um levantamento planialtimétrico para a representação da real área física do canal com o uso do equipamento de estação total (Figura 12). Foram levantados cerca de 200 pontos para representar as seções transversais no intervalo estudado. Para tanto, a composição física do canal deu-se por levantamento dos pontos de cota de topo em cada uma das margens e cota de fundo do leito para representar a área da seção transversal.

Como resultado do levantamento obteve-se o desenho digital do trecho do canal estudado como todas as informações coletadas em campo. O desenho dinamizou o estudo e a partir dele foi possível extrair e inserir informações durante o período em que os estudos estavam sendo realizados. Como por exemplo, pode-se citar a inserção da

localização dos linígrafos instalados e também a extração da declividade do fundo canal e deformidades cadastradas em cada seção.



Figura 12. Levantamento Planialtimétrico – estação total (OLIVEIRA, 2012).

3.2.2 Monitoramento fluviométrico

Esta etapa constituiu-se em obter dados dos níveis d'água dos córregos durante os períodos chuvosos. A seção de medição do nível foi instalada em local de trecho retilíneo do rio, com leito regular e estável, de modo a favorecer uma distribuição uniforme das velocidades da água no ponto de medida. Encontrar o local ideal nem sempre foi possível, devido a dificuldades de acesso e probabilidades de roubo. Outro problema resolvido foi à localização dos equipamentos de medição na seção, dispostos a garantir seu funcionamento em períodos secos e chuvosos.

Segundo Santos (2001), na escolha do local de instalação das estações hidrométricas deve-se procurar um trecho do rio onde a calha obedece a alguns requisitos básicos:

1. boas condições de acesso à estação;
2. presença de observador em potencial;
3. leito regular e estável (preferencialmente, que não sofra alterações);
4. sem obstrução à jusante ou seja, sem controle de jusante;
5. trecho reto, ambas margens bem definidas, altas e estáveis, e de fácil acesso durante as cheias;

6. local de águas tranquilas, protegidas contra a ação de objetos carregados pelas cheias;

7. relação unívoca cota x vazão.

Para maior segurança dos equipamentos instalados foram desenvolvidos invólucros de metal para camuflar e proteger o mesmo de intempéries e roubos.

3.2.2.1 Suporte para os linígrafos

Foram manufaturadas estruturas metálicas para a instalação dos linígrafos, protegendo-os dos efeitos das intempéries (Figuras 13 a 17). Dois tipos de estruturas foram montadas:

Estrutura para talvegue composto por solo arenoso e/ou argiloso: neste tipo de estrutura tem-se invólucro metálico soldado nas laterais, ficando apenas uma lateral aberta, para que o linígrafo possa ser acoplado. O invólucro possui aproximadamente 20 centímetros de comprimento e 6 centímetros de largura. A parte perfurante é de metal liso e apresenta 50 cm de comprimento. A parte superior e as laterais apresentam dois furos de 10 mm cada, para que o linígrafo possa ser amarrado com cabo de aço, e permitir a entrada de água.

Estrutura para fixar em colchão de reno e/ou no concreto: invólucro metálico soldado nas laterais de aproximadamente 20 centímetros de comprimento e 6 centímetros de largura e chapas metálicas afixadas nas laterais do invólucro de aproximadamente 20 cm com furos para amarrar com cabos de aço ou fixar com pregos. A parte superior e as laterais apresentam dois furos de 10 mm cada para que o linígrafo possa ser amarrado com cabo de aço, e permitir a entrada de água.

Nesta etapa do trabalho várias dificuldades foram encontradas, iniciando pela carência da mão de obra para manufatura das estruturas. Posteriormente, ocorreram problemas para fixação da estrutura em solo, algumas estruturas ficaram danificadas. Após a instalação dos linígrafos os obstáculos enfrentados foram: roubos, perdas do material devido ao carreamento pela chuva e também enterramento do mesmo pelo solo e sedimentos encontrados no fundo do córrego.



Figura 13. Estrutura para fixação em talvegue. (A) Vista Frontal, (B) Vista Interna.



Figura 14. Estrutura para fixação em talvegue - vista superior.



Figura 15. Estrutura para fixação em gabião – vista frontal.



Figura 16. Estrutura para fixação em gabião - vista superior.



Figura 17. Estrutura para fixação em gabião. (A) Vista interna sem linígrafo e (B) Vista interna com linígrafo.

3.2.2.2 Linígrafos

Os níveis de um rio são medidos por meio dos linígrafos. Os linígrafos usados no trabalho são chamados de transdutor eletrônico de pressão. O aparelho de pressão apresenta a vantagem de permitir, em geral, períodos mais longos sem que haja a necessidade de troca de papel, cujo desenvolvimento recente, resulta em um equipamento mais compacto e robusto e de custo reduzido.

Os linígrafos utilizados são do tipo Data Logger série U20, constituídos de aço inox e possuem proteção contra raios, à parte eletrônica está protegida em caixa de aço inoxidável para uso em água doce (Figura 18).

O HOBOWare Pro software apresenta conversão fácil do nível da água, com a possibilidade de compensação barométrica, que foi utilizada no trabalho. Os linígrafos foram utilizados em uma faixa de profundidade de 04 metros. Foram instalados no trecho estudado, 04 linígrafos.

A instalação dos equipamentos ocorreu a uma distância da margem que permitia uma boa visibilidade. Os dados das lâminas d'água conseguidos no córrego Botafogo foram obtidos simultaneamente com intervalos iguais sincronizados entre si, ou seja, a cada minuto todos os linígrafos registravam a altura das lâminas. Os linígrafos receberam o *log on* através do *software (HOBOWare)* com tempo programado para início, fim e intervalo de aquisição de dados iguais. Apresentaram capacidade de ficar coletando dados por 25 dias consecutivos, após esse período era necessário ir ao campo para repassar os dados no computador, checar o funcionamento e colocá-los novamente instalados nos invólucros.

Foram realizadas aproximadamente um total de 30.866 leituras de nível d'água.



Figura 18. Linígrafos utilizados em campo. (A) HOBOWare e (B) medida do linígrafo (OLIVEIRA, 2012).

Para o monitoramento das variáveis hidráulicas no canal, foram instalados 04 linígrafos, em distâncias variadas. Apenas no ponto 03, instalou-se um par de linígrafos para realizar a calibração do equipamento. Enquanto o linígrafo de montante realiza a leitura dos dados de montante, o linígrafo de jusante armazena dados para a calibração do modelo. Por serem compactos, permitem a sua instalação sem deixar transparecer a sua presença no local. Os quatro pontos onde foram instalados pertencem à bacia do córrego Botafogo com distância variada um do outro. Os mesmos estão distribuídos da seguinte forma (Figura 19 a 21):

- Ponto 01: entre a Alameda Botafogo e a Alameda Jardim Botânico (22K 686972 E/ 8150815 S), fixado no talvegue em terreno natural;
- Ponto 02: na Avenida 2ª Radial (22K 687167 E/ 8151401 S), fixado em gabião;
- Ponto 03: próximo à confluência com o Córrego Sumidouro (22K 687289 E/ 8153716 S), fixado em gabião;
- Ponto 04: na Avenida Jamel Cecílio, no Córrego Areião (22K 686847 E/ 8152888 S), fixado em gabião.

Apenas o trecho demonstrado na Figura 19, foi estudado, pois o restante do córrego Botafogo é canalizado, o que confere um maior grau de complexidade ao estudo de equipamentos.

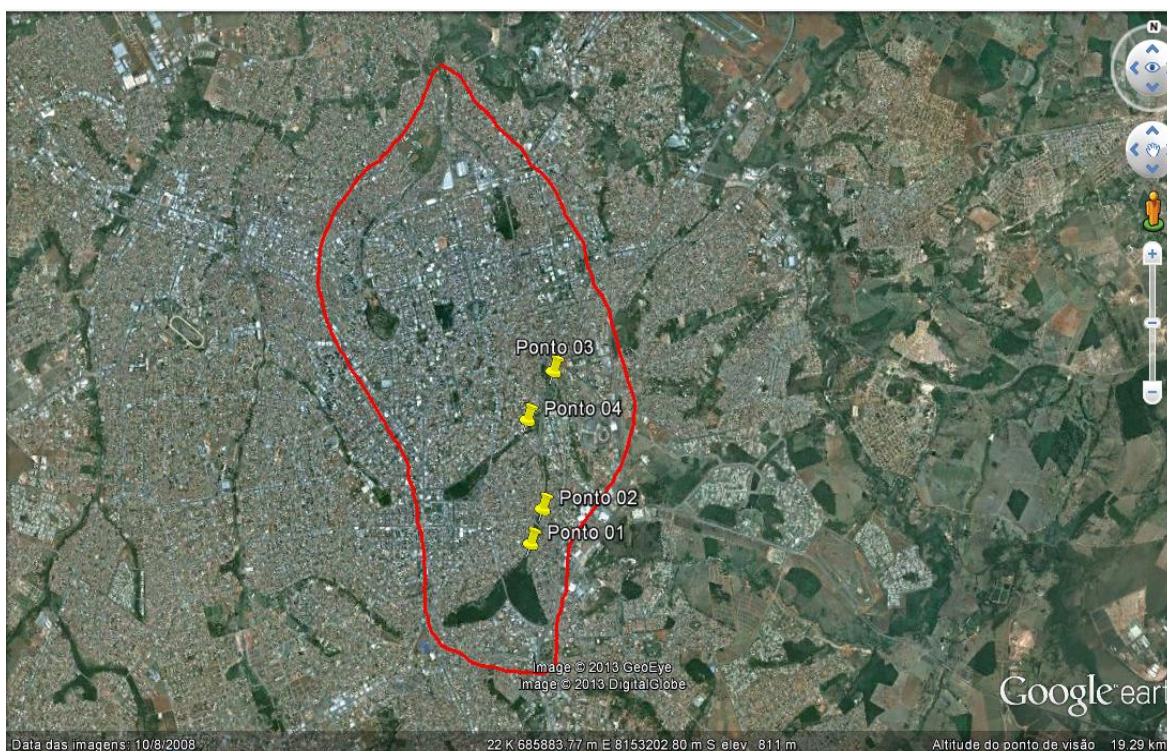


Figura 19. Pontos onde foram instalados os linígrafos.



Figura 20. Instalação dos equipamentos (A) Trecho 01 e (B) Trecho 02.

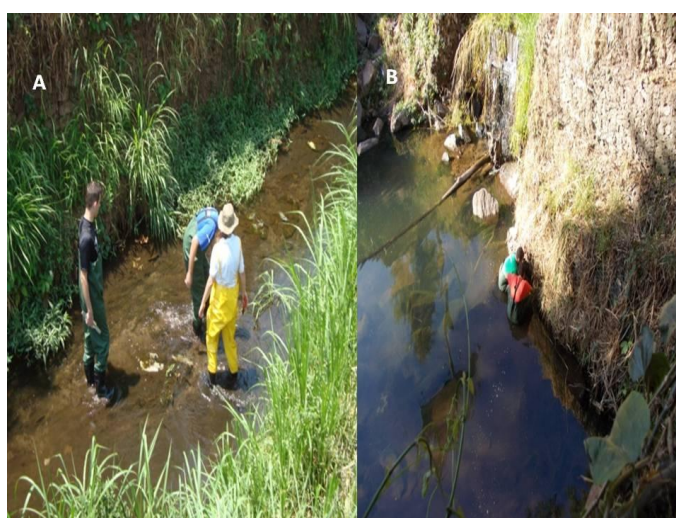


Figura 21. Instalação de equipamentos (A) Trecho 03 e (B) Trecho 04.

As primeiras medidas iniciaram no final de outubro de 2011, a princípio, para verificação de funcionamento dos linígrafos e estruturas. A partir de dezembro as coletas se intensificaram e os linígrafos foram retirados definitivamente do campo dia 29 de março de 2013, com dados suficientes para realização do estudo.

Os dados de vazão no período chuvoso foram obtidos pelo nível de água dos linígrafos instalados nos pontos de estudo. Calculou-se a vazão para cada evento por meio de um modelo hidrodinâmico calibrado para o local. Os dados obtidos por meio de levantamento topográfico e dos linígrafos, foram inseridos em um modelo hidrodinâmico para a calibração dos parâmetros. O modelo hidrodinâmico utilizado foi desenvolvido por Oliveira (2012), que empregou o esquema implícito de Preissmann, que permite dispensar o emprego de uma relação entre vazão e lâmina para definição da condição de contorno montante. Isto possibilitou o uso de limnograma ao invés do

hidrograma como condições de contorno montante. Tal fato ocorre, pois as relações de cota-vazão são variáveis de evento para evento.

O método implícito do esquema de Preissmann é considerado incondicionalmente estável, sem limites para a variação de tempo e sua compacidade permite a aplicação do método com uso de variações espaciais com diferentes comprimentos.

3.2.3 Monitoramento Pluviométrico

Do ponto de vista do monitoramento pluviométrico foram avaliados eventos extremos, aqueles que ocorreram com maior intensidade. Na área urbana onde se encontram os córregos de estudo existem pluviógrafos, cujos dados são fundamentais para estudos de drenagem pluvial e de controle de cheias.

3.2.3.1 Pluviógrafos (*Rainfall Sensor Onsetcomp*)

Os pluviógrafos utilizados são do tipo balança (Figura 22), ou seja, são constituídos de cubas basculantes, em que a água recolhida é dirigida para um conjunto de duas cubas articuladas por um eixo central. A água é 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 água. 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.



Figura 22. Pluviógrafos. (A) Data logger do Rainfall Sensor Onsetcomp e (B) Pluviógrafo da EEC - UFG (BARBALHO, 2012).

Os pluviógrafos foram dispostos em diferentes pontos da bacia estudada, totalizando 9 pontos, assim distribuídos (Figura 23):

- Pluviógrafo 01: Escola Dinâmica 13 de maio, Rua Lauro Jacques , 300 – Setor Negrão de Lima, Goiânia;
- Pluviógrafo 02: Colégio Integração, Rua Ministro Guimarães Natal, nº 486 – Setor Criméia Oeste, Goiânia;
- Pluviógrafo 03: Colégio Ateneu Dom Bosco, Rua 03 com Rua 23, Setor Oeste, Goiânia;
- Pluviógrafo 04: Colégio Estadual Bandeirante, Avenida Emília Tavares, s/n, Setor Bueno, Goiânia;
- Pluviógrafo 05: Colégio Estadual José Alves de Assis, Rua Curimatá com Rua Uberaba, Setor dos Afonsos, Aparecida de Goiânia.
- Pluviógrafo 06: Colégio Estadual Pedro Xavier Teixeira, Al. Couto Magalhães com Rua 1027, nº 70, Setor Pedro Ludovico, Goiânia;
- Pluviógrafo 07: Instituto Educacional Emmanuel, Avenida Cora Coralina, nº 407, Setor Sul;
- Pluviógrafo 08: Centro Educacional para Jovens e Adultos Arco Íris, Av. Dom Fernando, s/n, Chácara do Governador, Goiânia;
- Pluviógrafo 09: Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, Praça Universitária com a 5ª Avenida, Setor Leste Universitário, Goiânia.

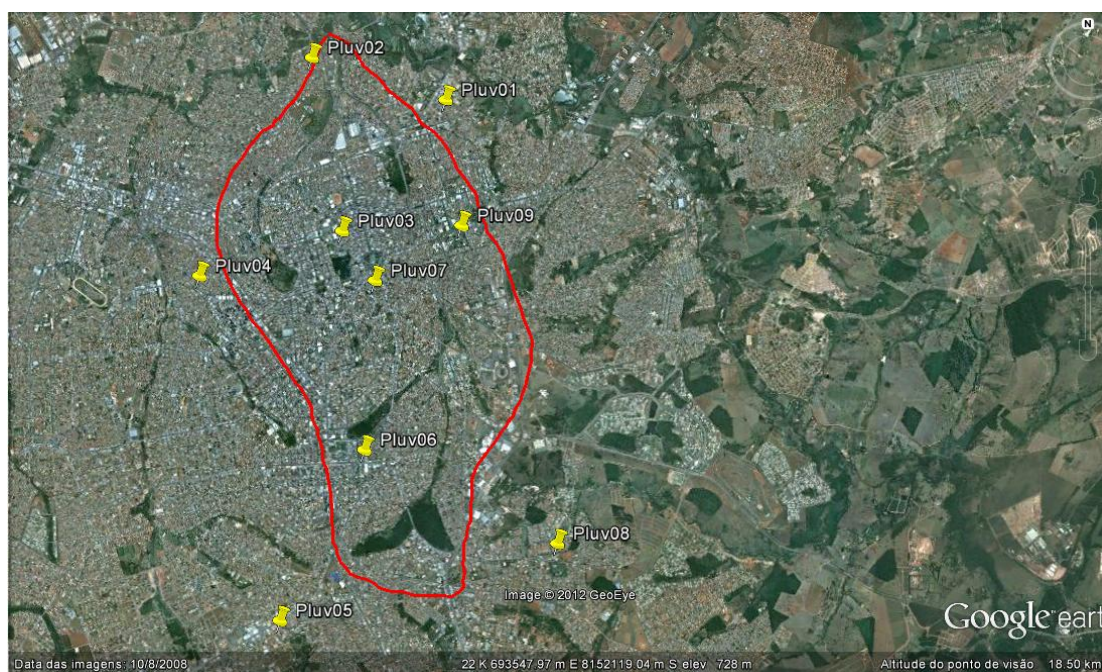


Figura 23. Pontos onde foram instalados os pluviógrafos.

3.2.4 Eventos

Foram registrados vários eventos chuvosos, no entanto os mais representativos para o estudo ocorreram no período de 11 de março de 2012 (07 horas e 31 minutos) a 29 de março de 2012 (17 horas e 22 minutos), totalizando portanto 13 eventos. Os dados dos linígrafos e dos pluviógrafos foram verificados e organizados em planilhas eletrônicas. Inicialmente para os dados dos linígrafos necessitou-se realizar a compensação barométrica, pois a pressão exercida pela água sobre o material é diferente da exercida pelo ar.

Dos treze eventos analisados foram utilizados seis em que os dados foram mais consistentes, sendo eles o evento 01, 02, 06, 08, 11 e 12. Os eventos 01, 02 e 12 considerados como fortes, já que produziram vazões elevadas, eventos 06 e 08 medianos e o evento 11 classificado como fraco (Figura 24).

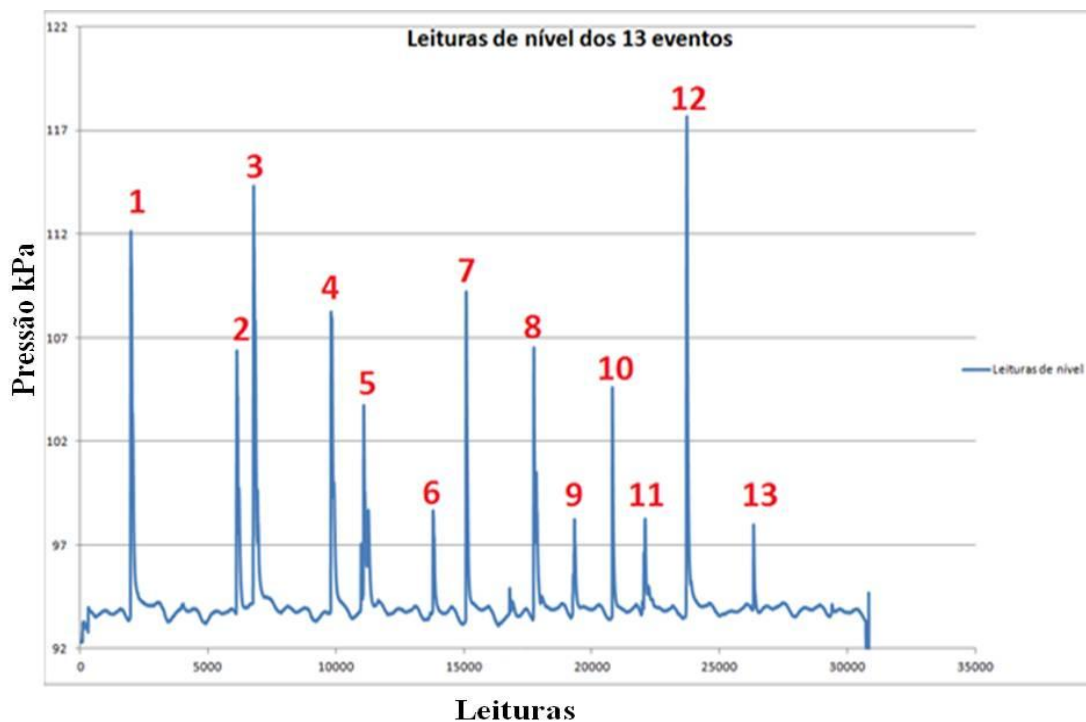


Figura 24. Treze eventos adotados no estudo.

Os gráficos precipitação x vazão para cada um dos eventos escolhidos segue nas Figuras 25 a 30.

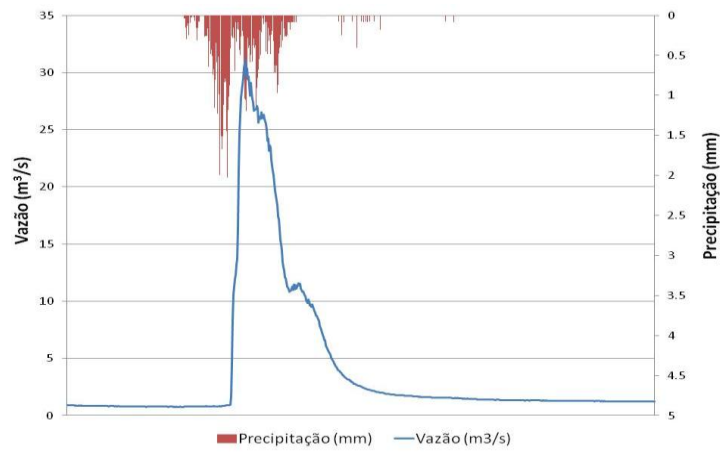


Figura 25. Precipitação x vazão do Evento 01.

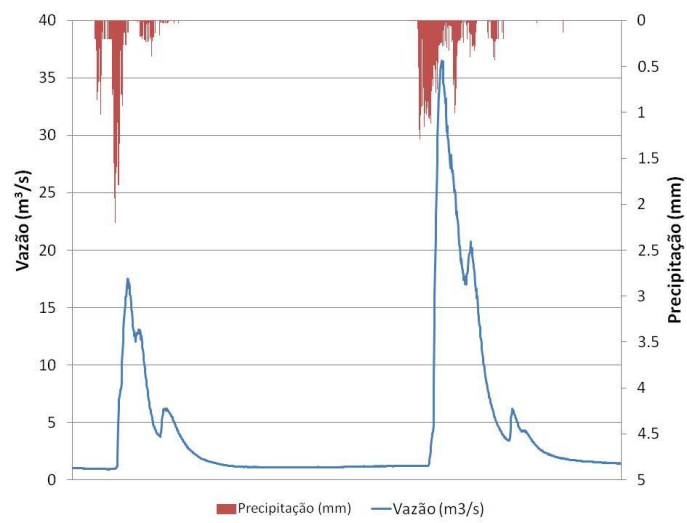


Figura 26. Precipitação x vazão do Evento 02.

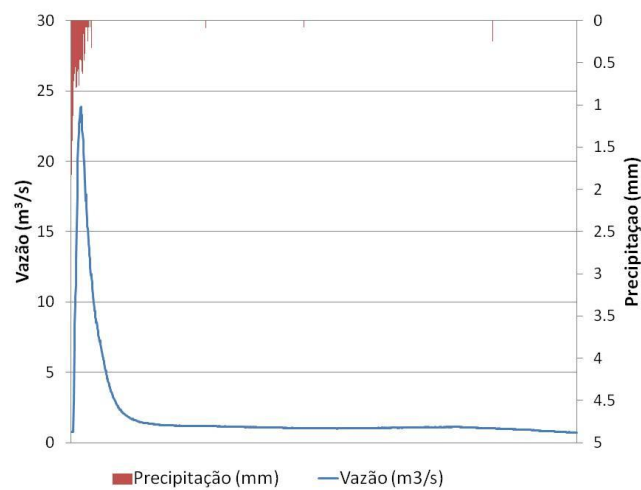


Figura 27. Precipitação x vazão do Evento 06.

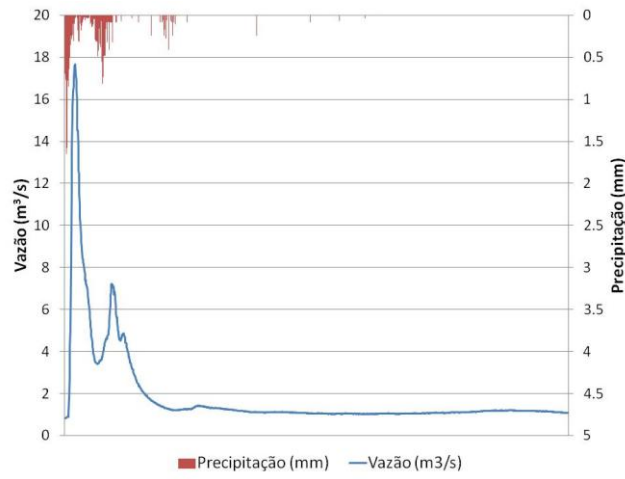


Figura 28. Precipitação x vazão do Evento 08.

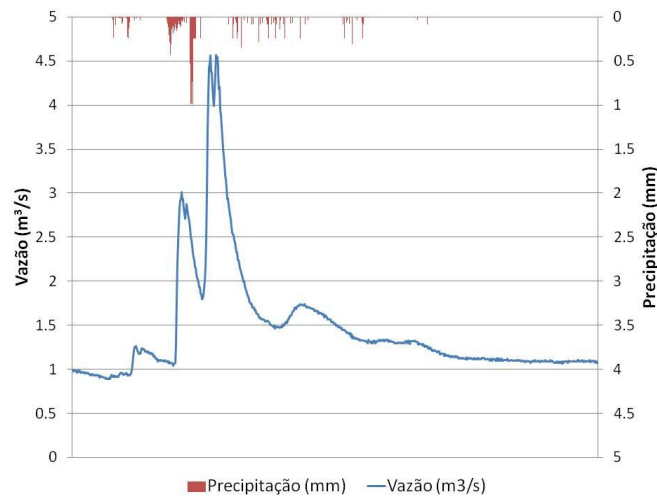


Figura 29. Precipitação x vazão do Evento 11.

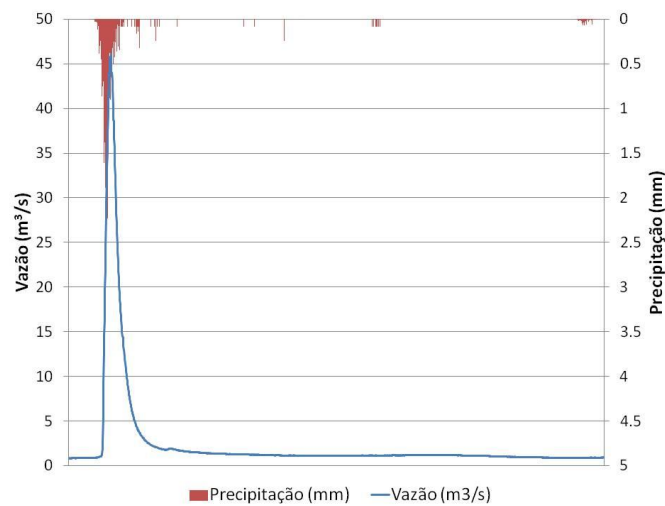


Figura 30. Precipitação x vazão do Evento 12.

3.3 Desenvolvimento do Modelo

O modelo permite a predição do balanço hídrico e a obtenção do hidrograma de escoamento superficial e da vazão máxima para qualquer posição de um plano e de um canal, mesmo para condições de umidade diferentes da saturação considerando os processos de precipitação, interceptação (fornecida pelo usuário ou estimada de um banco de dados, a partir de informações), infiltração da água no solo (obtida pela equação de Green-Ampt e/ou Horton), armazenamento em depressões superficiais e escoamento superficial (utilizando o modelo de ondas cinemáticas).

O modelo desenvolvido considera a variação temporal dos parâmetros da bacia que interferem no processo de escoamento para a obtenção de um hidrograma de escoamento superficial. Desta forma, o usuário deve preparar os dados referentes à interceptação vegetal, armazenamento em depressões superficiais, ao coeficiente de rugosidade de Manning – tanto para áreas permeáveis quanto para áreas impermeáveis - parâmetros relativos à infiltração como condutividade hidráulica e umidade inicial.

Com o início da precipitação inicia-se, simultaneamente, a interceptação pela cobertura vegetal, que representa a fração da precipitação retida pela cobertura vegetal e que, portanto, não atingirá a superfície do solo. Após a saturação da interceptação pela cobertura vegetal, a água atinge o solo, elevando sua umidade e diminuindo a capacidade de infiltração. Quando a intensidade de chuva excede a capacidade de infiltração da água no solo, a água acumula na superfície do solo, fase denominada de empocamento. Uma vez que a capacidade de armazenamento superficial é excedida, tem início o escoamento superficial.

Neste modelo, a bacia também é discretizada através de um sistema de planos de escoamento que descarregam em canais de drenagem (Figura 31).

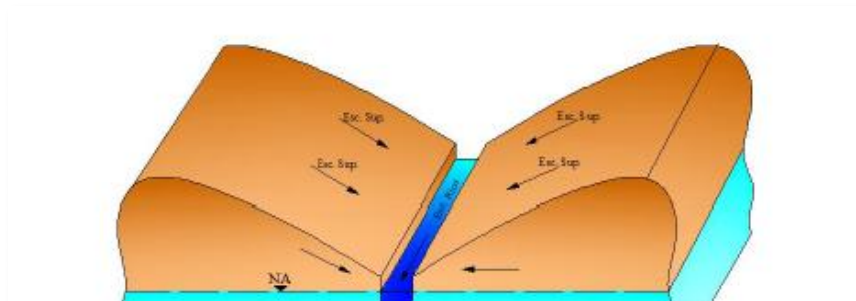


Figura 31. Escoamento ao longo do plano e do canal. Adaptado (LOU, 2010).

O modelo adotado é tido como semidistribuído, que simula eventos de chuva, e foi elaborado para ser aplicado às pequenas bacias. O modelo só considera perda de água

por infiltração e não sendo considerada a evaporação e a interceptação, já que a bacia é tida como pequena e as perdas insignificantes.

O modelo foi implementado no ambiente MATLAB e recebeu a denominação de UFGModel 1.0.

3.3.1 Planos

Nos planos de escoamento serão consideradas as variáveis: precipitação, infiltração e propagação do escoamento. Inicialmente a bacia do córrego Botafogo, no trecho estudado, foi discretizada em 3 sub-bacias, sendo posteriormente, dividida em 10 sub-bacias. Para cada sub-bacia foram levantados dados de área, declividade, área impermeável, largura do escoamento e comprimento do escoamento.

3.3.1.1 Sub-bacias

As Figuras 32 e 33 representam a imagem de satélite e o fluxograma das três sub-bacias, respectivamente. Para esta divisão foi levado em conta o córrego Botafogo e seus afluentes (Córrego Areião e Sumidouro). A sub - bacia 1 nas duas figuras está situada nas proximidades do Jardim Botânico e próximo a nascente do córrego Botafogo.

Na figura 33, a sub – bacia 2 está situada a margem esquerda do córrego Botafogo e a sub – bacia 3 a margem direita.

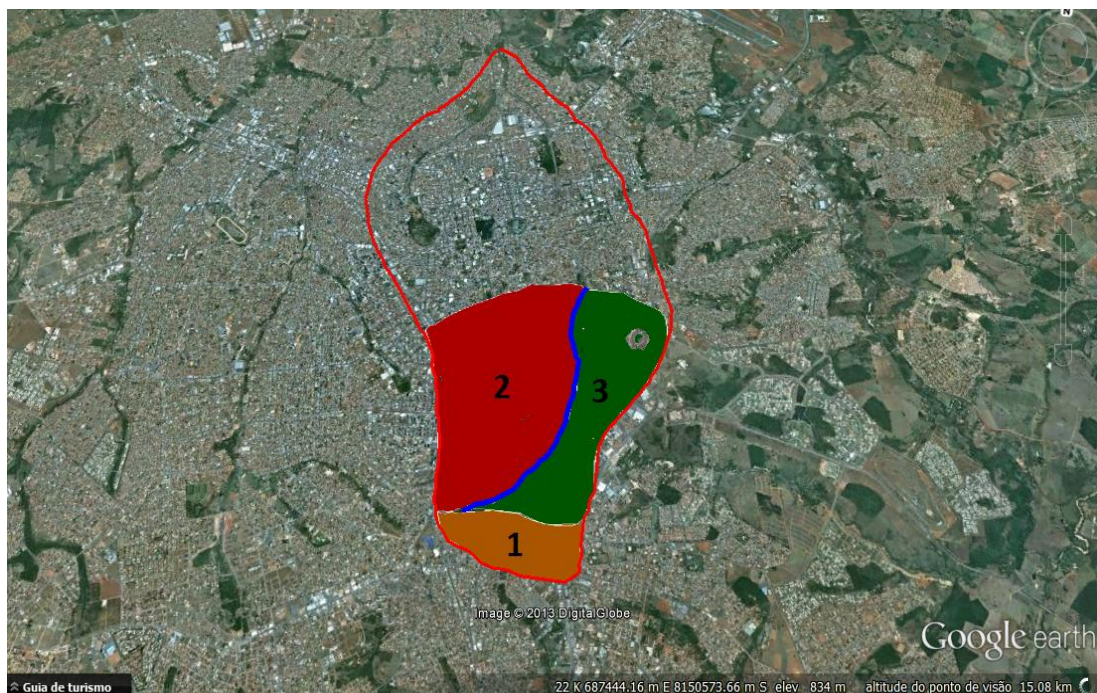


Figura 32. Três sub-bacias estudadas.

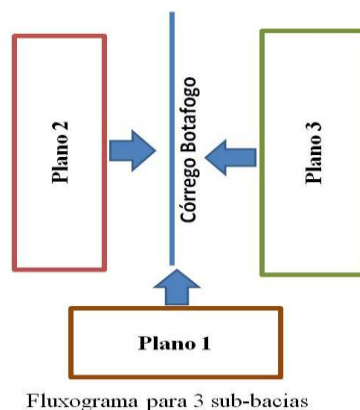


Figura 33. Fluxograma de escoamento para 03 sub-bacias.

As características e o formato produzido pelo software MATLAB de cada sub-bacia encontra-se no Anexo A.

Na figura 34 e 35 estão representadas as imagens de satélite e fluxogramas das 10 sub-bacias. As sub-bacias 02, 04, 05, 06 e 10 encontram-se na margem esquerda do córrego Botafogo e nas proximidades do seu afluente córrego Areião. As sub-bacias 03, 07, 08 e 09 encontram-se a margem direita do córrego Botafogo e nas proximidades de seu afluente córrego Sumidouro.

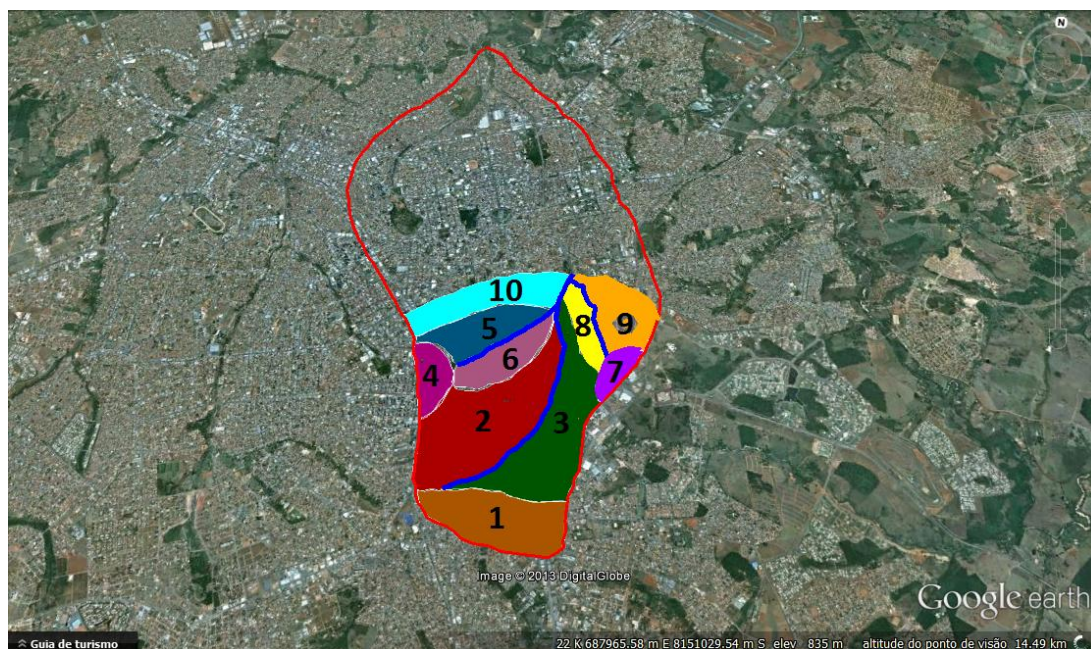


Figura 34. Dez sub-bacias estudadas.

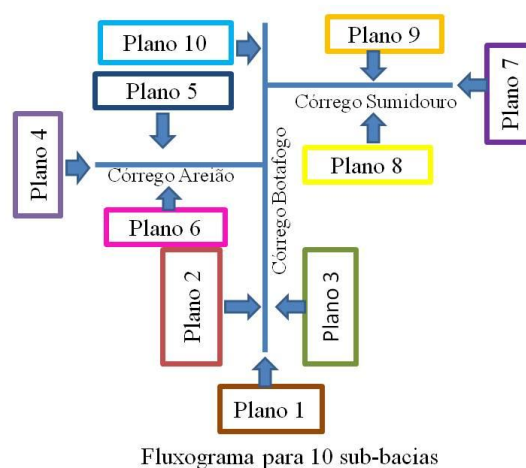


Figura 35. Fluxograma de escoamento para 10 sub-bacias.

3.3.2 Precipitação

O método empregado para cálculo da precipitação considerado no modelo foi proposto por Barbalho (2011), onde foi empregada as superfícies quádricas para interpolação de dados pontuais e foi desenvolvida inicialmente por Hardy (1971) para aplicação em ciências geofísicas. Posteriormente, Shaw & 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 superposição de diversas superfícies quádricas individuais com origem nos distintos pontos de observação. Essas superfícies individuais podem ser de natureza parabólica (Equação 3.1) ou hiperbólica (Equação 3.2):

$$P(x, y) = \sum_j^N c_j \left[(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 \right] \quad (3.1)$$

$$P(x, y) = \sum_j^N c_j \left[(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2 + q^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Nas quais 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 modelo 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, podem 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:

$$\underline{L}\underline{c} = \underline{P} \quad (3.3)$$

Onde \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 $N \times N$ das seguintes equações:

$$l_{ij} = \left[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right]^{1/2} \quad (3.4)$$

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 36 ilustra o conceito empregado pelo modelo de forma simplificada:

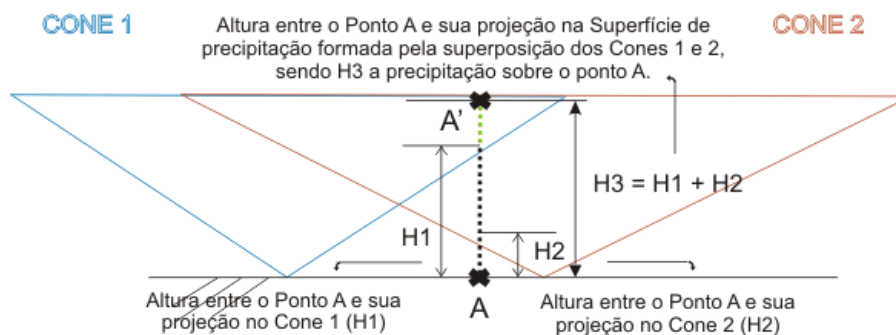


Figura 36. Representação esquemática da superposição de superfícies cônicas para formação da superfície de precipitação (BARBALHO, 2012).

Uma característica observada no MQ (Multi Quádrico) é que a determinação da precipitação em um ponto da bacia é função de todos os postos de observação empregados, isso pode contribuir para a minimização dos efeitos de erros locais de medição na determinação da precipitação média (BARBALHO, 2012).

3.3.3 Infiltração

A infiltração ocasiona interferências na vazão de projeto. O processo de infiltração é dinâmico e ocorre através da penetração vertical da água pela superfície do solo.

Entre modelos desenvolvidos empiricamente ou a partir de considerações físicas, está o modelo de Green & Ampt (1911), que para o desenvolvimento de sua equação da taxa de infiltração baseou-se na equação de Darcy-Buckinham. O método Green-Ampt assume que uma camada fina de umedecimento na coluna do solo separa o solo com pouca umidade do solo saturado. Apresenta como parâmetros de entrada capacidade de sucção por capilaridade, déficit inicial de umidade no solo e condutividade hidráulica.

Os modelos empíricos de Kostiakov (1932), de Horton (1940) e Kostiakov-Lewis que descrevem a evolução do volume infiltrado em função do tempo de infiltração, também são amplamente utilizados.

A equação de Horton é aplicada para o caso de um solo submetido a uma precipitação com intensidade sempre superior à capacidade de infiltração, uma relação empírica para representar o decaimento da infiltração com o tempo.

Segundo Pruski *et al* (1997) os resultados obtidos são ainda grandemente dependentes do método utilizado para sua determinação, apresentando todos eles problemas se utilizados para múltiplos fins. Porém, a determinação desta variável é importante para o desenvolvimento de projetos que estão ligados ao movimento da água (CARVALLO, 2000).

A permeabilidade do solo influi diretamente na capacidade de infiltração, ou seja, quanto mais permeável for o solo, maior será a quantidade de água que ele pode absorver, diminuindo assim a ocorrência de excesso de precipitação.

Métodos simples e diretos são capazes de representar as condições naturais em que o solo se encontra. Sob essas premissas, modelos cujas determinações baseiam-se em condições iguais as observadas durante ao qual o solo é submetido devem ser utilizados.

No modelo proposto à infiltração foi calculada por meio da equação de Horton modificada por Bauer (1974), que preconiza um conceito infiltração simples para uso em modelos de transformação precipitação-vazão. A fórmula infiltração de Horton é válida apenas onde a intensidade da precipitação excede a infiltração, não proporcionando o adequado manuseamento de uma variedade de condições iniciais de umidade do solo. Para Bauer (1974), o procedimento exprime a taxa infiltração em função do estado de armazenamento de umidade do solo e o mesmo permite que as

perdas por infiltração durante sequencias de chuvas intermitentes possam ser avaliadas de acordo com uma gama de condições de umidade inicial do solo.

Bauer (1974) inicia a modificação da equação de Horton por meio da Equação 3.5

$$d = f_c - (f_c).e^{-kt} \quad (3.5)$$

Sendo, d a taxa de drenagem (mm/h), f_c capacidade de infiltração final, k taxa de declínio da capacidade de infiltração (1/t) e t tempo (h).

Se a infiltração é interpretada como entrada para a água do solo S e armazenamentos de drenagem, de saída, a equação de continuidade pode ser escrita (Equação 3.6)

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = f - d \quad (3.6)$$

Substituindo a Equação 3.5 e a 3.7 na Equação 3.8, tem-se que (Bauer, 1974):

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = f_o . e^{-kt} \quad (3.7)$$

Uma curva de armazenamento em massa é obtida por integração da Equação 3.8 (Bauer, 1974).

$$S_t = \int_0^t \frac{\Delta S}{\Delta t} dt = \frac{f_o}{k} (1 - e^{-kt}) \quad (3.8)$$

Em que S_t é a água acumulada do solo (mm) no tempo t (h). Colocando t igual ao infinito na equação (3.9) produz o máximo de armazenamento de água no solo.

$$S_{\max} = \frac{f_o}{k} \quad (3.9)$$

O tempo correspondente a qualquer armazenamento de água especificada, S_t , pode ser determinado pela resolução da Equação 3.10 para t (Bauer, 1974):

$$t = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{1}{1 - S_t \cdot k / f_o} \right) \quad (3.10)$$

Onde t é o tempo (h), que corresponde a um determinado conteúdo de água no solo.

3.3.4 *Interceptação e Evaporação*

A interceptação é a retenção, acima da superfície do solo, de parte da precipitação. A chuva é interceptada pelos elementos que se encontram na superfície (folhas, galhos, troncos). Após a capacidade de armazenamento de água nesses elementos ser alcançada, a água fica disponível então ao solo.

A quantidade de água interceptada depende de algumas características da precipitação, da vegetação e das condições meteorológicas. Os fatores que influenciam na interceptação podem ser resumidos em: intensidade da chuva, volume total precipitado, chuva antecedente, intensidade do vento, umidade e temperatura do ar e tipo/densidade da vegetação.

Na literatura existem modelos para estimar perdas por interceptação como: Rutter *et al* (1975), Suzuki *et al* (1979), Gash (1979), Valente *et al* (1997). O mais utilizado é o modelo de Rutter, que tem como entrada chuva total e evaporação potencial e estima as gotas e os escoamentos de tronco a cada passo de tempo.

A evaporação ocorre pelo aquecimento da água do curso hídrico através do sol, que ao atingir determinada temperatura permite a transformação da água em vapor d'água, esta posteriormente mistura-se com o ar da atmosfera.

Apesar de serem dois processos importantes do ciclo hidrológico, ambos não foram considerados no modelo. Devido à bacia estudada ser pequena, a evaporação influenciaria nos resultados de forma não significativa, já que possivelmente apresentaria valores muito pequenos. Como o manancial em estudo encontra-se em área extremamente urbana e antropizada, a quantidade de área verde é reduzida, o que pouco influenciaria nos resultados de interceptação.

3.3.5 *Propagação do escoamento*

Sturm (2001) considera que a equação da conservação da massa é derivada do volume de controle de altura igual à profundidade, y , e comprimento Δx . O conceito de conservação do volume de controle considera como instrução básica que o volume que entra em determinada seção em um intervalo de tempo Δt , pode ser expresso pela Equação 3.13

Considerando um trecho dx , com escoamento a superfície livre, volume que entra na seção de montante, no intervalo de tempo dt , é igual a $Q \cdot dt$. O volume resultante da

seção de jusante é descrito como $(Q + \frac{\delta Q}{\delta x} dx)dt$, enquanto o volume armazenado no trecho do intervalo dt é:

$$\frac{\delta A}{\delta t} dx \cdot dt = Q \cdot dt - (Q + \frac{\delta Q}{\delta x} dx) \cdot dt + q \cdot dx \cdot dt \quad (3.11)$$

Que dividindo por dt e dx resulta:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (3.12)$$

Onde:

A: Área da seção transversal do escoamento (m^2);

t: tempo (s);

Q: vazão (m^3/s);

x: distância no sentido longitudinal (m);

q: contribuição lateral por unidade de largura (m^3/sm);

Efetuada as possíveis simplificações para a equação dinâmica, temos a equação da quantidade de movimento, que pode ser derivada considerando que forças agem no volume de controle.

$$S_o = S_f \quad (3.13)$$

S_o : quantidade de movimento inicial;

S_f : quantidade de movimento final.

A equação da quantidade de movimento pode ser escrita da seguinte forma:

$$A = \alpha \cdot Q^\beta \quad (3.14)$$

Sendo:

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

α, β : parâmetros da equação da onda cinemática;

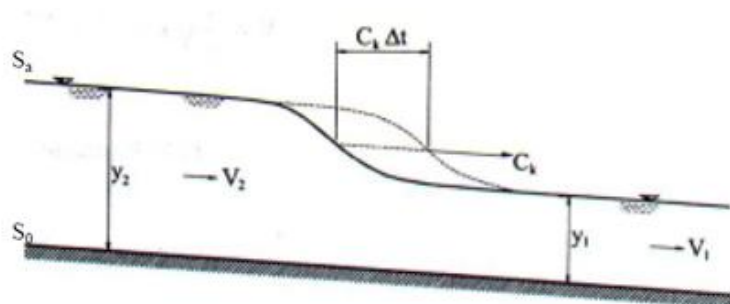


Figura 37. Propagação da onda cinemática.

Com base na equação de Manning – Strickler pode-se tirar a seguinte relação:

$$A = \left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right)^{3/5} \cdot Q^{3/5} \quad (3.15)$$

Sendo:

K_s : coeficiente de rugosidade de Manning-Strickler;

S_0 : declive do perfil longitudinal;

P : perímetro molhado;

Q : vazão

Então poder-se-á introduzir os parâmetros α e β dados por:

$$\alpha = \left(\frac{P^{2/3}}{K_s \cdot S_0^{1/2}} \right) \quad (3.16)$$

E:

$$\beta = \frac{3}{5} \quad (3.17)$$

Substituindo na equação da continuidade (Equação 3.9), obtém-se a equação da onda cinemática:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \alpha \cdot \beta \cdot Q^{\beta-1} \cdot \left(\frac{\partial Q}{\partial t} \right) = q \quad (3.18)$$

Em que q representa a vazão de percurso.

A formulação numérica da onda cinemática se dá por (MAYS, 2005):

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

O objetivo do método numérico é determinar a vazão para qualquer instante em qualquer posição. Os métodos numéricos para a resolução de equações diferenciais às derivadas parciais por diferenças finitas operam numa grade, cujos nós representam pontos discretos no contínuo espaço-tempo.

É possível determinar Q_{i+1}^{j+1} em função de Δt , Δx , Q_{i+1}^j , Q_i^{j+1} , q_{i+1}^{j+1} e q_{i+1}^j , Δt e Δx são constantes em toda a grelha. Os caudais q_{i+1}^{j+1} e q_{i+1}^j são previamente determinados. Assim para cada nível de tempo j são percorridas todas as posições i , determinando o caudal Q_{i+1}^{j+1} .

O modelo matemático a ser desenvolvido baseia-se na discretização de equações diferenciais ordinárias e parciais. Para isto são utilizados métodos numéricos que resolvem equações com base numa discretização temporal e espacial. A representação das equações diferenciais será realizada por esquemas explícitos.

A grande limitação dos esquemas explícitos é a condição de estabilidade, que deve ser respeitada para as equações do escoamento gradual. Esta condição limita o uso do modelo. A grande vantagem dos esquemas explícitos é a facilidade de formulação e programação em computador (Figura 38).

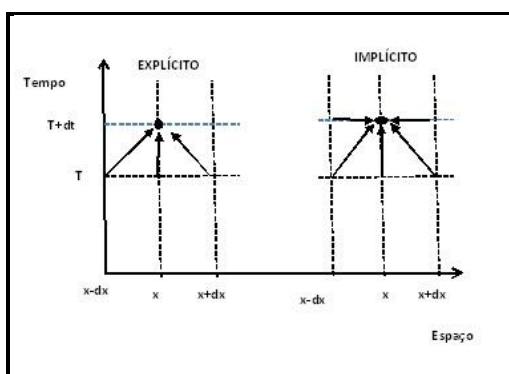


Figura 38. Esquemas Explícitos e Implícitos (TUCCI, 2011).

3.3.2 Canal

Nas três sub-bacias, primeiramente estudadas, o único canal considerado foi o córrego Botafogo, que corta a sub-bacia 02 e a sub-bacia 03, apresenta declividade de 2% e comprimento de 4,85 km conforme a Figura 39.

Para as dez sub-bacias, foram considerados o canal principal, córrego Botafogo, e os afluentes, córrego Areião e Sumidouro, de acordo a Figura 40. A sub-bacia 01, 04 e 07 não são cortadas por canais. O córrego Botafogo corta as sub-bacia 2, tendo nesta, 4 km de comprimento e 1,6% de declividade; sub-bacia 3 apresentado 4,15 km de comprimento e 2% de declividade; sub-bacia 8, exibindo 0,5 km de comprimento e 0,3% de declividade e sub-bacia 10, exibindo 0,6 km de comprimento e 0,3% de declividade. As sub-bacia 05 e 06 cortam o córrego Areião que apresenta 2 km de comprimento e 2,3% de declividade. O córrego Sumidouro está inserido nas sub-bacias 08 e 09 apresentado 1,80 km de comprimento e declividade de 0,6%.

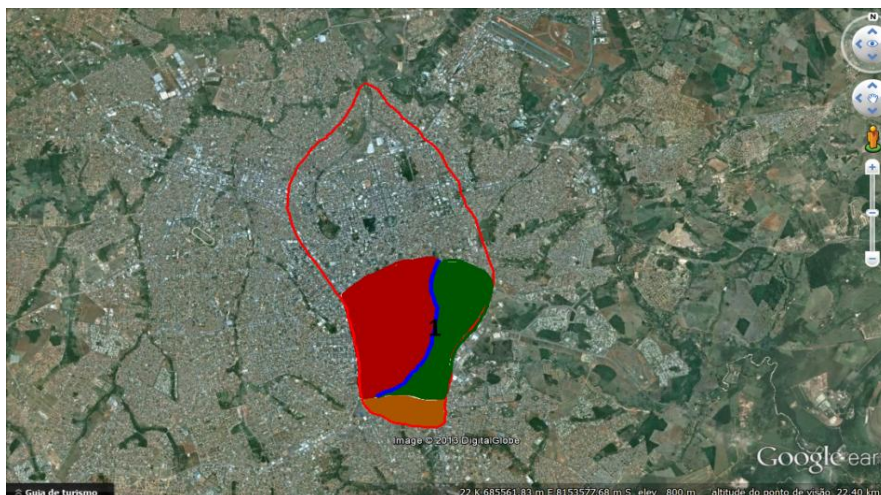


Figura 39. Canal considerado nas três sub-bacias de estudo.

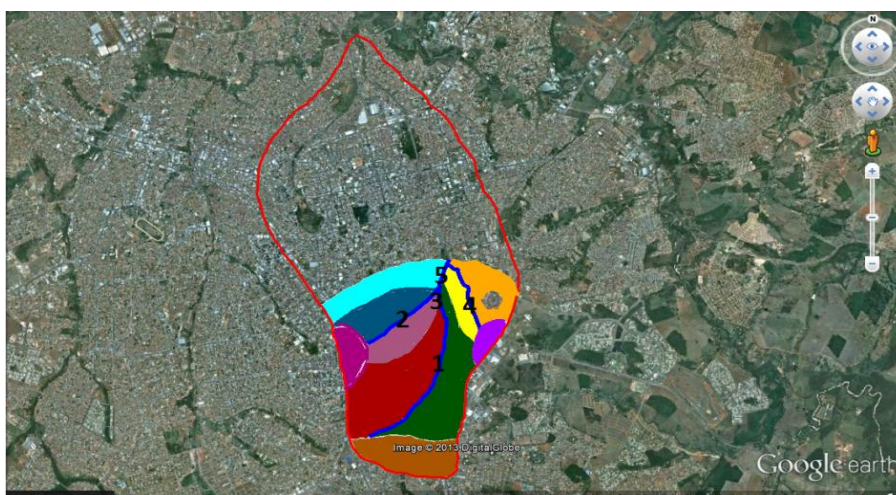


Figura 40. Canais inseridos para estudo das dez sub-bacias de estudo.

3.3.2.1 Geometria do canal

Para o desenvolvimento do modelo, adotou-se para o canal estudado a forma geométrica retangular, já que o mesmo apresenta grandes extensões canalizadas, e apresenta largura muito maior que a sua profundidade em grande parte do tempo, conforme a Figura 41, assim como ao longo de seus afluentes.

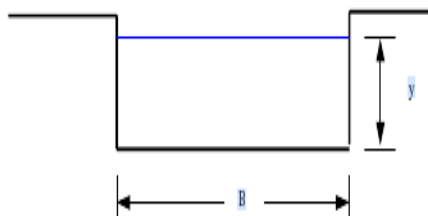


Figura 41. Canal retangular.

3.3.2.2 Propagação do escoamento

O modelo da onda cinemática foi descrito para o escoamento em planos. A diferença entre a abordagem apresentada e a simulação em rios é apenas devido ao meio em que se dá o escoamento. No plano a largura é semi-infinita, a profundidade pequena e a declividade grande. Quanto à solução numérica das equações os procedimentos são os mesmos, modificando-se as variáveis dependentes que no caso do plano é a vazão por unidade de largura q e no canal é utilizada a vazão Q . A profundidade é substituída pela área e a relação entre as variáveis fica:

$$A = \alpha Q^\beta \quad (3.20)$$

sendo que α e β são os parâmetros que têm expressões diferentes dos apresentados para simulação do plano. Utilizando a equação de Manning:

$$\alpha = \frac{n^{0,6} p^{0,4}}{S^{0,3}} \quad (3.21)$$

$$\beta = 0,6 \quad (3.22)$$

Com a expressão anterior é possível determinar o primeiro parâmetro para cada subtrecho a partir de informações físicas do mesmo.

3.3.2.3 Contribuição Lateral

A simulação da propagação do escoamento num trecho do canal é o cálculo do hidrograma de uma seção a partir do hidrograma da seção de montante do trecho, mais a contribuição do volume lateral entre as duas seções para intervalos concomitantes. Quando entre as duas seções existe contribuição em percurso que modifique substancialmente a forma do hidrograma de montante ou que o volume de contribuição lateral é preponderante, a vazão da bacia contribuinte deve ser obtida por dados observados ou simulados.

Quando a contribuição lateral é considerada pequena, o deslocamento da onda no rio é processo principal. Pode-se adotar uma distribuição uniforme ou linearmente proporcional para as vazões de contribuição lateral. A distribuição uniforme considera que a vazão lateral é constante durante todo o evento.

Como a contribuição lateral é importante para este estudo, e existem dados de vazão em rios afluentes, deve-se utilizar estes dados para estimar a mesma. Considerando que a bacia onde existem dados é representativa da vazão da bacia contribuinte, pode-se utilizar a proporção de área. A vazão de contribuição lateral fica:

$$Ql(t) = Qp(t) \frac{Al}{Ap} \quad (3.23)$$

Onde $Qp(t)$ é a vazão do posto com dados; Ap é a área da bacia do posto; Al é a área da bacia contribuinte ao trecho e $Ql(t)$ a contribuição lateral.

3.4 Variáveis de entrada do modelo

Variável de entrada de um modelo descreve quantitativamente um fenômeno que varia no tempo e no espaço e ocorre durante o início do processo da modelagem. Neste trabalho, a precipitação é uma variável que descreve a intensidade, frequência e duração da chuva. Para a modelagem hidrológica do canal será considerada como variável de entrada as contribuições laterais do mesmo (Tabela 1).

A precipitação de entrada constituiu-se de uma série de 13 eventos de chuva, registrados pelos pluviômetros.

Tabela 1. Variáveis de entrada do modelo para o plano e o canal

Variável	Unidade
Precipitação (P)	mm/h
Contribuições laterais (q)	m ³ /s

3.5 Variáveis de Saída

A variável de saída surge como parte dos cálculos, representando conceitos que se deseja explicitamente indicar no modelo. Elas representam um produto final do cálculo que se julga relevante. A variável de saída representa também pontos de acumulação dentro do sistema. Elas são as variáveis de entrada intermediárias. São afetadas pelos demais componentes do sistema, representadas por: altura da lâmina d'água, velocidade e declividade da linha de energia) e vazão, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis de saída e de estado do modelo - plano e canal.

Variável	Unidade
Vazão (Q)	m ³ /s
Altura da lâmina d'água (h)	m
Velocidade (V)	m/s
Declividade da linha de energia (d)	m/km

3.6 Parâmetros Físicos

Os parâmetros físicos são aqueles que não sofrem alteração durante os processo da modelagem e são representados pelas constantes das equações. Os parâmetros físicos caracterizam os sistema que será empregado pelo modelo, e estão descritos na Tabela 3.

Foram escolhidos somente seis parâmetros a serem calibrados, respeitado-se o conceito da parcimônia, que objetiva representar um modelo com a menor quantidade de parâmetros possíveis.

Tabela 3. Parâmetros físicos do modelo.

Parâmetros físicos	Unidade
Área (A)	km ²
Declividade (D)	m/m
Rugosidade (n)	(s.m ^{-1/3})
Raio hidráulico (R)	m
Largura do canal (S)	m

3.7 Ajuste do modelo

O objetivo do ajuste é encontrar o pico mais alto na superfície de resposta do parâmetro definido por funções objetivo. Os algoritmos de otimização são às vezes chamados de algoritmos de "subidas", uma vez que o ponto mais alto da superfície irá representar os valores ótimos dos parâmetros. Tal superfície de resposta é fácil de visualizar em dois espaços de parâmetros. É muito mais difícil de visualizar a superfície de resposta em um hiperespaço N-dimensional de parâmetros. Tais superfícies podem muitas vezes ser complexas e grande parte da investigação em algoritmos de otimização tem como objetivo encontrar algoritmos que são robustos em relação à complexidade da superfície em um espaço N-dimensional.

3.7.1 Equifinalidade

Os conjuntos de bons parâmetros fazem previsões diferentes, mas ao associar um peso com cada conjunto de previsões (mais alto para o ótimo, zero para os modelos que foram rejeitados), então pode-se estimar a incerteza resultante em previsões de uma forma muito simples, conceitualmente, por ponderação das previsões de todos os modelos aceitáveis por seu grau de verossimilhança associada. Tal abordagem permite a não-linearidade da resposta de modelos usando parâmetros de diferentes conjuntos na estimativa de predição e incerteza.

O ajuste por equifinalidade depende de algumas decisões (Figura 42):

- Decisão sobre a faixa viável para cada valor de parâmetro;
- Decisão sobre a estratégia de amostragem para definir o parâmetro;
- Decisão sobre a probabilidade adotada;
- Atualização da probabilidade adotada.

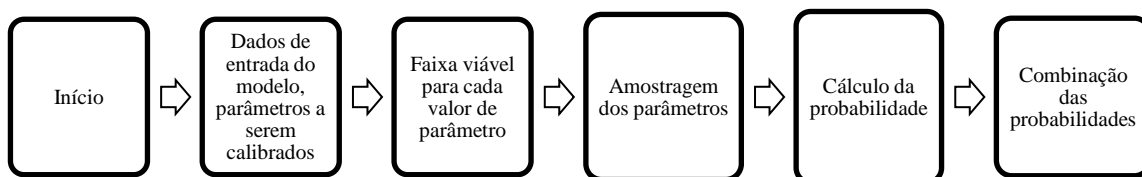


Figura 42. Etapas seguidas para implantação da metodologia do modelo GLUE.

Faixa viável para cada valor de parâmetro

O objetivo é ter um espaço de parâmetros suficiente para que bons ajustes do modelo não sejam excluídos, porém, não tão grande que os valores dos parâmetros não tenham nenhum sentido ou significado ou que desnecessárias iterações não-comportamentais do modelo sejam feitas. Ocorre frequentemente, que mesmo que os intervalos sejam amplos, resultados bons são encontrados até ao limite de alguns parâmetros. Isto ocorre devido a previsão do modelo não ser muito sensível a estes parâmetros, ou pode ser que o intervalo não tenha sido suficiente, uma vez que implicará ainda bons ajustes para além da borda do intervalo.

Os parâmetros do modelo a serem calibrados e suas respectivas faixas de variação estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros a serem calibrados pelo modelo e suas variações

Parâmetros do modelo	Unidade	Variações
Coefficiente de Manning para os planos (rugosidade)	(s.m ^{-1/3})	0,001 - 0,200
Porcentagem de área impermeável	(%)	0,001 - 1,000
Infiltração inicial	(mm/h)	10,00 – 120,00
Infiltração final	(mm/h)	5,00 – 60,00
Condutividade hidráulica saturada	-	0,01 – 10,00
Coefficiente de Manning para o canal (rugosidade)	(s.m ^{-1/3})	0,001 - 0,200

Amostragem para definir o parâmetro

A ideia é utilizar conjuntos de parâmetros escolhidos aleatoriamente para obter uma grande amostra, mas, uma grande quantidade de tempo de computador pode ser desperdiçado se um grande número de parâmetros são utilizados, resultando ainda em dados pobres ou insignificantes. Uma amostra uniforme e independente dos parâmetros no espaço-parâmetro pode ser utilizada. Isto assegura a independência prévia do parâmetro e é definido utilizando a probabilidade de escolha. É muito fácil de implementar, mas pode ser uma estratégia relativamente ineficiente se grande parte do resultado de parâmetros forem não-comportamentais às simulações. Para esta definição utiliza-se as simulações de Monte Carlo. Quanto maior o número de parâmetros e maior a complexidade da superfície de resposta, maior será o número de simulações que serão necessárias (BEVEN, 2001). Para o modelo em estudo foram realizadas 5.000 mil simulações para cada parâmetro.

Dada uma amostra suficientemente grande de simulações Monte Carlo, a faixa de probabilidade ponderada pode ser avaliada para obter os resultados a qualquer conjunto de tempo. Isto pode ser feito se os valores de probabilidade são reorganizados tal que $\sum L [M(\theta_i)] = 1$, onde $M(\theta_i)$ indica as iterações das amostras de Monte Carlo para qualquer espaço de tempo t :

$$P(\widehat{Q}_t < q) = \sum_{i=1}^N L \{M(\theta_i) | (\widehat{Q}_{i,t} < q)\} \quad (3.24)$$

Onde:

$Q_{i,t}$: é a variável de interesse previsto pela amostra i no tempo t na simulação Monte Carlo;

N : é o número de amostras;

A predição $P(\widehat{Q}_1 < q)$, obtida desta forma, são condicionadas nas entradas do modelo, as respostas do modelo para a amostra de parâmetro define a escolha subjetiva de probabilidade de ocorrência e as observações utilizadas no cálculo de probabilidade.

As simulações podem variar de acordo com o intervalo de tempo, refletindo as não-linearidades e variando os atrasos nas respostas do modelo. Também permitem que para características de distribuição de probabilidade os resultados do modelo ponderados podem variar a partir do tempo (BEVEN, 2001).

Probabilidade adotada

Há muitas medidas que podem ser usadas para avaliar os resultados de uma simulação do modelo. Estes, em parte, dependerão dos dados observacionais que estão disponíveis para avaliar cada modelo, mas mesmo se apenas um tipo de dado estiver disponível (como a vazão observada na avaliação de um modelo precipitação-vazão), existem diferentes formas de calcular um erro de modelo e usar os erros do modelo para calcular uma medida de probabilidade. Classificar uma amostra de modelo de desempenho, através de medidas de probabilidade diferentes dará rankings diferentes e a mesma medida calculada para diferentes períodos de observações também dará rankings diferentes.

Nash & Sutcliffe (1970) sugeriram como forma de calcular a probabilidade:

$$E = 1 - \frac{\sigma_{\varepsilon}^2}{\sigma_o^2} \quad (3.25)$$

Onde:

σ_{ε}^2 : variância dos erros

σ_o^2 : variância das observações;

E : eficiência;

Para um ajuste perfeito, a eficiência tem o valor igual a 1. Para um ajuste que não é tão bom assume-se que média dos dados é conhecido e tem o valor igual a zero

Combinação das probabilidades adotadas

Se mais do que um período de dados está disponível para avaliar o modelo, ou se novos dados se tornam disponíveis, então a probabilidade medida a partir de cada período podem ser combinados em um número de maneiras diferentes. Isto pode ser visto como um procedimento de combinação. Em cada fase, incluindo o primeiro

período, há uma probabilidade prévia associada a cada conjunto de parâmetros que é combinado com o valor da medida (peso) de probabilidade para o período que está sendo utilizado para a avaliação de cálculo de um valor posterior. A Equação Bayes é uma forma bem conhecida de fazer tais cálculos em teoria estatística, mas não é a única (BEVEN, 2001).

$$Lp(\theta_i|Y) = \frac{L_o(\theta_i)L(\theta_i|Y)}{C} \quad (3.26)$$

Onde:

$L_o(\theta_i)$: é a probabilidade prévia dos parâmetros;

$L(\theta_i|Y)$: é a probabilidade calculada para uma avaliação atual dado o conjunto de observações Y;

$L_p(\theta_i|Y)$: é a probabilidade posterior;

C: é uma constante de escalonamento para assegurar que a probabilidade cumulativa posterior é a unidade. Na metodologia GLUE é tomado todos os conjuntos de parâmetros.

A necessidade de combinar diferentes medidas de probabilidade surge num certo número de circunstâncias diferentes, incluindo o seguinte:

1. combinação de medidas de probabilidade para diferentes tipos de avaliação;
2. atualização de uma estimativa da probabilidade existente com uma nova medida calculada para o resultado de um novo conjunto de observações.

A maioria dos casos pode ser expressa como combinações sucessivas de probabilidades, onde uma estimativa da probabilidade anterior é atualizada utilizando uma medida probabilidade nova para uma formar uma probabilidade que será utilizada posteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados os resultados da aplicação do modelo desenvolvido neste trabalho. O modelo foi aplicado para três e dez sub-bacias, todas da bacia do córrego Botafogo, Goiânia – GO.

4.1 Análise Espacial da Precipitação

A instalação de pluviógrafos permitiu mapear a variabilidade da chuva ao longo da bacia do córrego Botafogo. Observa-se na Figura 43 que a cabeceira do córrego, recebeu chuvas mais intensas do que sua foz, sendo que o evento 02 foi predominantemente forte, em quase metade da bacia estudada, o contrário do evento 06.

Na Figura 44 ocorre o processo inverso, choveu com maior intensidade na foz do córrego Botafogo com o rio Meia Ponte. Apesar do evento 12 ser considerado de maior intensidade, nota-se que a chuva foi intensa apenas em um pequeno trecho da bacia, todavia a precipitação foi distribuída de maneira igualitária e a duração da chuva também foi um fator contribuinte para que o evento 12 atingisse a maior vazão. Os locais que apresentaram chuvas intensas provavelmente exibiram uma duração rápida da chuva, oposto do que ocorreu com as chuvas menos intensas, que apresentaram maior duração.

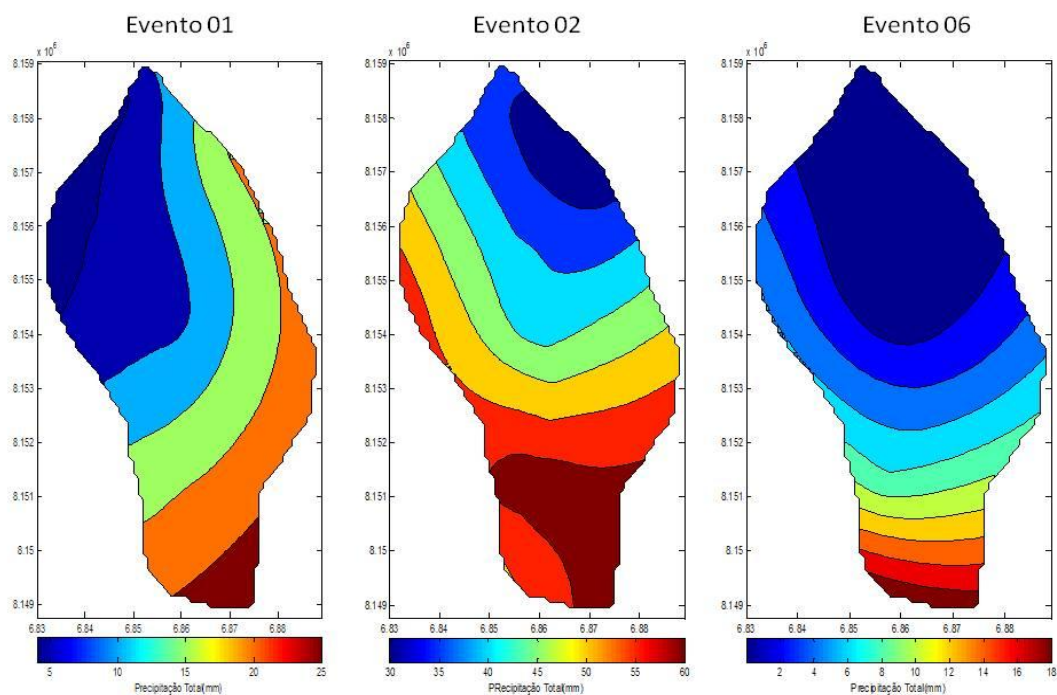


Figura 43. Distribuição espacial da chuva. Eventos 01, 02 e 06.

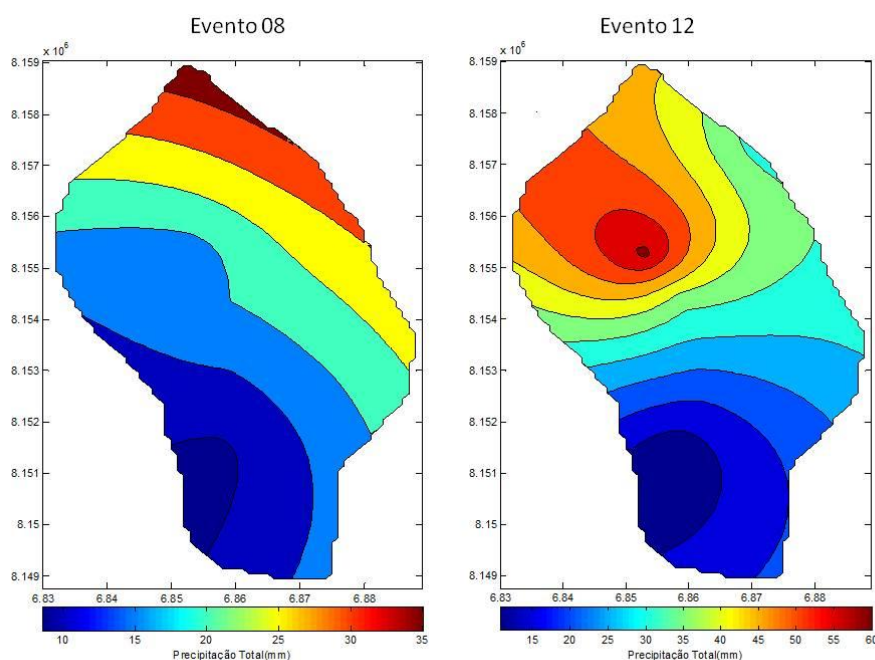


Figura 44. Distribuição espacial da chuva. Eventos 08 e 12.

4.2 Três sub-bacias

Para esta verificação, foram utilizadas simulações com entradas de precipitação proveniente dos dados adquiridos por meio dos pluviógrafos e linígrafos. Utilizou-se o método de Monte Carlo para determinar os valores ótimos de cada parâmetro. Efetuou-se 5 mil simulações para cada entrada de precipitação e vazão observada. O tempo gasto para as 5 mil simulações foi aproximadamente 24 horas.

As três sub-bacias estudadas foram delimitadas tendo como referência os linígrafos instalados ao longo do córrego Botafogo. As características como área, perímetro, declividade, área impermeável, largura do escoamento e comprimento do escoamento são demonstrados na Tabela 05 do Anexo A (página 126).

Após a implementação do modelo GLUE, foi avaliada a eficiência através da equação de Nash-Sutcliffe, para os seis eventos chuvosos: sendo três eventos considerados fortes (Evento 01, 02 e 12), dois eventos considerados médios (Evento 06 e 08), e um evento fraco (Evento 11), bem como os parâmetros combinados que fornecem a eficiência desejada, sendo fixado o valor de 0,5 como o critério de corte. Ou seja, foram considerados os conjuntos de parâmetros que apresentaram eficiência igual ou acima de 50%, sendo os valores inferiores a essa faixa desconsiderados.

Os eventos apresentaram valores representativos de avaliação, com exceção do evento 11, que obteve valores pobres e insignificantes, menores que 0,5 e por isso não

foi considerado. Podemos justificar esse fato em detrimento de algum erro de leitura do equipamento já que o evento é considerado de baixa intensidade ou ainda, é uma resposta do modelo ao evento fraco.

Verifica-se que para os eventos fortes foram encontrados valores significativos como 0,82 e 0,85 para os casos 01 e 02, respectivamente e para o evento 12, considerado o mais intenso, atingiu-se a eficiência de 0,89. O evento 06 considerado como mediano também apresentou resultado significativo de 0,86, porém, o evento 08 de intensidade média, menor que o evento 6, teve seu resultado em 0,56.

Aceitando que o modelo conseguiu selecionar um conjunto expressivo de número de conjuntos nas diferentes simulações realizadas, assim como, não foram efetuadas análises de outras medidas como critério da avaliação das séries simuladas, os prováveis estudos posteriores devem avaliar outras funções tendo em vista o objetivo da modelagem.

Nas Figuras 45 a 49 são apresentados os gráficos da vazão observada e das vazões simuladas de acordo com as maiores eficiências alcançadas para cada um dos eventos.

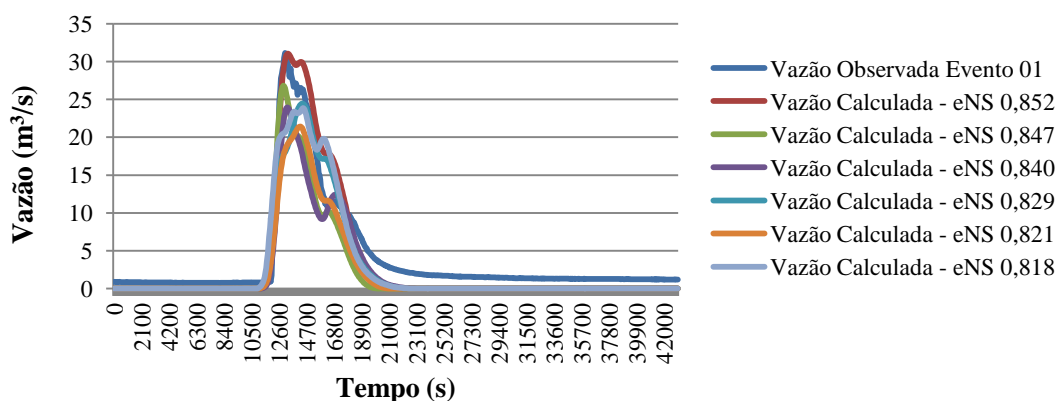


Figura 45. Vazão observada x vazões calculadas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 01 - 12/03/2012.

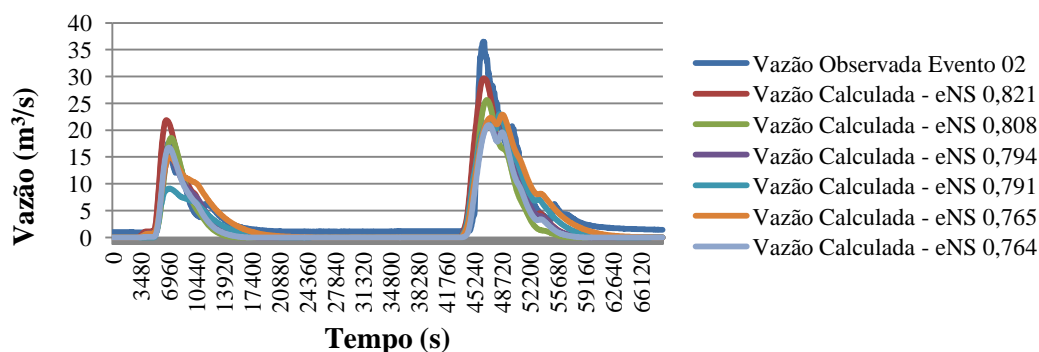


Figura 46. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 02 - 15/03/2012

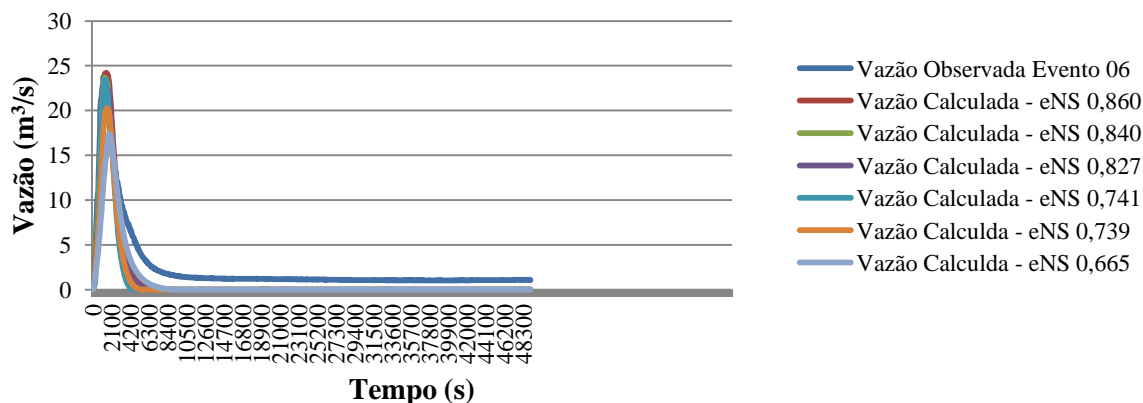


Figura 47. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 06 - 21/03/2012.

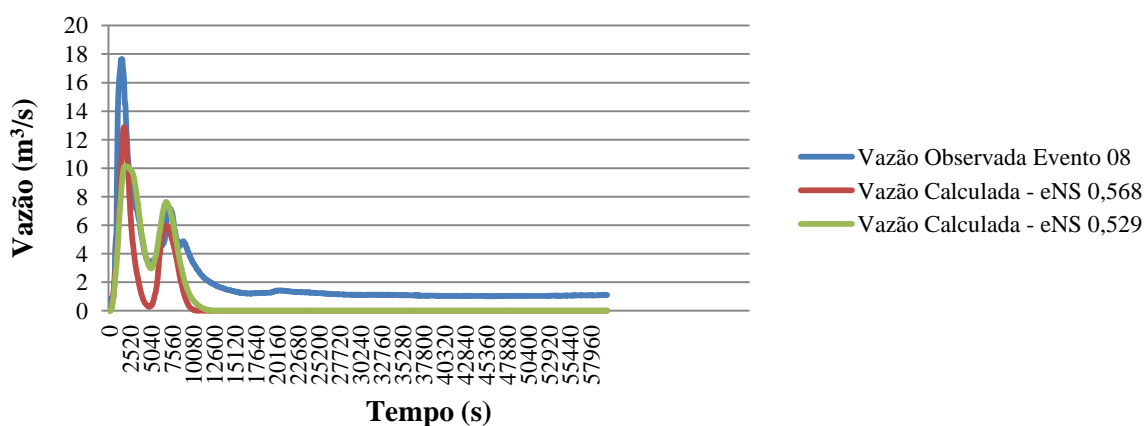


Figura 48. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 08 - 23/03/2012.

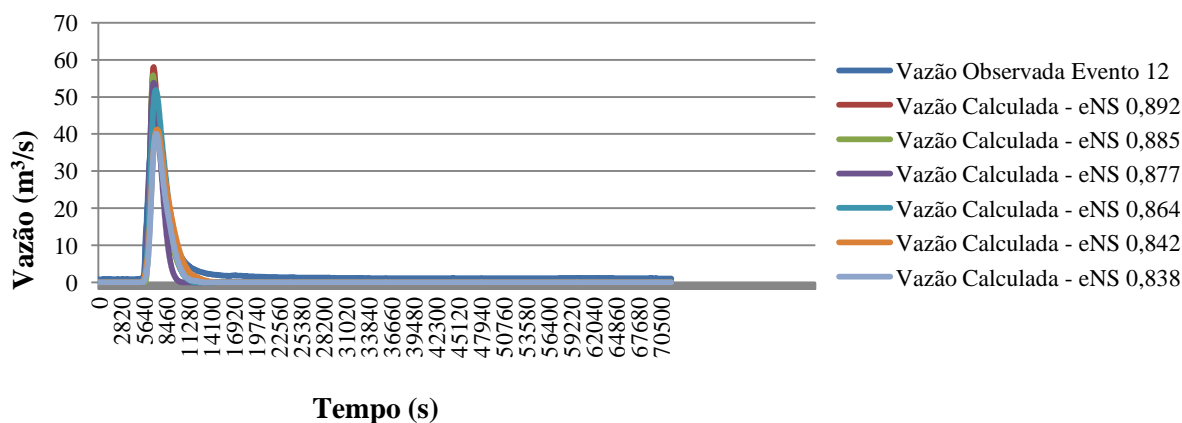


Figura 49. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash- Sutcliffe - Evento 12 - 27/03/2012.

Percebe-se nas figuras anteriormente apresentadas que o modelo apresentou dados aceitáveis de vazão, visto que a eficiência atingida foi alta, principalmente, para os eventos chuvosos fortes. Ressalta-se na Figura 45 que o conjunto de parâmetro que resultou em uma eficiência de 0,852 resultou em uma vazão semelhante à observada em

campo, não excluindo, porém, as demais eficiências. Um dos fatores do resultado da eficiência não apresentar maiores valores, deve-se ao período estudado do evento 01, que foi o menor que todos os outros eventos, com 720 dados de medições de precipitação e vazão, enquanto os demais apresentaram mais 1.000 medições.

Na Figura 46, observa-se que o primeiro pico de chuva foi superestimado por quase todos os conjuntos de parâmetros, enquanto o segundo pico foi subestimado, porém, atingindo a eficiência máxima de 0,821. Collier & Knowles (1986) elaboraram um gráfico relacionando os erros nas estimativas de precipitação com os erros na vazão observada e relataram que uma superestimativa de 30% na precipitação motiva uma superestimativa equivalente no escoamento para pequenas bacias e superestimativa menor do que 10% para bacias maiores. O mesmo acontece para as subestimativas, porém independente do tamanho da bacia.

A Figura 47 ilustra o evento mediano que apresentou uma eficiência elevada, 0,860, demonstrando o bom ajuste dos conjuntos de parâmetros, representados pela boa qualidade dos dados obtidos em campo e pela calibração realizada. Em contrapartida, a Figura 46 que também representa um evento mediano não apresentou um bom ajuste, apresentando eficiência máxima de 0,568 e tal fato, justifica-se pela dificuldade dos equipamentos utilizados em campo em captar eventos menores e com boa qualidade ou até mesmo a realização de leituras erradas. Todavia, pode significar ainda que o modelo não é adequado para eventos fracos.

O melhor ajuste ficou com o evento 12, ilustrado pela Figura 49, que é o evento mais forte de todos os apresentados, resultando em uma vazão de 60 m³/s, e apresentando eficiência máxima de 0,892, comprovando que o modelo apresenta maior eficiência e melhor comportamento para eventos fortes.

4.2.1 Cálculo da Probabilidade – Critério de Avaliação

O resultado do processo de seleção de conjuntos aceitáveis diz respeito à dispersão dos parâmetros aceitos no espaço viável definido inicialmente. Quando se tem uma maior dispersão significa que o modelo apresenta menor sensibilidade aos parâmetros, assim parâmetros pertencentes a diferentes regiões do espaço viável são capazes de permitir simulações aceitáveis. No entanto, essa análise deve considerar os conjuntos de parâmetros, e não parâmetros isolados. Dessa forma, a análise fornece uma razoável ideia da sensibilidade do modelo ao parâmetro analisado, devendo ser efetuada após o

processo de calibração. As Figuras 50 a 55 mostram a distribuição dos parâmetros aceitos no espaço viável.

Os conjuntos de parâmetros e de eficiências encontradas para cada evento foram: evento 01- 30 conjuntos e 30 valores de eficiência, evento 02 – 37 conjuntos e 37 valores de eficiência, evento 06 – 11 conjuntos e 11 valores de eficiência, evento 08 – 02 conjuntos e 02 valores de eficiência, evento 12 – 38 conjuntos e 38 valores de eficiência (Anexo B – página 130 - Tabelas 07 a 12).

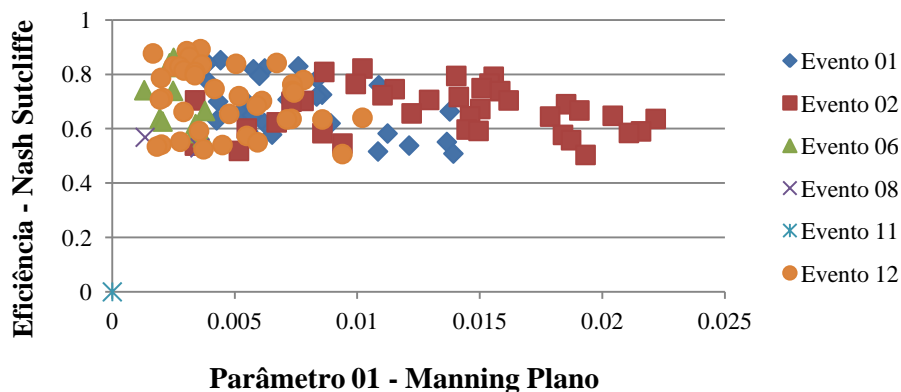


Figura 50. Eficiência Nash - Sutcliffe - Parâmetro 01.

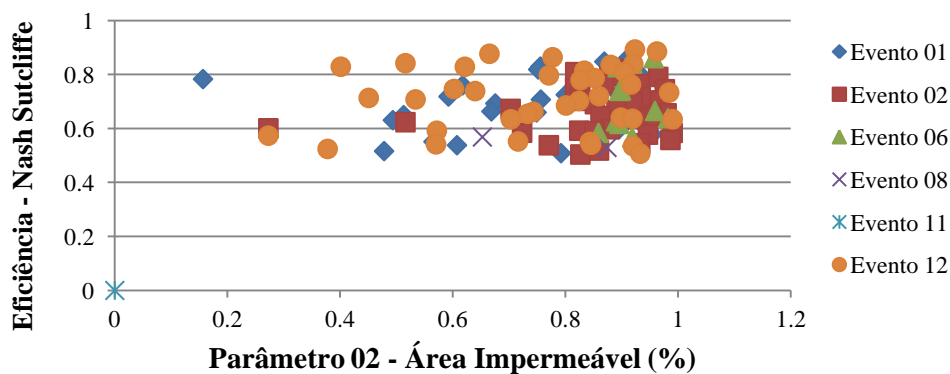


Figura 51. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 02.

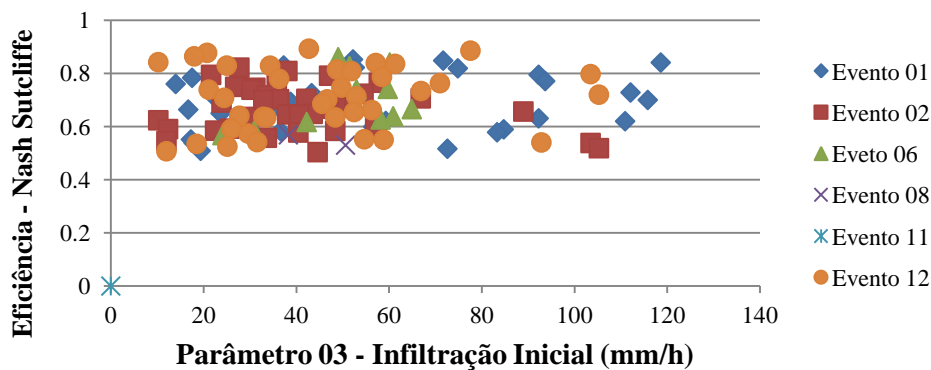


Figura 52. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 03.

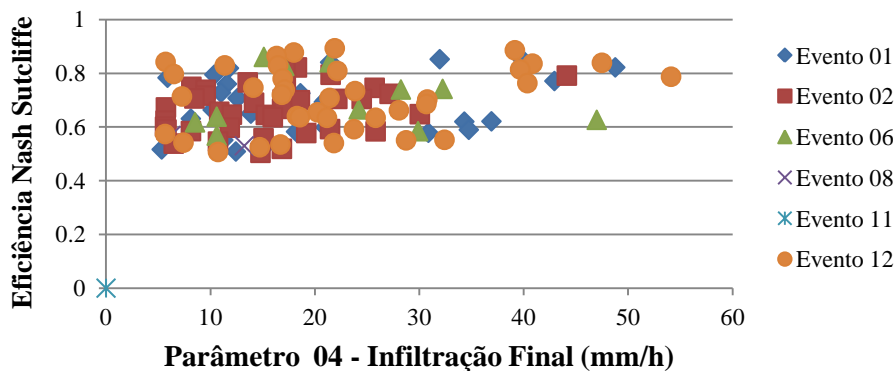


Figura 53. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 04.

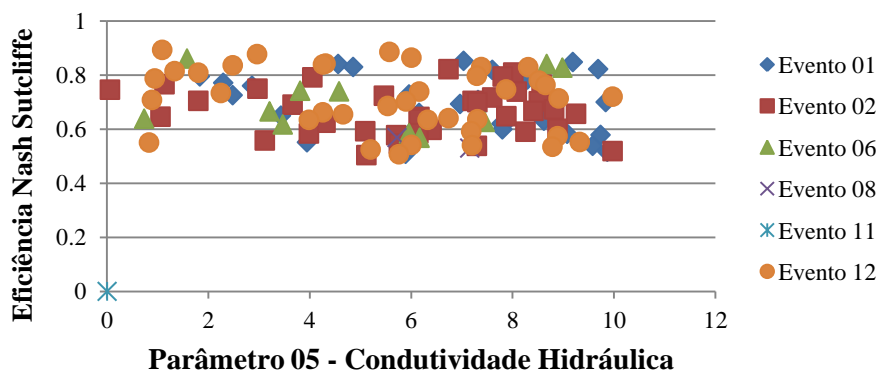


Figura 54. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 05.

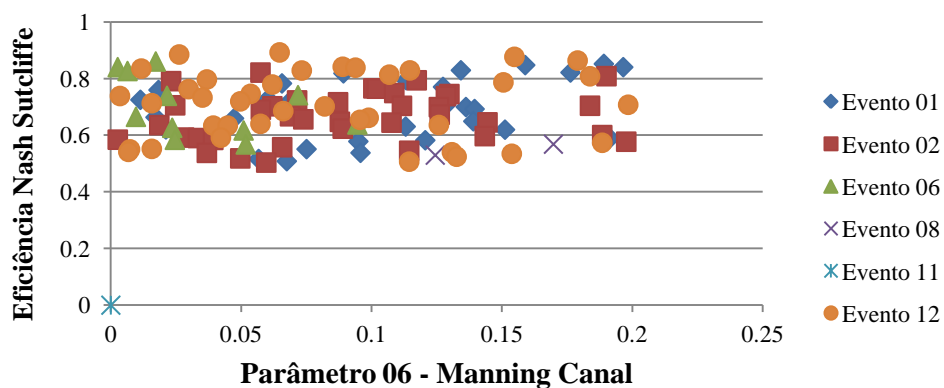


Figura 55. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 06.

Visualiza-se na Figura 50 que o parâmetro Manning do plano apresentou menor sensibilidade para os eventos 01 e 02, mostrando valores mais dispersos ao longo do gráfico. Isso deve-se ao fato de que os dois eventos ocorreram de maneira mais distribuída em toda bacia, ou seja, a precipitação ocorreu de forma quase igualitária nas três bacias, portanto, o escoamento percorreu superfícies variadas e de diferentes valores de Manning, ao contrário dos demais eventos, que provavelmente ocorreram de forma mais concentrada.

Apesar do escoamento dos referidos eventos sofrerem interferências de diversos valores de Manning, demonstra-se na Figura 51, que a grande parcela das precipitações, de maneira notória no evento 2, ocorreu em áreas impermeáveis. Portanto esse parâmetro mostrou-se bastante sensível para todos os eventos.

O coeficiente de rugosidade de Manning interfere no deslocamento da água sobre a superfície do terreno. Esse coeficiente ocasiona a redução da velocidade do escoamento, aumentando o tempo para a ocorrência da infiltração. Assim, em superfícies mais rugosas (maiores coeficientes de rugosidade), ocorre maior infiltração da água. Atentando-se a Figura 52, nota-se que o parâmetro infiltração inicial apresentou maior sensibilidade ao evento 02, visto que o mesmo ocorreu em e uma parcela maior de área impermeável, quando para os demais eventos apresentou-se menos sensível.

O coeficiente de Manning promove também o retardamento do escoamento superficial, interferindo na vazão máxima. Desta forma, o aumento deste coeficiente acarreta diminuição dos valores de vazão, fato que pode explicar o porquê das vazões dos dois primeiros eventos apresentarem vazões calculadas abaixo da vazão observada.

As figuras 53, 54 e 55 indicam que os parâmetros avaliados são menos sensíveis já que apresentam maior dispersão. A sensibilidade ou “insensibilidade” de um parâmetro pode estar associada a uma correlação com outro parâmetro, que é o que ocorre com o parâmetro área impermeável, que influencia nos valores de infiltração inicial. Pode-se perceber este fato analisando o evento 06 nas figuras citadas, é o menos sensível, a grande parte dos parâmetros, demonstrando que se existem áreas menos impermeabilizadas, maior será a infiltração.

Os parâmetros menos sensíveis de todo o estudo foram a condutividade hidráulica, que não leva em consideração os tipos, usos e ocupações do solo, e o Manning do canal. Porém, não se pode avaliar os parâmetros de maneira isolada, e sim conjuntamente.

A Figura 56 indica que para todos os eventos estudados, os parâmetros que sofreram maiores variações foram, o Manning do plano, a condutividade hidráulica e o Manning do canal. Essas diferenças evidenciadas indicam uma forte não-linearidade do modelo, com alterações não-proporcionais e deduzidas matematicamente. Entretanto a variabilidade dos valores dos parâmetros não significa que os mesmos apresentem maior ou menor sensibilidade. Os demais parâmetros apresentaram pequenas variações.

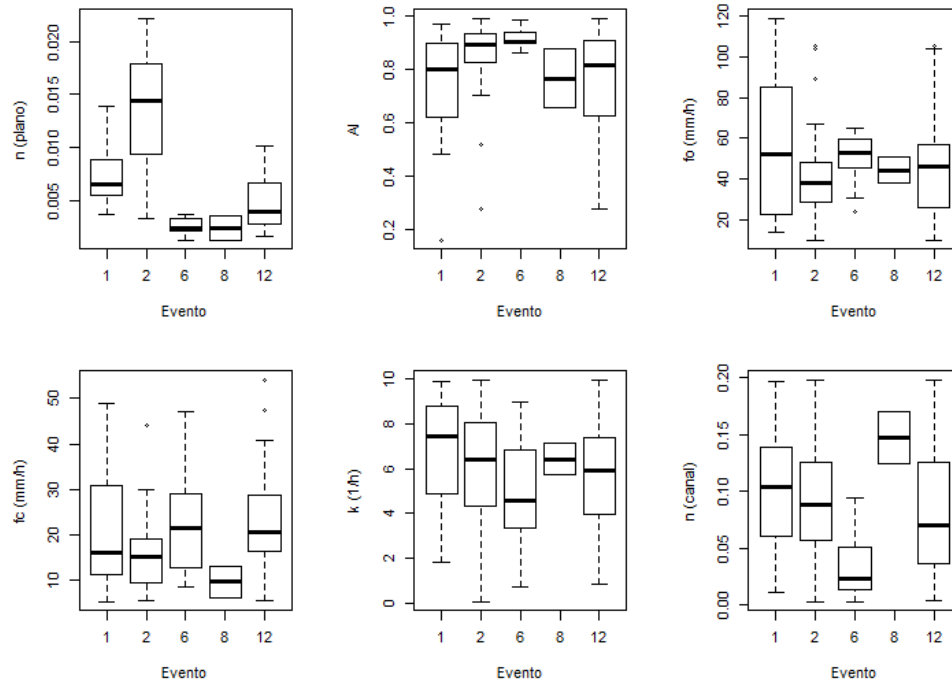


Figura 56. Variações dos parâmetros por evento estudado.

Após o resultado das probabilidades e dos conjuntos de parâmetros gerados, realizou-se a recombinação das probabilidades de cada conjunto de parâmetros, escalonando-os de modo que a soma cumulativa das probabilidades resultassem em 1.

4.2.2 Combinação das probabilidades adotadas

A combinação das probabilidades (Figuras 57 a 62) permite mostrar de outra forma a sensibilidade do modelo aos parâmetros, através da comparação entre a distribuição uniforme admitida inicialmente e a verificada, para que seja avaliada a validade da hipótese inicial de que parâmetros possuem distribuição uniforme nos intervalos definidos a priori.

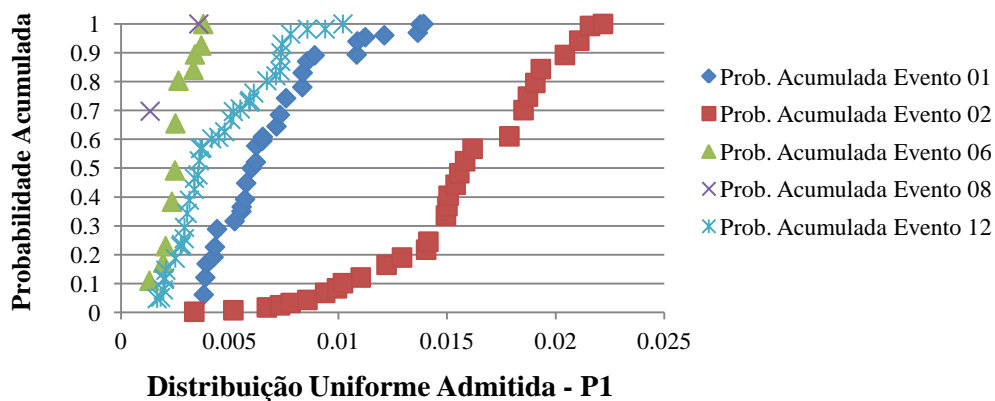


Figura 57. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Manning do Plano.

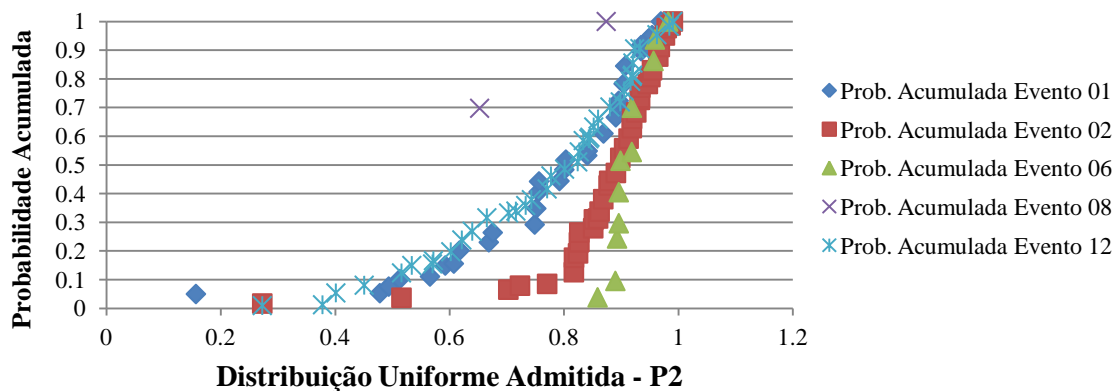


Figura 58. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Área Impermeável.

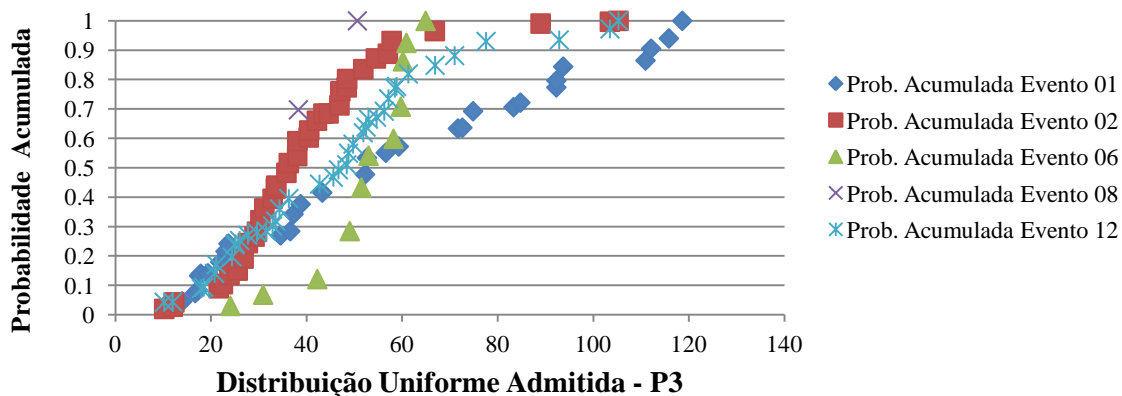


Figura 59. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Infiltração Inicial.

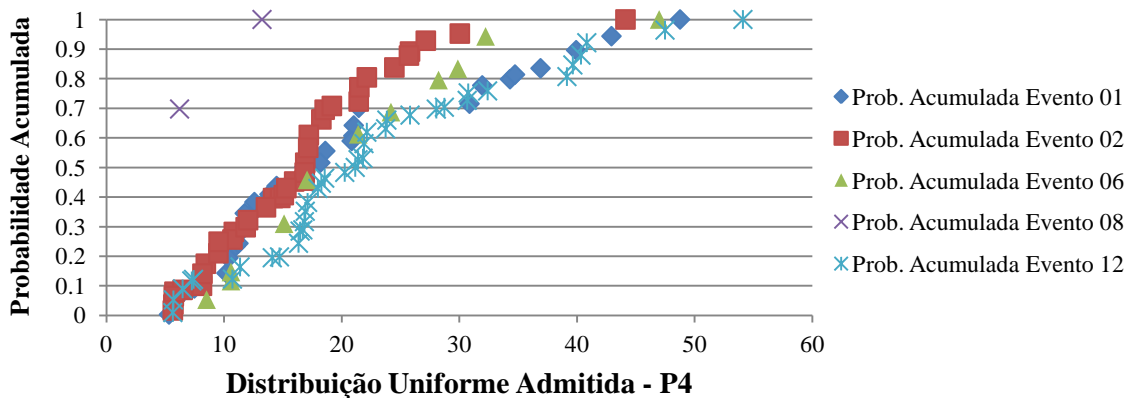


Figura 60. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Infiltração Final.

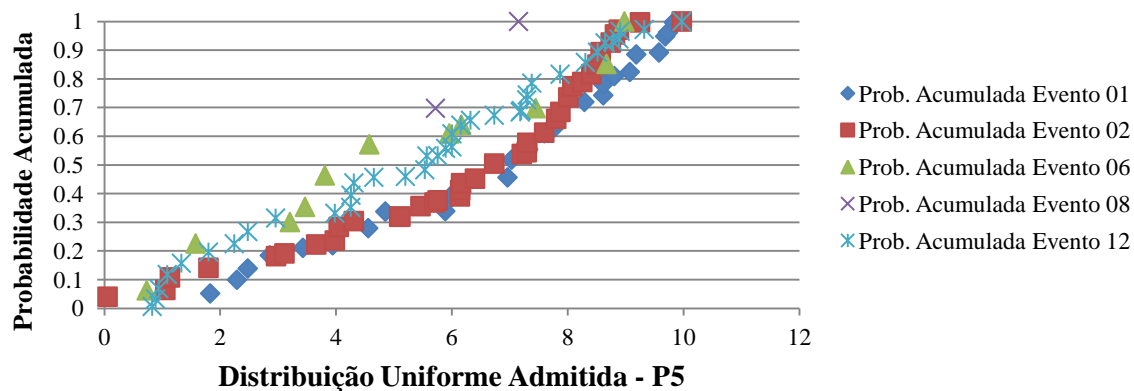


Figura 61. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Condutividade Hidráulica.

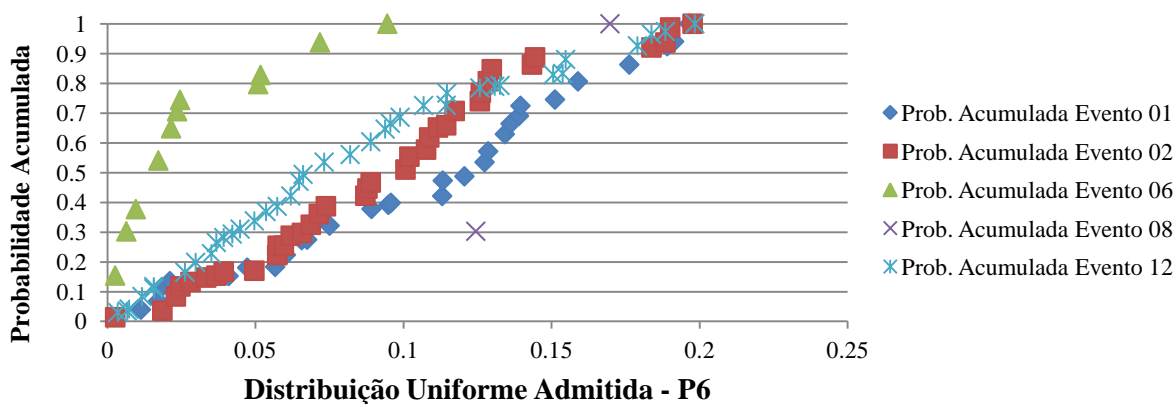


Figura 62. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Manning do Canal.

De maneira geral, todos os parâmetros indicaram uma boa distribuição no intervalo viável. Atenta-se para as Figuras 57 a 62 que os valores dos parâmetros possuem uma taxa de confiabilidade de 90%, pois os resultados aceitáveis encontram-se no intervalo de 5% a 95%. O Manning do plano apresenta variações de 0,0018 a 0,021, ou seja, foram excessivamente baixos e irrealistas, e podem indicar uma compensação na declividade inicial dos planos, a área impermeável exibe intervalo de 0,5 a 0,95, a infiltração inicial demonstrou-se aceitável entre 30,9 a 115,8 (mm/h), a infiltração final de 5,70 a 30 (mm/h), a condutividade hidráulica evidenciou valores de 1,82 a 8,81 e o Manning do canal apresentou variações de 0,017 a 0,18.

Para as curvas que apresentaram comportamentos diferentes nas figuras supracitadas, os eventos foram considerados como eventos de mínimo.

4.2.3 Análise de Sensibilidade dos parâmetros

Para saber o quão sensível é o modelo à variação dos parâmetros, o modelo foi rodado para o melhor conjunto de parâmetros, aquele que obteve o maior valor da eficiência de Nash-Sutcliffe. No entanto, admitiu-se uma variação de um por cento para mais e para menos para cada conjunto de parâmetros, resultando então, a sensibilidade de cada parâmetro, conforme as Figuras 63 a 67.

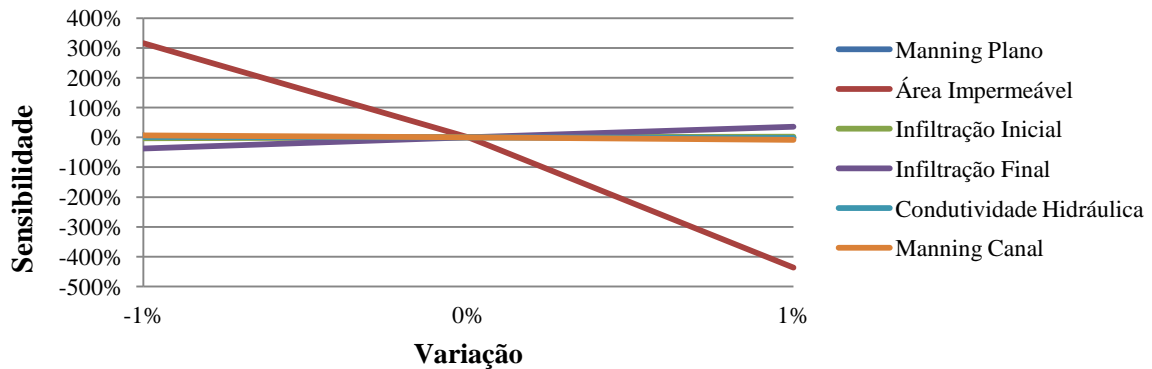


Figura 63. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 01.

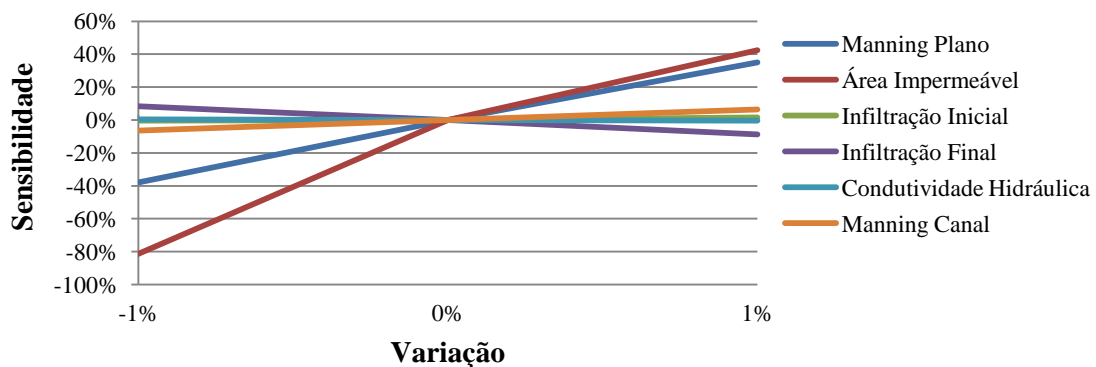


Figura 64. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 02.

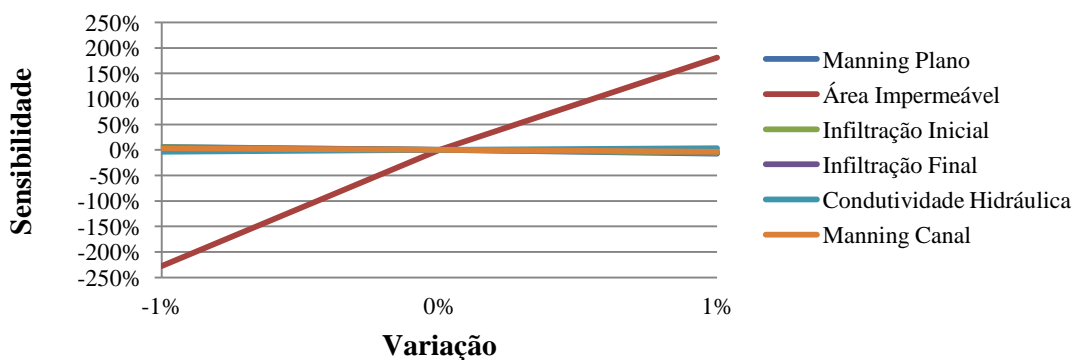


Figura 65. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 06.

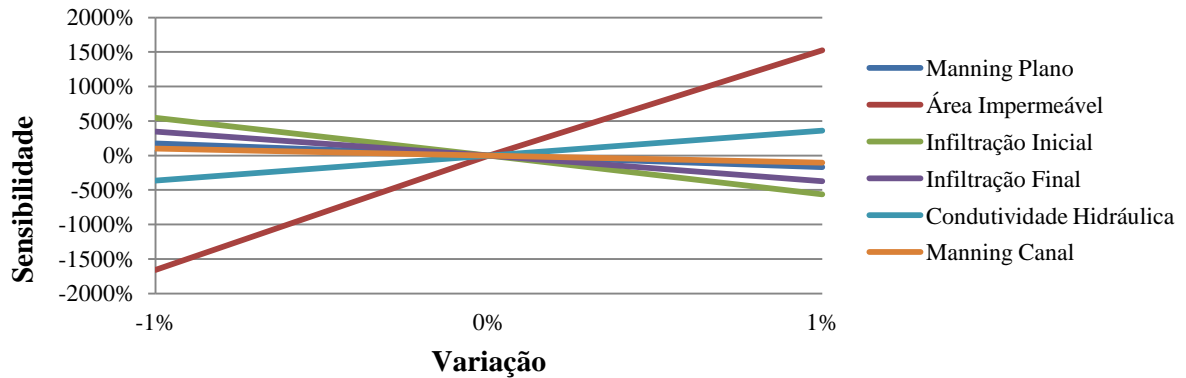


Figura 66. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 08.

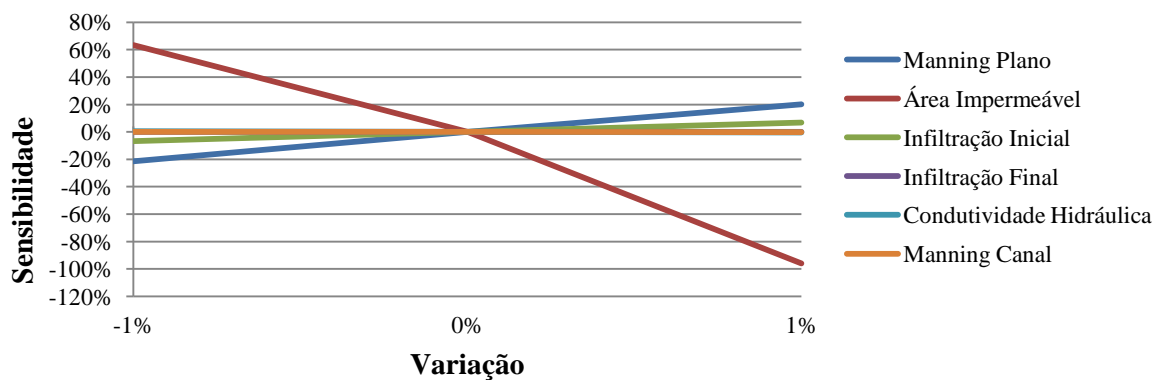


Figura 67. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 12.

Caso a análise de sensibilidade mostre que uma pequena variação no dado de entrada causa uma grande variação no dado de saída, sabe-se que devem ser aplicados maiores esforços na determinação bem confiável do dado de entrada. Percebe-se pelas figuras supracitadas que todas apresentaram maior sensibilidade a área impermeável. A Figura 63 para os demais parâmetros apresentou pouca sensibilidade, quanto a Figura 64 apresentou sensibilidade de maior significância, visto que além da área impermeável, o manning do plano sofreu alterações, já previstas pelas figuras anteriormente apresentadas e comentadas. O evento 06 representado pela Figura 65, não demonstrou outros parâmetros sensíveis. No evento 08, nota-se que todos os parâmetros variaram de uma maneira quase igualitária, isso por que esse evento foi o de menor eficiência, sendo assim sofreram maiores variações de sensibilidade. Na Figura 67, destaca-se além da alteração sofrida pela área impermeável, o Manning do plano.

4.3 Dez sub-bacias

Assim como nas três bacias, foram efetuadas 5 mil simulações para cada entrada de precipitação e vazão observada. As características das dez sub-bacias, como área, perímetro, declividade, área impermeável, largura do escoamento, comprimento do escoamento e comprimento do canal são demonstrados na Tabela 06 do Anexo A (página 126).

Inicialmente foi gerada a eficiência do modelo por meio da equação de Nash-Sutcliffe, para os seis eventos chuvosos, bem como os parâmetros combinados que fornecem a eficiência desejada, sendo fixado o valor de 0,5 como o critério de corte.

Destaca-se nas Tabelas 13 a 18 do Anexo B (página 130) que os eventos 01, 02, 06 e 12 apresentaram valores bastante representativos de avaliação, destaca-se ainda que os eventos 01, 02 e 12, obtiveram resultados de eficiência melhores do que os demonstrados nas três sub-bacias estudadas, apresentando os valores de 0,87, 0,83 e 0,95, respectivamente (Figuras 68, 69 e 71). Outro ponto a ser ressaltado deve-se a diminuição da eficiência do evento 06 para 0,71 (Figura 70). O evento 08 que apresentou baixas, porém, aceitáveis eficiências para as três sub-bacias, não apresentou resultados satisfatórios (menores que 0,5) para a modelagem das dez sub-bacias, assim como o evento 11.

Braud *et al* (1999) analisaram comparativamente variações encontradas na altura de chuva, no escoamento e nos picos de vazão, averiguaram que quando não se considera a variabilidade da chuva os valores da chuva média sobre a bacia variam mais de 100% e tais alterações podem ser observadas no volume escoado e nas vazões de pico. Se a área é bastante impermeável e a chuva encontra-se mal representada, afirmaram que grandes distorções no escoamento final são visíveis.

Pode-se admitir ainda, que como a bacia encontra-se mais dividida, as áreas tornaram-se menores. Em consequência, os eventos fortes de precipitação atingem o solo de maneira mais rápida, saturando a sua capacidade de infiltração passando a gerar escoamentos superficiais que alimentarão o canal em questão. A mesma lógica aplica-se aos eventos medianos e fracos de precipitação, que em bacias distribuídas não conseguem alcançar de forma igualitária todas as áreas e a precipitação não consegue exceder a infiltração, não ocorrendo, portanto, o escoamento superficial que incidirá sobre o canal em questão. Outro fator a ser ressaltado é que muitos dos eventos

chuvosos estudados ocorreram ainda em dias consecutivos, sendo assim, o solo encontrava-se molhado e passou a contribuir ainda mais com o escoamento superficial.

Apesar de apresentar uma maior distribuição, as sub-bacias estudadas compõem uma bacia compacta que tende a concentrar o escoamento no canal principal. Destaca-se ainda a declividade das sub-bacias, muitas delas são consideradas suavemente inclinadas produzindo escoamento superficial mais rápido e mais volumoso, por ser menor a chance de infiltração.

Sendo assim, para uma mesma área da bacia de contribuição, as variações das vazões instantâneas no curso d'água serão tanto maiores e dependerão tanto mais das chuvas de alta intensidade, quanto (BARBOSA JR, ?):

- maior for a declividade do terreno;
- menores forem as depressões retentoras de águas;
- mais retilíneo for o traçado e maior a declividade do curso d'água;
- menor for a quantidade de água infiltrada; e
- menor for a área coberta por vegetação.

Visto que o modelo conseguiu selecionar um conjunto expressivo de número de conjuntos nas diferentes simulações realizadas não foram efetuadas análises de outras medidas como critério da avaliação das séries simuladas, os prováveis estudos posteriores devem avaliar outras funções tendo em vista o objetivo da modelagem.

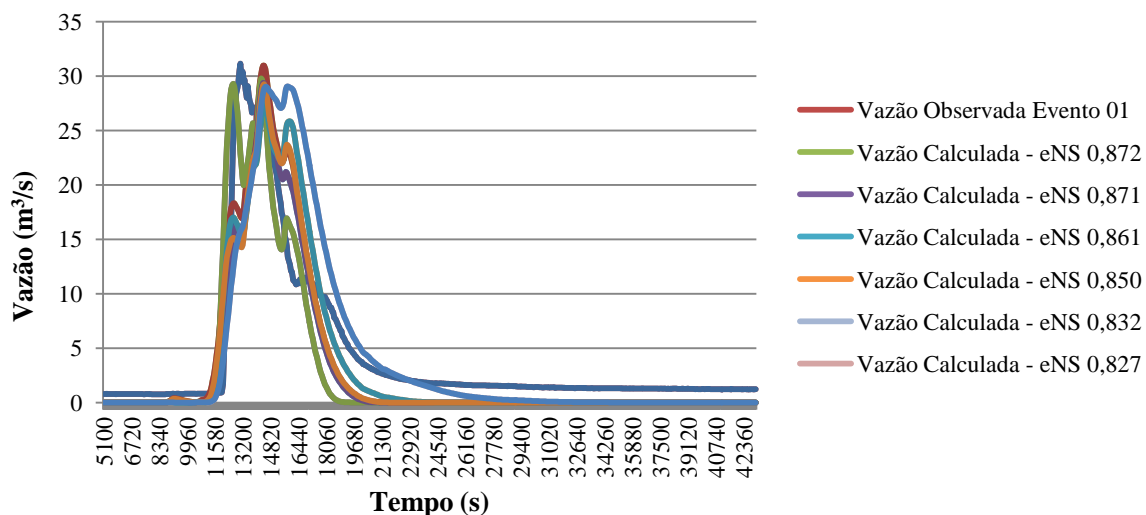


Figura 68. Vazão observada x vazões simuladas para diferentes coeficientes de Nash-Sutcliffe - Evento 01 - 12/03/2012.

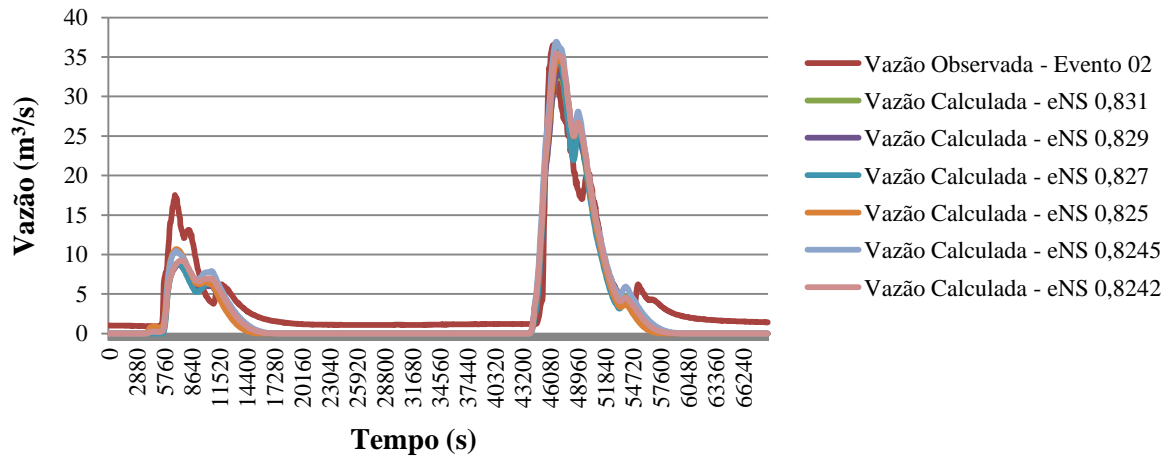


Figura 69. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 02 - 15/03/2012.

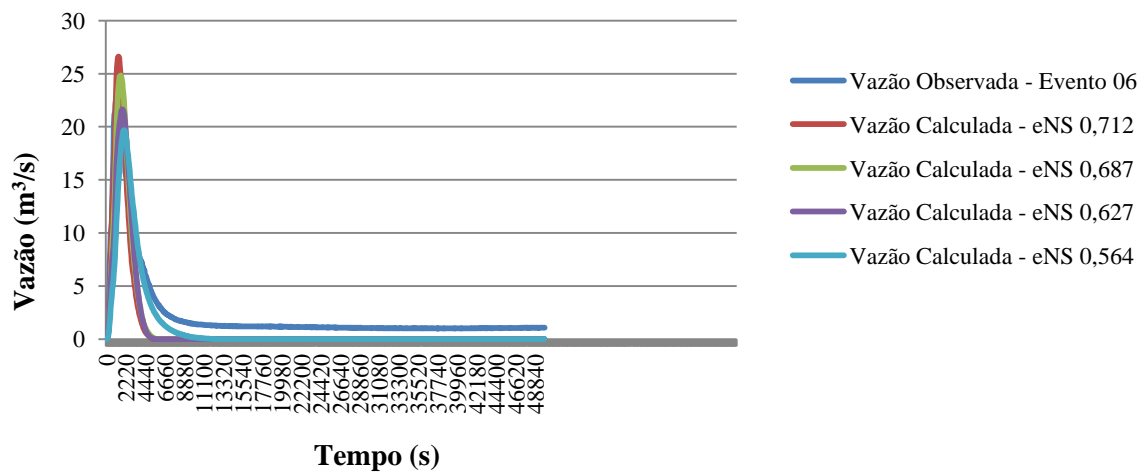


Figura 70. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 06 - 21/03/2012.

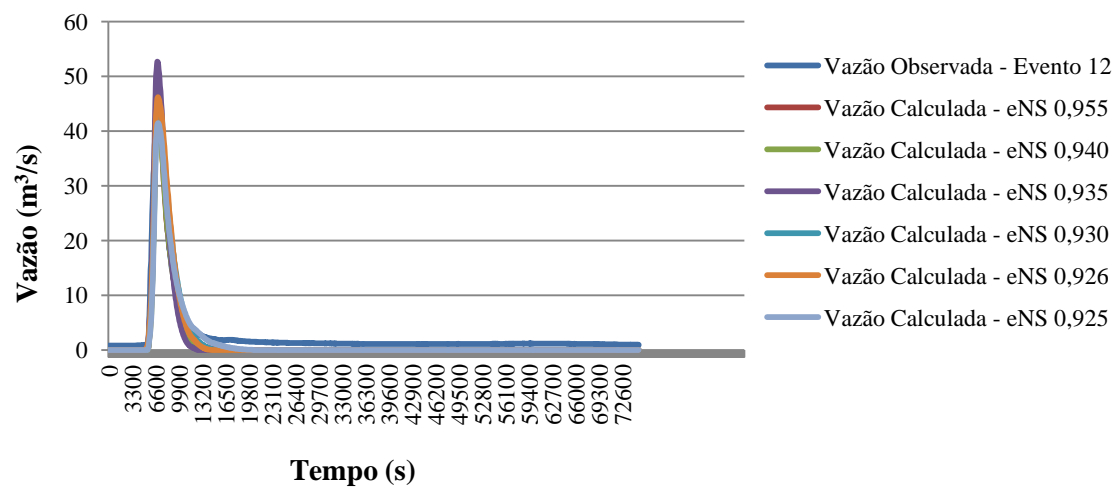


Figura 71. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 12 - 27/03/2012.

4.3.1 Cálculo da Probabilidade – Critério de Avaliação

Conforme já explicitado para as três sub-bacias, o resultado do processo de seleção de conjuntos aceitáveis diz respeito à dispersão dos parâmetros aceitos no espaço viável definido inicialmente. Apresentando-se uma maior dispersão significa que o modelo apresenta menor sensibilidade aos parâmetros, assim parâmetros pertencentes a diferentes regiões do espaço viável são capazes de possibilitar simulações aceitáveis. No entanto, essa análise deve considerar os conjuntos de parâmetros, e não parâmetros isolados. Dessa forma, a análise fornece uma razoável ideia da sensibilidade do modelo ao parâmetro analisado, devendo ser efetuada após o processo de calibração. As Figuras 72 a 77 mostram a distribuição dos parâmetros aceitos no espaço viável.

Os conjuntos de parâmetros e de eficiências encontradas para cada evento foram: evento 01 - 82 conjuntos e 82 valores de eficiência, evento 02 – 203 conjuntos e 203 valores de eficiência, evento 06 – 04 conjuntos e 04 valores de eficiência e evento 12 – 134 conjuntos e 134 valores de eficiência (Tabela 13 a 18 Anexo B). Nota-se que para as dez sub-bacias, nos eventos mais intensos a quantidade dos conjuntos de parâmetros e a quantidade do número de eficiências alcançadas mais que dobrou em relação as três sub-bacias, enquanto para os eventos menos intensos a quantidade diminuiu drasticamente, chegando a inexistir para os mais fracos.

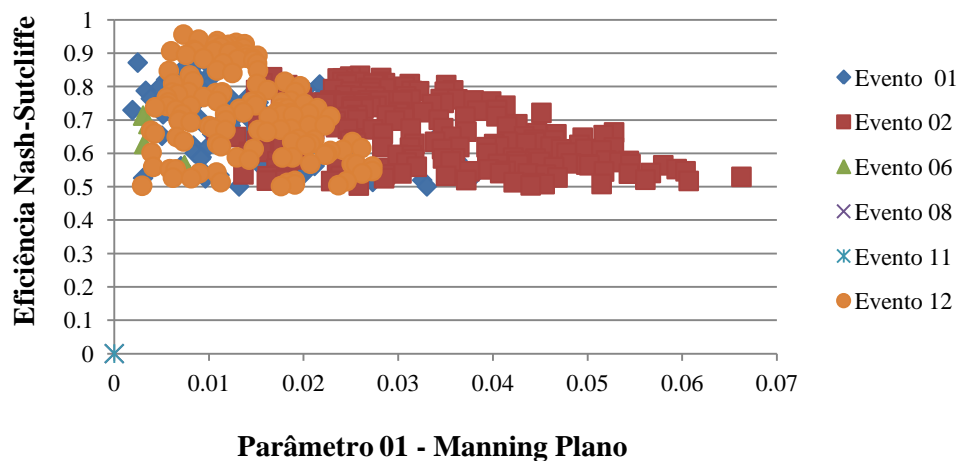


Figura 72. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 01.

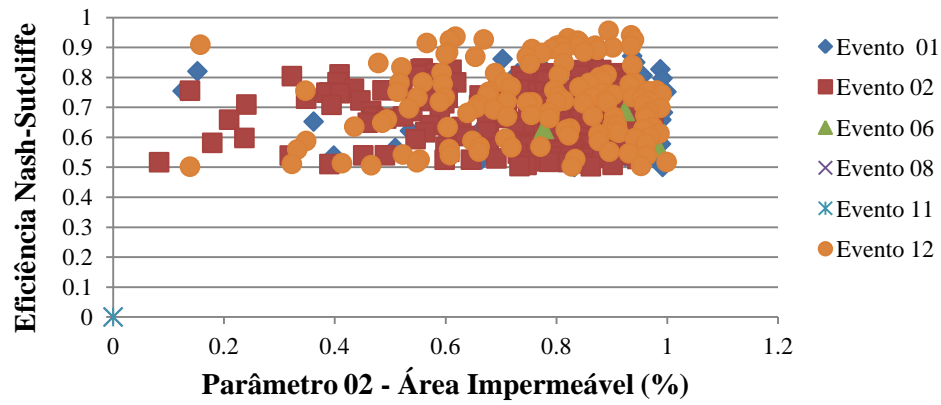


Figura 73. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 02.

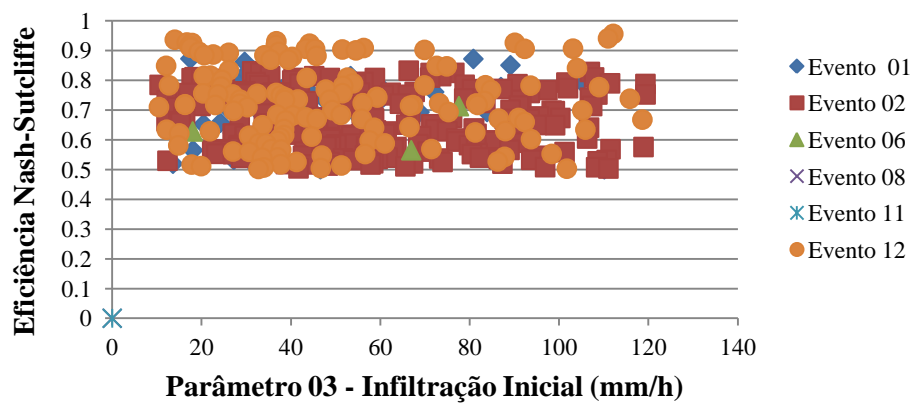


Figura 74. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 03.

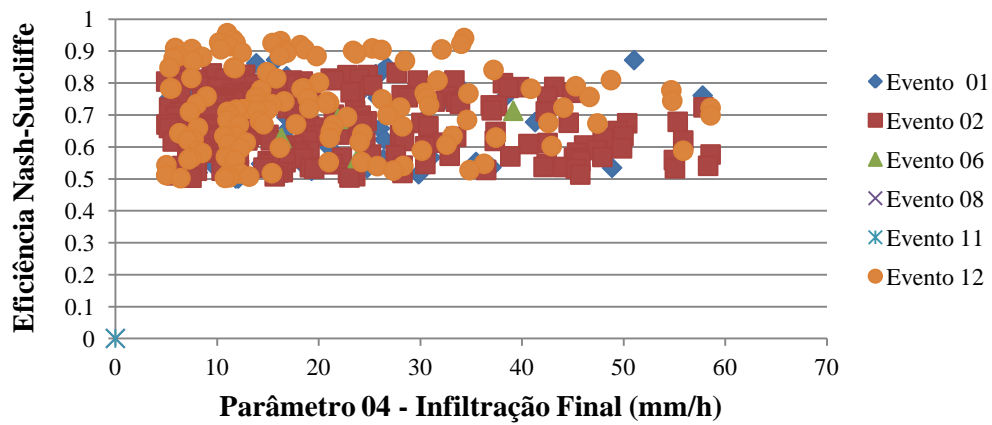
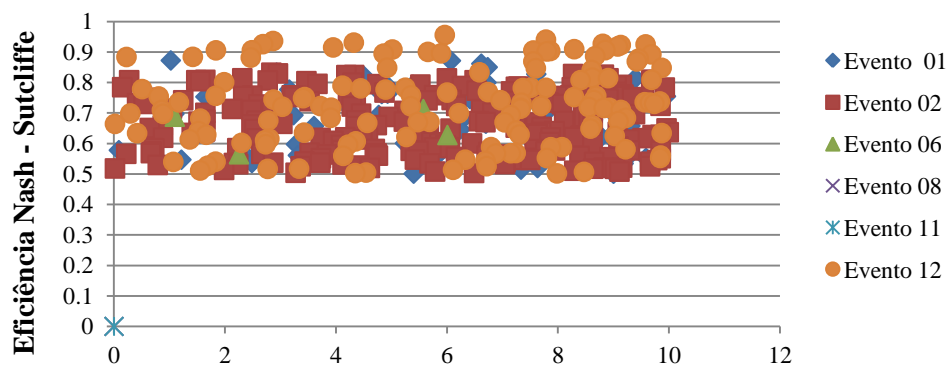
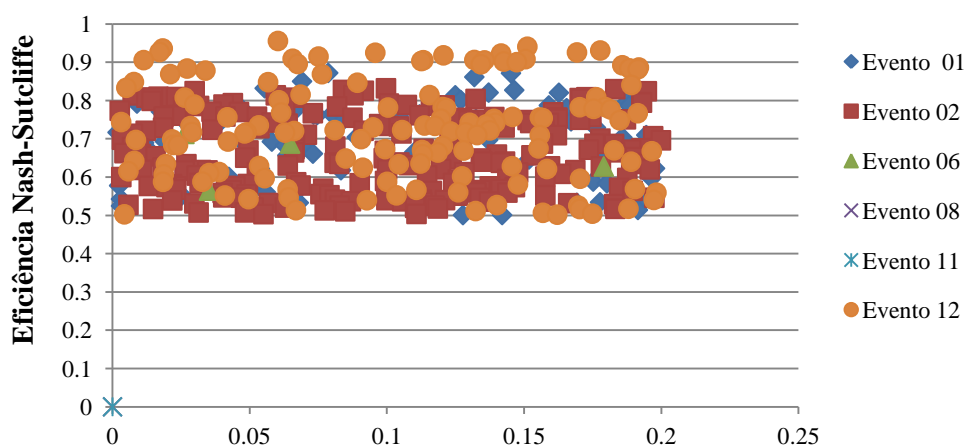


Figura 75. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 04.



Parâmetro 05 - Condutividade Hidráulica

Figura 76. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 05.



Parâmetro 06 - Manning Canal

Figura 77. Eficiência Nash- Sutcliffe - Parâmetro 06.

Da mesma forma como visualizado nas três sub-bacias, nota-se na Figura 72 que o parâmetro Manning do plano apresentou menor sensibilidade para o eventos 01 e 02, mostrando valores mais distribuídos ao longo do gráfico. Diferente da anterior, a Figura 73, demonstra uma menor sensibilidade do evento 02 para área impermeável, já que houveram maiores distribuições de áreas para o evento, indicando ainda a abrangência de áreas permeáveis.

As Figuras 74, 75, 76 e 77 indicam menores sensibilidades dos parâmetros em relação aos eventos intensos.

A Figura 78 abaixo, demonstra que para todos os eventos estudados, os parâmetros que sofreram maiores variações foram, o Manning do plano, a condutividade hidráulica e o Manning do canal, sendo os dois últimos semelhantes para os eventos considerados

intensos. Os demais parâmetros apresentaram pequenas variações, deixando nítida a melhor representatividade dos resultados para eventos fortes.

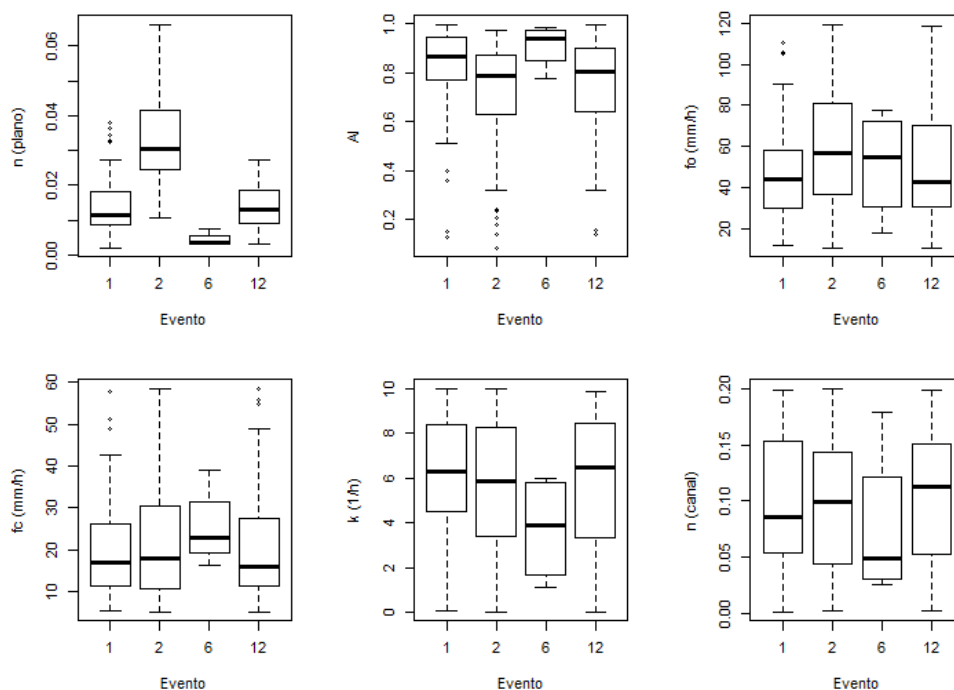


Figura 78. Variações dos parâmetros por evento estudado.

Pode-se concluir que quanto maior a discretização de uma bacia hidrográfica, o modelo representará com maior fidedignidade os fenômenos.

Após o resultado das probabilidades e dos conjuntos de parâmetros gerados, realizou-se a recombinação das probabilidades de cada conjunto de parâmetros, escalonando-os de modo que a soma cumulativa das probabilidades resultassem em 1.

4.3.2 Combinação das probabilidades adotadas

As Figuras 79 a 84 permitem mostrar a combinação de probabilidades, que nada mais é do que outra forma de demonstrar a sensibilidade do modelo aos parâmetros, através da comparação entre a distribuição uniforme admitida inicialmente e a verificada, para que seja avaliada a validade da hipótese inicial de que parâmetros possuem distribuição uniforme nos intervalos definidos a priori.

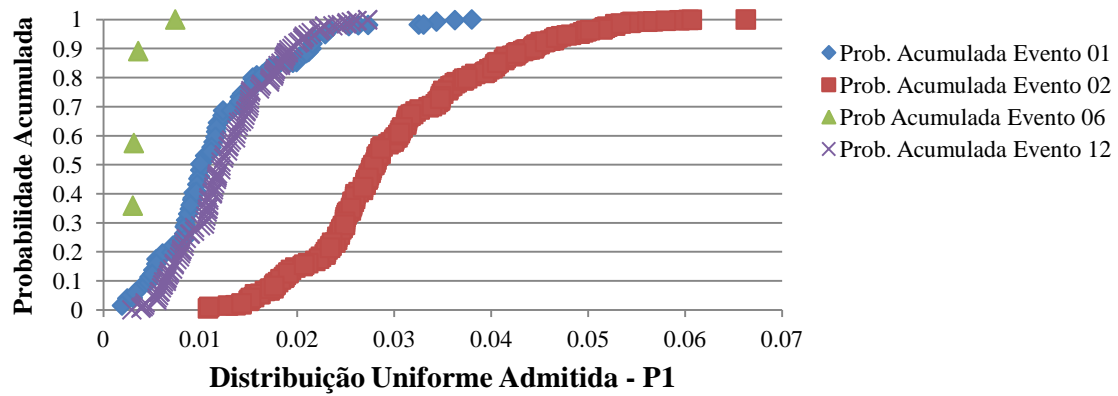


Figura 79. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Manning do Plano.

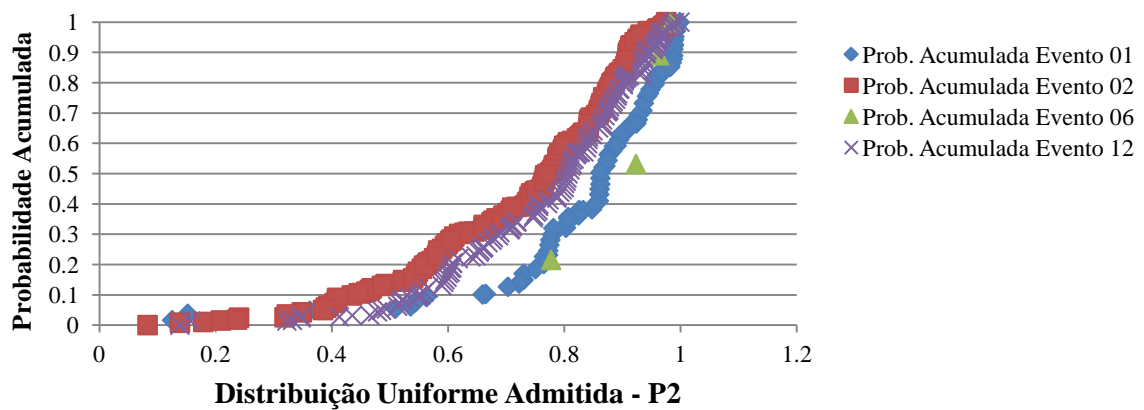


Figura 80. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Área Impermeável.

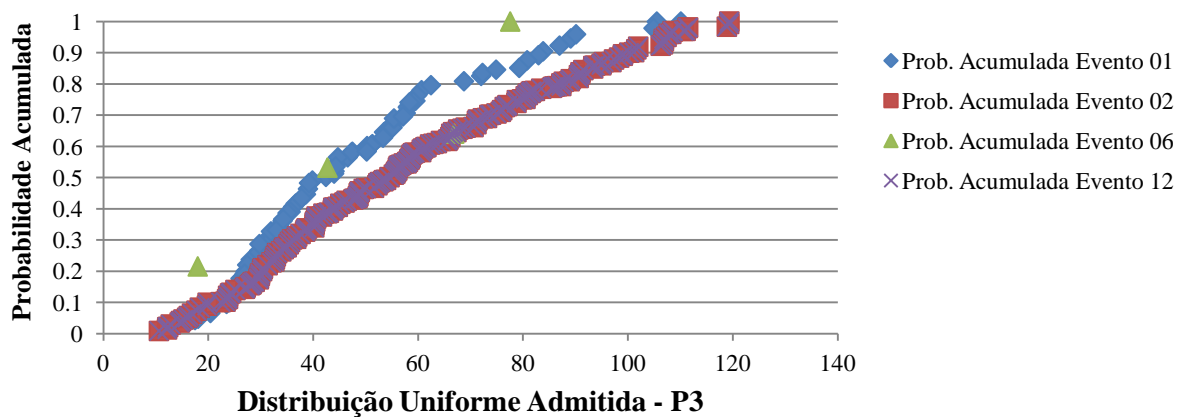


Figura 81. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Infiltração Inicial.

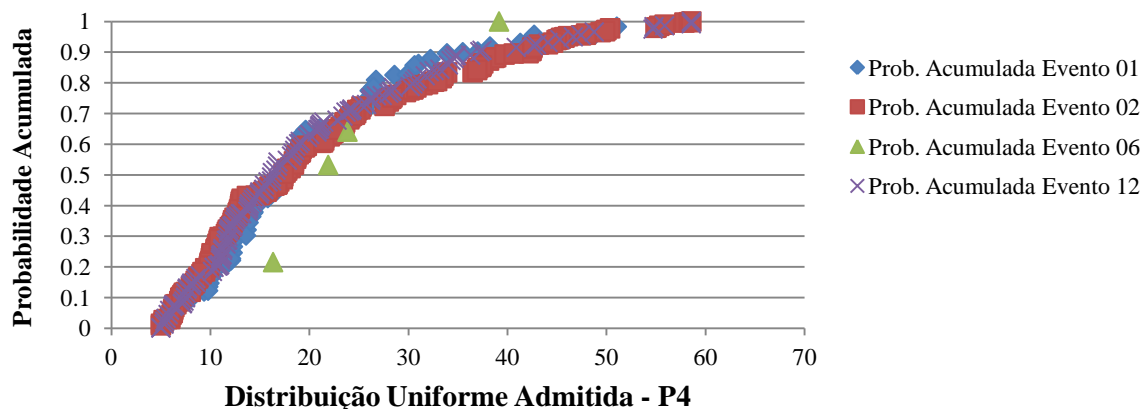


Figura 82. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Infiltração Final.

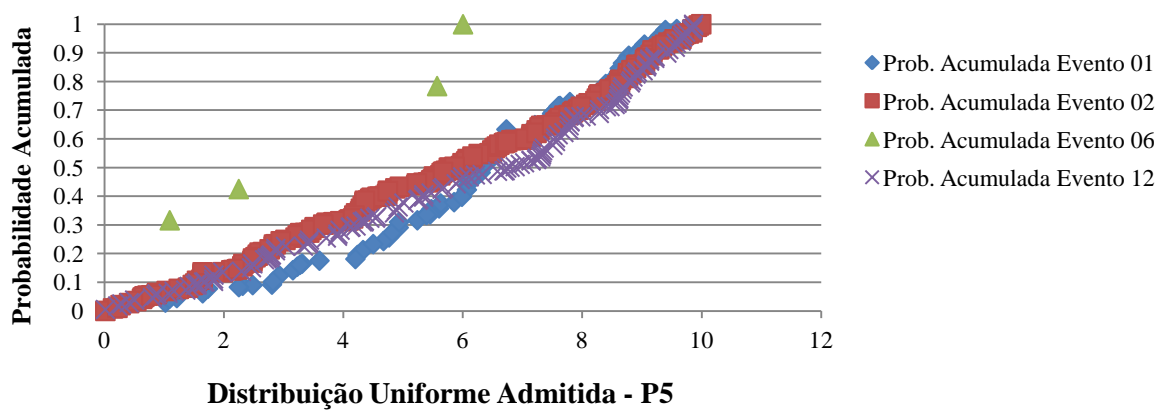


Figura 83. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Condutividade Hidráulica.

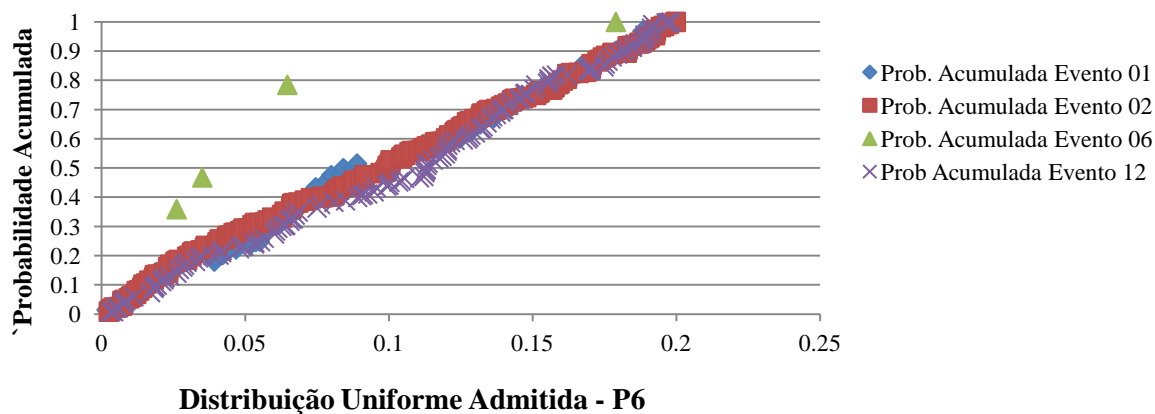


Figura 84. Probabilidade Acumulada x Distribuição Uniforme Admitida - Manning do Canal.

É possível verificar na combinação das probabilidades para as dez sub-bacias, uma semelhança de valores para os eventos intensos, de acordo com as Figuras 77 a 82. O único evento que não apresentou certa similaridade, foi o evento 06, caracterizado como evento mediano, sendo, portanto, classificado como um evento de mínimo.

Constata-se na Figura 79 que o Manning do plano apresentou valores semelhantes

entre os eventos 01 e 12 e diferentes para o evento 02, devido à distribuição da precipitação, como já foi explicitado anteriormente.

Os parâmetros indicaram uma boa distribuição no intervalo viável. Os valores dos parâmetros possuem uma taxa de confiabilidade de 90%, pois os resultados aceitáveis encontram-se no intervalo de 5% a 90%. O Manning do plano para o evento 01 e 12 apresenta variações de 0,0038 a 0,022, enquanto para o evento 02 apresenta variações de 0,010 a 0,049, valores mais reais e aceitáveis do que os obtidos na análise das três sub-bacias, a área impermeável exibe intervalo de 0,5 a 0,95, a infiltração inicial demonstrou-se aceitável entre 17 a 90 (mm/h), a infiltração final de 6,2 a 48,8 (mm/h), a condutividade hidráulica evidenciou valores de 0,67 a 9,30 e o Manning do canal apresentou variações de 0,010 a 0,19.

Para as curvas que apresentaram comportamentos diferentes nas figuras supracitadas, os eventos foram considerados como eventos de mínimo.

4.3.3 Análise de Sensibilidade dos Parâmetros

Para saber o quão sensível é o modelo a cada parâmetro, o modelo foi executado para o melhor conjunto de parâmetros, aquele que obteve o maior valor da eficiência de Nash-Sutcliffe. No entanto, admitiu-se uma variação de um por cento para mais e para menos para cada conjunto de parâmetros, resultando então, a sensibilidade de cada parâmetro, conforme as Figuras 85 a 88.

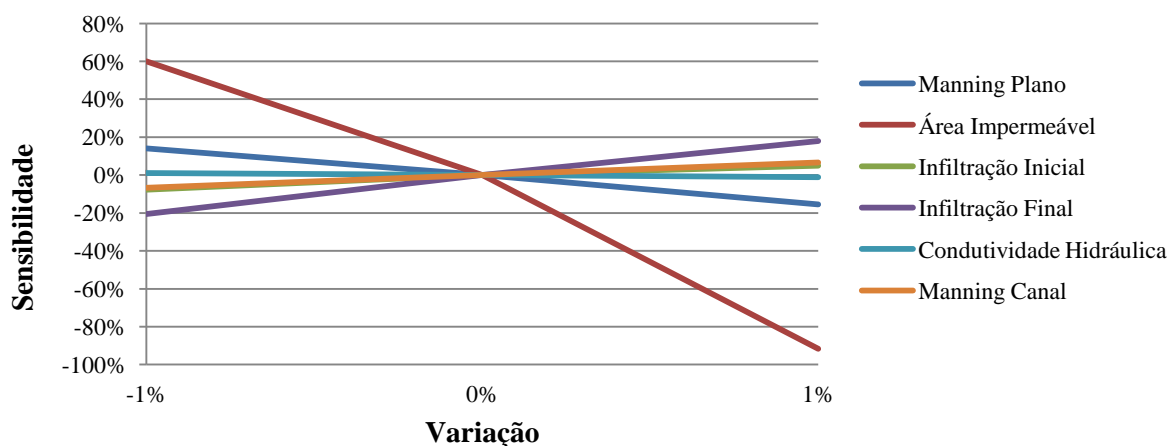


Figura 85. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 01.

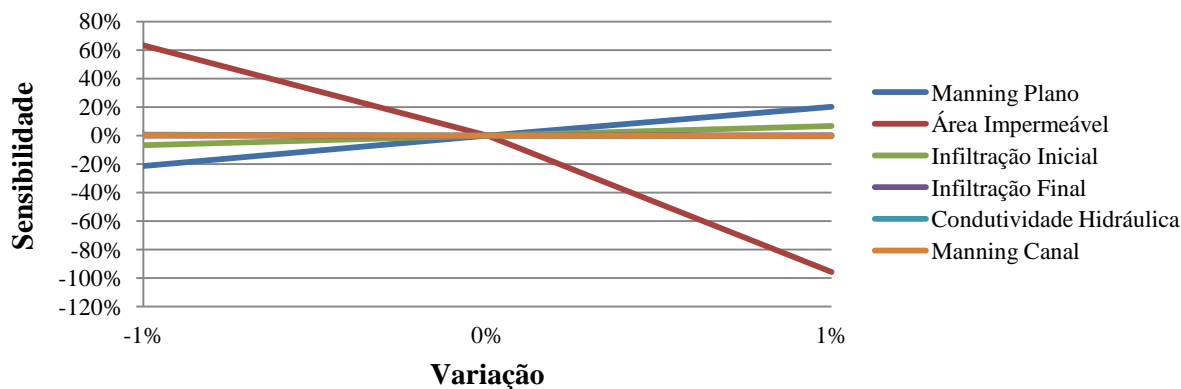


Figura 86. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 02.

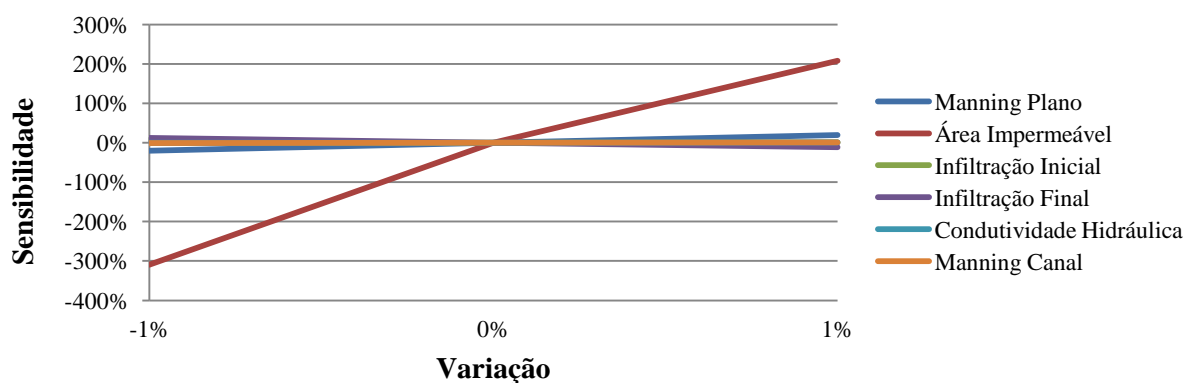


Figura 87. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 06.

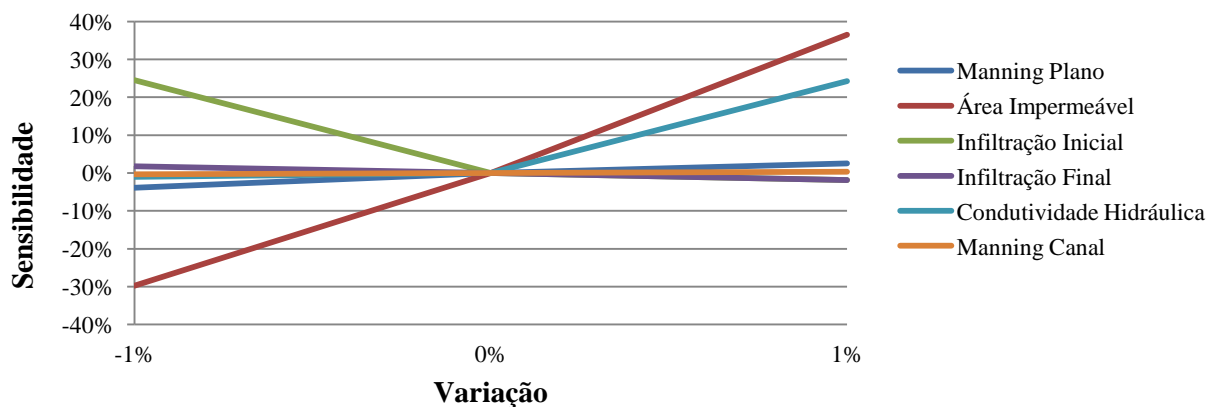


Figura 88. Análise de Sensibilidade dos parâmetros - Evento 12.

Observa-se na Figura 85 e 88 que a sensibilidade do parâmetro área impermeável, foi menor do que a obtida na análise das três sub-bacias, ressalva-se ainda, que tal fato pode ter ocorrido em detrimento do aumento da sensibilidade para os outros parâmetros, o que não aconteceu para as três sub-bacias. O contrário ocorreu para o evento 02, Figura 86, nota-se que a sensibilidade do parâmetro área permeável para dez sub-bacias foi maior do que para três sub-bacias, pois ocorreu a diminuição da sensibilidade dos

demais parâmetros. O evento 06 é semelhante para as sub-bacias estudadas, identificando-se um singelo aumento da sensibilidade dos parâmetros para as dez sub-bacias. O evento 12 também apresentou queda na sensibilidade da área impermeável, porém obteve aumento de sensibilidade nos parâmetros infiltração inicial e condutividade hidráulica. Nota-se, no entanto, que quando a área impermeável foi variada em 1% para mais, infiltração inicial diminuiu e a condutividade hidráulica aumentou, isso se deve a capacidade de infiltração de água no solo ser afetada pelo tempo, umidade inicial, porosidade e textura, condutividade hidráulica, dentre outros. Com o transcorrer do tempo, a capacidade de infiltração vai diminuindo, tendendo para uma taxa constante de infiltração, que será igual à máxima condutividade hidráulica da camada limitante (KLEIN, 1998).

Fica nítido que o modelo UFGModel 1.0 proposto apresenta melhores resultados para eventos mais intensos e para bacias com maiores discretizações exibindo melhor ajuste ou reprodução da distribuição. Ressalta-se ainda que para as dez sub-bacias ocorreu uma melhor previsibilidade do modelo.

Arnaud *et al* (2002) compraram as vazões de pico e os volumes escoados e visualizaram que as diferenças aumentam a medida em há um aumento da área da bacia, uma vez que representa maior variação de chuva. Verificaram ainda que, as diferenças são maiores para eventos comuns e tendem a diminuir para eventos mais raros. O que também pôde ser visualizado nesta dissertação. Como conclusão, relataram que as diferenças diminuem para eventos mais raros, sendo assim, valores de projeto, que são baseados em eventos extremos, podem ser determinados a partir de estatísticas de postos pluviométricos ajustados a algum conceito de redução probabilística.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho apresentou um modelo de transformação precipitação – vazão com dois esquemas de discretização espacial e buscou avaliar a incerteza nas vazões para três e dez sub-bacias hidrográficas da microbacia do córrego Botafogo na cidade de Goiânia (GO). As alterações que podem ocorrer na bacia em função do crescimento da impermeabilização do solo podem ser traduzidas pelos hidrogramas observados e simulados com o modelo UFGModel 1.0, para as chuvas observadas, nos quais podem ser analisados aumentos nas vazões de pico, indicando uma maior resposta da bacia às precipitações, ou seja, um aumento na velocidade e intensidade do escoamento superficial na bacia.

Os resultados denotam a importância e necessidade de melhoramentos nas representações das precipitações nos modelos hidrológicos e confirmou-se a ideia de que a incerteza das simulações aumenta em relação a redução de informações, principalmente, quanto envolve-se a derivação dos campos de precipitação.

O estudo demonstrou que o modelo apresentou uma acentuada tendência à ocorrência de grandes desvios quando aplicado para eventos fracos e médios e quando aplicado para bacias menos discretizadas, menos caracterizadas.

Quando confrontadas com as simulações obtidas a partir da consideração da distribuição real da precipitação em cada sub-bacia, as séries simuladas pelo modelo proposto apresentaram acentuada tendência à superestimação das vazões calculadas, especialmente nos instantes de pico, mesmo as séries calculadas apresentando alto valor de eficiência (acima de 0,5). Ou seja, quando há um melhor conhecimento inicial sobre o processo de precipitação, a hipótese de que a precipitação pode ser considerada constante se torna mais fraca.

Através da análise de dispersão dos parâmetros aceitos no espaço viável, identificou-se que o modelo apresentou grande sensibilidade, principalmente, para os parâmetros área impermeável e Manning do plano tanto para três quanto para dez sub-bacias, resultando em maiores ou menores vazões tempos de retorno. Esse resultado mostra que as bacias apresentam um risco elevado de que os eventos de cheia se tornem mais intensos e frequentes em um curto período de tempo. No entanto, é interessante notar que os parâmetros que sofreram maiores alterações de valores durante os eventos de chuva estudados foram Manning do plano, condutividade hidráulica e Manning do canal, tanto para três como para dez sub-bacias, sendo para esta última de forma um

pouco mais discreta. Sugere-se que essas alterações sejam em decorrência de uma forte não-linearidade do modelo, porém apresentando resultados semelhantes para bacias mais discretizadas. Destaca-se certa similaridade de variação para os eventos mais intensos.

A condutividade hidráulica e o Manning do canal apesar de apresentarem maiores variabilidades de valores não demonstraram grande sensibilidade ao modelo, pois se encontram de forma dispersa e abrangente, ao contrário do Manning do plano que se apresentou de maneira concentrada.

Ressalta-se que o modelo estudado apresenta somente 6 parâmetros obedecendo, além da equifinalidade, a parcimônia defendida por Beven (2001), portanto é bastante enxuto. O principal objetivo deste estudo foi à identificação de abordagens alentadas capazes de fornecer resultados confiáveis de modelagem, quando poucos dados estão disponíveis, o que é bastante comum em áreas urbanas.

Foi possível ainda concluir que o modelo demonstrou uma boa capacidade de avaliação em receber os dados reais medidos e demonstrou fiabilidade e robustez dos resultados, investigando as bandas de incerteza. O modelo ajustou de maneira aceitável os dados medidos, proporcionando alta eficiência de modelagem, estes resultados garantem que o modelador tenha uma ampla gama de possíveis conjuntos de parâmetros para escolher, sem significativamente, perder a fiabilidade. Além de gerar, vários conjuntos ótimos de parâmetros que podem ser adotados com segurança.

Os bons resultados, isto é, o grande número de conjuntos aceitos, apresentados nesse trabalho não deve ser interpretado como apontador da qualidade da metodologia e sim, permitir uma análise da incerteza introduzida na modelagem pela consideração de campos de precipitação gerados a partir de amostras de diferentes tamanhos. Os resultados obtidos permitem apenas uma análise qualitativa da importância da representação da variabilidade espacial da precipitação em modelo hidrológico

Uma melhor representação dos processos físicos que ocorrem na escala da bacia hidrográfica colaborará para que as incertezas, explicitamente consideradas nas sub-bacias, sejam reduzidas.

A pesquisa confirmou ainda o que diz a literatura em geral, que o modelador necessita de uma vasta experiência em modelação de equipamentos que facilitem o funcionamento do modelo, como um bom computador, para que um menor tempo de simulação seja gasto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABBASPOUR, K.C. **Calibration of Hydrologic Models: When is a Model Calibrated?** In: ZERGER, A.; ARGENT, R.M. (eds) *MODSIM 2008 International Congress on Modelling and Simulation*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, pp. 2449 – 12455. December 2005.
2. ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. **An introduction to the European Hydrologic System – Systeme Hydrologique Europeen, SHE, i. History and phislosophy of a physically-based, distributed modeling system.** Journal of Hydrology, v. 87, p. 45–59, 1986.
3. AGYEI, F. O.; MAHMOOD, K.; HAQUE, M. **Urban catchment models Brief examination.** Washington, DC: University of the district of Columbia, W. R. Center Ed, 1981.
4. ALCÂNTARA, E. H.; SANTOS, M. F. C. V.; BARBIERI, R. **Efeitos da urbanização na hidrologia da bacia da laguna da Jansen, São Luís – MA (Brasil).** In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, VI, Maceió. 10 p (CD ROOM), 2002.
5. ANDRÉASSIAN, V.; PERRIN, C.; MICHEL, C.; USART-SANCHEZ, I.; LAVABRE, J. **Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models.** Journal of Hydrology 250, 206-223. 2001.
6. ARAÚJO, D. P.; PASQUALETTO, A. **Análise de risco às águas superficiais do córrego botafogo, Goiânia, Goiás.** In: *Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Ambiental da Pontifícia Universidade Católica de Goiás – PUC-GO.* Goiânia, 2008.
7. ARONICA, G.; FRENI, G.; OLIVERI, E. **Uncertainty analysis of the influence of rainfall timeresolution in the modelling of urban drainage systems.** Hydrol. Process. 19, 1055–1071. 2005.
8. ARNAUD, P.; BOUVIER, C.; CISNEROS, L.; DOMINGUEZ, R. **Influence of rainfall spatial variability on flood prediction.** Journal of Hydrology, 260, 216–230. 2002.
9. BALASCIO, C. C. **Multiquadric equations and optimal areal rainfall estimation.** Journal of Hydrology Engennering, v. 6, n. 6, p. 498-505, nov. 2001.
10. BARBALHO, F. D. **Método para a determinação do fator de redução de área em bacias urbanas.** In: *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós – Graduação Stricto sensu em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás – UFG.* Goiânia, 2011.
11. BARBOSA JÚNIOR, A. R. **Elementos de Hidrologia aplicada a Estudos de Graduação. Capítulo 6 – Escoamento Superficial.** Disponível em:< http://www.em.ufop.br/deciv/departamento/~antenorrodriques/16_escoamento%20superficial.pdf>. Acesso em 01/07/2013.
12. BARBOSA, P. S. F. **Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos/Organizado por Ruben La Laina Porto. [et al.], Porto Alegre: Ed. Universidade/ UFRGS/Associação brasileira de Recursos Hídricos.** 1997.
13. BARCO, J.; WONG, K. M.; STENSTROM, M. K. **Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment.** Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, No. 4, April 1, 2008.

14. BASKHAR, N. R.; WHITLATCH, E. E. **Comparison of reservoir linear operation rules using linear and dynamic programming.** Journal of the American Water Resources Association. Vol 23, p. 1752-1688. 1987.
15. BASTOS, G. A. **Análise dos parâmetros do modelo SWMM para avaliação do escoamento em duas bacias periurbanas em Santa Maria - RS.** In: *Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS).* Santa Maria –RS. 2007.
16. BAUER, S. W. **A modified Horton equation for infiltration during intermittent rainfall.** Hydrological Sciences – Bulletin – des Sciences Hydrologiques, XIX, 2, 6/1974.
17. BEASLEY, D.B.; HUGGINS L.F. **ANSWERS: User's manual.** Chicago: United States Environmental Protection Agency, 51p, 1981.
18. BEVEN, K. **Changing ideas in Hydrology - the case of physically-based models.** Journal of Hydrology, 105, 157-172, 1989.
19. BEVEN, K. J.; BENLEY, A. **The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction.** Hydrological Processes, Vol. 6 pp. 279-298. 1992.
20. BEVEN, K. J., LAMB, R., QUINN, P., et al. **TOPMODEL,** In: Singh, V. P. (Ed). **Computer Models of Waterhed Hydrology.** Water Resources Publications, Colorado, USA., pp. 627-668. 1995.
21. BEVEN, K. J. **RainFall-Runoff Modelling – the Primer.** Chichesler : John Wiley & Sons, 360 p. 2001.
22. BEVEN, K. J.; FREER, J. **Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modeling of complex environmental systems using the GLUE methodology.** Journal of Hydrol. 249, 11-29. 2001.
23. BEVEN, K. J.; SMITH, P. J.; FREER, J. E. **So just why would a modeller choose to be incoherent?** Journal of Hydrology, 354, 15– 32, 2008.
24. BINLEY, A.M.; BEVEN, K.J.; CALVER, A.; WATTS, L. G. **Changing responses in hydrology: Assessing the uncertainty in physically based model predictions,** Water Resour.Res., 27(6), 1253 – 1261. 1991.
25. BITTENCOURT, G. **Inteligência Artificial: Ferramentas e Teorias.** Florianópolis: Editora da UFSC, 1998.
26. BLASONE, R. S.; MADSEN, H.; ROSBJERG, D. **Uncertainty assessment of integrated distributed hydrological models using GLUE with Markov chain Monte Carlo sampling.** Journal of Hydrology, Vol 353, n 1-2, p 18-32, 2008.
27. BRAGA, B.; GOBETTI, L. **Análise Multiobjetivo.** In: *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.* 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS–ABRH. Porto Alegre, p. 361-420. 2002.
28. BRASIL. **Lei n° 4771, de 15 de setembro de 1965.** Lex: legislação de direito ambiental: constituição federal: edição federal, São Paulo, 1965.
29. BRAUD, I.; FERNANDES, P.; BOURAOUI, F. **Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model.** Journal of Hydrology. 216: 155–171.1999.

30. BRONSON, R. **Pesquisa Operacional**. McGraw-Hill do Brasil, 887 p. 1985.
31. CADIER, E., LANNA, A. E, MENEZES, M. e CATNPELLO, M. S. **Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste Brasileiro**. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Salvador, ABRH. Vol. 2, p. 225-239. 1987.
32. CAIXETA FILHO, V. **Pesquisa Operacional**. São Paulo. Editora Atlas. 2001.
33. CAMPANA, N.; TUCCI, C.E.M. **Predicting floods from urban development scenarios: case study of the Dilúvio basin, Porto Alegre, Brazil**. Urban Water, Oxford, Vol. 3, nº 2, p. 113 – 124. 2001.
34. CANHOLI, A. **O Plano Diretor de Macrodrenagem da Bacia do Alto Tietê, 2008**. http://www.acquacon.com.br/drenagem/palestras/ubirajarafelix_02.12.pdf. Acesso em: 30/04/2012.
35. CARDOSO, C. F.; RESPLANDES, E. M. S. **Estudo de Impacto de Vizinhança – Zeus Park House**. Goiânia, 2009.
36. CARVALLO, H.O.G. **Física dos solos**. 1 ed. Campina Grande: UFPB, 173 p. 2000.
37. CASSETI, V. **Geomorfologia do município de Goiânia**. Bol. Goiano Geografia., Ed. UFG, Goiânia, 12(1): 64-85. vol. 12 – Nº 1, 1992.
38. CASTRO, V.C.B. **Impactos ambientais no espaço urbano de Goiânia: Um Estudo Sobre a Invasão Emílio Póvoa**. In: *Trabalho de conclusão de Curso defendido no curso de Geografia na Unidade Universitária de Ciências Sócio-Econômicas e Humanas da Universidade Estadual de Goiás*, Anápolis, 2009.
39. CIRILO, J. A. **Programação Não Linear Aplicada aos Recursos Hídricos**. In: PORTO, R. L. L. et al., *Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos*. ABRH, 1ª Ed, pp 305-336. Editora da Universidade – UFRGS, 1997.
40. CIRILO, J. A. **Programação Não Linear Aplicada aos Recursos Hídricos**. In: PORTO, R. L. L. (Ed). *Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos*. 2ª Ed, pp. 305-359. Porto Alegre: Editora da Universidade - UFRGS. 2002.
41. CLARKE, R. T. **A review of some mathematical models used in hydrology with observations on their calibration and use**. Journal of Hydrology, 19, 1-20. 1973.
42. CLARKE, R. T. **Hidrologia Estatística**. In: TUCCI, C.E.M. et al. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2007.
43. COLLIER, C. G.; KNOWLES, J. M. **Accuracy of rainfall estimates by radar, part iii: application for short-term flood forecasting**, Journal of Hydrology, 83, 237–249, 1986.
44. COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Tese de doutorado. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre – RS. 194 p. 2001.
45. COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. **Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol 8, nº 3, 27-39, 2003.

46. CONFESSOR Jr, R.B.; WHITTAKER, G.W. **Automatic calibration of hydrologic models with multi-objective evolutionary algorithm and Pareto optimization.** J. Amer. Water Resour. Assoc. 43(4): 981-989. 2007.
47. CRAWFORD, N. H., LINSLEY, R. K. **Digital simulation in hydrology, Stanford Watershed Model IV**, Technical Report 39 – Department of Civil Engineering, Stanford University, USA. 1966.
48. CRAWLEY, P.D.; DANDY, G.C. **Optimal operation of multiple-reservoir system.** Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.119, n.1, p.1-17. 1993.
49. DAHLQUIST, G.; BJORCK, A. **Numerical Methods.** Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 197a. 592p. 1974.
50. DAWDY, D. R., O'DONNELL, T., **Mathematical models of catchment behavior.** Journal of Hydraulics Division American Society of Civil Engineering, 91, 123-137. 1965.
51. DEB, K. **Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms**, John Wiley & Sons, Inglaterra, 2001.
52. DHIA. **MOUSE PIPE FLOW: Reference Manual.** DHI Software 2002, 118p. Disponível em <<http://www.dhisoftware.com>>. Denmark, 2003.
53. DINIZ, L. S. **Calibração de modelos hidrológicos.** In: GALVÃO, C. O.; Valença, M. J. S. *Sistemas Inteligentes.* Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS – ABRH. 1999.
54. DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. **Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models.** Water Resources Research, V. 28, nº 4, p. 1015-1031. 1992.
55. EFSTRADIADIS, A.; KOUTSOYIANNIS, D. **One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modeling: a review.** Hydrol. Sci. Journal, 55: 1, 58 -78. 2010.
56. EHRlich, P. J. **Pesquisa Operacional: curso introdutório.** 7ª edição, 322 p. Editora Atlas S.A, 1991.
57. FONSECA, C.M.; FLEMING, P.J., **Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization**, In: Proc of 5th Conference on Genetic Algorithms, pp 416-423, 1993.
58. FORMIGA, K.T.M.; CHAUDHRY, F. H. **Utilização de Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos no Dimensionamento de Redes de Abastecimento de Água.** In: *Planejamento, Projeto e Operação de Redes de Abastecimento de Água, O Estado da Arte e Questões Avançadas*, 2002, João Pessoa, PB. Anais do Seminário. João Pessoa, PB : Universidade Federal da Paraíba. v. 1. p. 1-10. 2002.
59. FRANCHINI, M.; GALEATI, G.; BERRA, S. **Global optimization techniques for the calibration of conceptual rainfall runoff models.** Hydrological Sciences Journal Vol. 43 No. 3 pp. 443-458. 1998.
60. FRANCHINI, M. **Use of genetic algorithm combined with a local search method for the automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models.** Hydrological Science Journal, V. 41, n. 1, p. 21-39. 1996.

61. FRENI, G.; MANNINA, G.; VIVIANI, G. **Uncertainty in urban stormwater quality modelling: The influence of likelihood measure formulation in the GLUE methodology.** *Science of the Total Environment* 408. 138–145. 2009a
62. FRENI, G.; MANNINA, G.; VIVIANI, G. **Urban runoff modelling uncertainty: Comparison among Bayesian and pseudo-Bayesian methods.** *Environmental Modelling & Software* 24 1100–1111. 2009b.
63. FRENI, G.; MANNINA, G.; VIVIANI, G. **Uncertainty in urban stormwater quality modelling: The effect of acceptability threshold in the GLUE methodology.** *Water Research* 42. 2061 – 2072. 2008
63. GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. **Comparação das respostas do modelo SWMM para diferentes amplitudes de cheia.** 1º Simpósio de recursos hídricos do Sul. I Simpósio de águas da AUGM. Santa Maria – RS. 2005.
64. GASH, J.H. C. **An analytical model of rainfall interception by forests.** *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 105: 43-55. 1979.
65. GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. **Estimativa dos Parâmetros do Modelo IPH II para Algumas Bacias Urbanas Brasileiras,** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* RBRH, Porto Alegre, v. 3 n. 4, p. 103-120, 1998.
66. GOIÂNIA. Prefeitura Municipal de Goiânia. **Diagnóstico Ambiental da sub-Bacia do Córrego Botafogo.** Agência Municipal de Meio Ambiente – AMMA – GO. 2008.
67. GRAYSON, R.B., MOORE, I.D., McMAHON, T.A. **Physically based hydrologic modeling 2. Is the concept realistic?** *Water Resources Research*, 26, 10, 2659 - 2666, 1992a.
68. GRAYSON, R.B., MOORE, I.D., McMAHON, T.A. **Physically based hydrologic modeling 1. A terrain-based model for investigative purposes.** *Water Resources Research*, 26, 10, 2639 - 2658, 1992b.
69. GREEN, W.H.; AMPT, G. A. **Studies on Soil Physics.** *The Journal of Agricultural Science*, 4, pp 1-24. 1911.
70. GUPTA, H. V.; BASTIDAS, L. A.; SOROOSHIAN, S.; SHUTTLEWORTH, W. J.; YANG, Z. L. **Parameter estimation of a land surface scheme using multi-criteria methods.** *J. Geophys. Res.*, 104 (D16), 19 491–19 504. 1999.
71. HANSEN, L.S.; BORUP, M.; MOLLER, A.; MIKKELSEN, P.S. **Flow Forecasting in Urban Drainage Systems using Deterministic Updating of Water Levels in Distributed Hydraulic Models.** 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011.
72. HARDY, R. L. **Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces.** *Journal of Geophysical Research*, v. 76, n. 8, p. 1905-1915, 1971.
73. HARLEY, B.M., PERKINS, F.E., EAGLESON, P.S. **A modular distributed model of catchment dynamics.** MIT, Ralph M. Parsons Lab., Report 133. 1970.
74. HEC, Training Course on Urban Hydrology US Army, Hydrologic Engineering Center, 1974.
75. HERMANN, R. M. **Dimensionamento e operação de sistemas com reservatórios múltiplos.** In: *Tese de livre docência* apresentada à EPUSP. São Paulo: 105 p. 1971.

76. HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G. **Introdução à Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro. Editora Campos LTDA/ Editora USP. 1988.
77. HOLLAND, J.H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Ann Arbor, Issue: 53, Publisher: University of Michigan Press, Pages: 1-200. 1975.
78. HORN, J.; NAFPLIOTIS, N.; GOLDBERG, D. E. **A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization**. In Proceedings of the ICEC '94, IEEE, pp. 82-87, 1994.
79. HORTON, R. E. **The role of infiltration in the hydrologic cycle**. Trans. Am. Geophys. Union, v. 145, p. 446-460, 1933.
80. HORTON, R.E. **An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity**. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, v.5, 399-417, 1940.
81. IBBITT, R. P., **Systematic parameter fitting for conceptual models of catchment hydrology**, Ph. D Thesis, University of London, U. K. 1973.
82. INNOVYZE – **InfoWORKS CS**. < <http://www.innovyze.com/>>
83. INSTITUTO DE PLANEJAMENTO MUNICIPAL - IPLAN. **Relatório de Impacto Ambiental do córrego Botafogo**. Goiânia: TECNOSAN Eng. S.A. 1990.
84. KHU, S. T.; WERNER, M. G. F. **Reduction of Monte-Carlo simulation runs for uncertainty estimation in hydrological modelling**. Journal Hydrology and Earth System Science. Vol 7, n 5, pp. 680-692, 2003.
85. KLEIN, V.A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo Roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 150p. (Tese de Doutorado). 1998.
86. KOSTIAKOV, A.N. **On the dynamics of the coefficient of water - percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of ameliation**. Trans. 6th comm. Intern. Soc. Soil Sci., Moscou, Part A., 17-21, 1932.
87. KOUWEN, N.; GARLAND, G. **Resolution Considerations in Using Radar Rainfall Data for Flood Forecasting**, Canadian Journal of Civil Engineering. 16:279-289. 1989.
88. KUCZERA. G., PARENT. E. **Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models : the Metropolis algorithm**. Journal of Hydrology, 211, 69 - 85, 1998.
89. LABADIE, J. W. **Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review**. Journal of Water Resources Planning and Management, vol 130(2), p. 93-111. 2004.
90. 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, set. 1974.
91. LINDBLOM, E.; MADSEN, H.; MIKKELSEN, P.S. **Comparative uncertainty analysis of copper loads in stormwater systems using GLUE and grey-box modelling**. Water Sci Technol 56(6):11-8, 2007.
92. LINSLEY, R K.; FRANZINI, J. B. **Water Resources Engineering**. Tokyo: Mc GrowHill, 1964.

93. LOU, R. F. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha/RJ**– Rio de Janeiro. In: *Dissertação de mestrado da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Civil*, 2010.
94. MANTOVAN, P.; TODINI, E. **Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology**, *Journal Hydrology*, 330, 368 – 381, 2006.
95. MARTINS JÚNIOR, O. Pires. **Uma cidade ecologicamente correta**. Goiânia, AB Editora, 1996.
96. MATEUS, G. R.; LUNA, H. P. C. **Programação Não Linear**. Belo Horizonte FMG, 289p. 1986.
97. MAYS, L.W. **Water resources engineering**. John Wiley & Sons. 2005.
98. MCCARTHY, G. T. **The unit hydrograph and flood routing**. US Corps Engrs Office, Providence, Rhode Island, USA. 1939.
99. MELLER, A. **Simulação hidrodinâmica integrada de sistema de drenagem em Santa Maria - RS**. In: *Dissertação de Mestrado apresentado ao Curso de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM- RS) Santa Maria - RS*. 2004.
100. METCALF; EDDY, Inc., University of Florida, and Water Resources Engineers, Inc., **Storm Water Management Model**, Vol. I. Final Report, 11024DOC07/71 (NTIS PB-203289), U.S. EPA, Washington, DC, 20460. 1971.
101. METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A.W.; ROSENBLUTH, M.N. et al., **Equations of state calculations by fast computing machines**, *Journal of Chem. Phys.*, 21, 1087-1091, 1953.
102. MOREIRA, H. L. - **Zoneamento Geoambiental e Agroecológico do Estado de Goiás – Região Nordeste**. Série Estudos e Pesquisas em Geociências. n. 3. Rio de Janeiro – RJ. Editora IBGE, 1995.
103. MUELLER, C. C. - **Dinâmica, condicionantes e impactos sócio-ambientais da evolução da fronteira agrícola**. In: *LOPES, V. L.; BARBOSA FILHO, G. S.; BILLER, D. & BALE, M. - Gestão Ambiental no Brasil – experiência e sucesso*. Rio de Janeiro - RJ, Editora Fundação Getúlio Vargas, 2000.
104. NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles**, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290. 1970.
105. NAVES, A. R. da C.; DA SILVA, K.A.; PRIMO, P.H.C.; BÁRBARA, V.F.; ANTUNES, E.C.; PASQUALETTO, A. **Recuperação das margens do córrego botafogo com espécies arbóreas como compensação ambiental**. In: *Artigo elaborado como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Católica de Goiás*. Goiânia, 2003.
106. NAYAK, S. C.; ARORA, S. R. **Optimal capacities for a multireservoir system using the linear rule**. *Water Resources Research*. Vol 7, n 3, p 483-494. 1971.
107. NELDER, J. A.; MEAD, R. **A Simplex method for function minimization**. *Comuter Journal*, 7, p. 303-313.1965.

108. NOGUEIRA, I. de S. **Algas planctônicas de um lago artificial do Jardim Botânico Chico Mendes, Goiânia, Goiás: florística e algumas considerações ecológicas.** Rev. Brasileira de Biologia, vol.59, no.3, p.377-395. 1999.
109. O'DONNELL, T., CANEDO, P., **The Reability of Conceptual Calibration,** Hydrological Forecasting, Proceedings of the Oxford Symposium, IAHS Publication, 129. 1980.
110. OLIVEIRA, F. A. **Calibração de um modelo hidrodinâmico unidimensional para canais urbanos.** In: *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação Stricto sensu em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás – UFG, Goiânia, 2012.*
111. PAPPA, G.L. **Seleção de Atributos utilizando Algoritmos Genéticos Multiobjetivos.** Curitiba. 85p. In: *Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Informática Aplicada da Pontifícia Universidade Católica do Paraná.* Curitiba, 2002.
112. PINTO, N. L. S, *et al.* **Vazão de dimensionamento de bueiros,** Rio de Janeiro: IPR, Publ. 478, 56p, 1975.
113. PORTO, R. Q.; MELO, D.C.D; ALMEIDA, C.N; SILANS, A.M.B. P. **Avaliação da escolha de diferentes funções objetivo na calibração automática do modelo hidrológico SMAP.** Rev. Tecnol. Fortaleza, v.1, p 27 -36, jun -2008.
114. PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; SANTOS, W.L.; RODRIGUES, L.N.; ANTTUNES, V. L. **Infiltração de água no solo** [S.l.:s.n], 26p. (Caderno didático, 25). 1997.
115. PULS, L. G. **Construction of flood routing curves.** House Document 185, U.S. 70th Congress, First Session, Washington, D.C. 1928.
116. RATTO, M.; TARANTOLA, S.; SALTELLI, A. **Sensitivity analysis in model calibration: GSA-GLUE approach.** Computer Physics Communications. Vol. 136, Issue 3, 212 – 224, 2001.
117. RECKHOW, K. H. **Bayesian Inference in Non-Replicated Ecological Studies.** Ecology 71:2053–2059. 1990.
118. RENNÓ, D. C.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para a gestão ambiental,** INPE, Relatório Parcial, 2000.
119. RIGHETTO, A. M.; GUIMARÃES FILHO, J. A. **Utilização Ótima dos Recursos Hídricos Superficiais do Estado do Rio Grande do Norte.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 8 n.2, abr/jun 2003, 19-29. 2003.
120. ROCKWOOD, D. M. **Columbia basin streamflow routing by computer.** Journal of Waterways and Harbour Division, ASCE, 84(1), Paper 1874. 1958.
121. RODRIGUES, J. M.). **Dinâmica populacional de Goiânia: o crescimento das regiões na década de 1990.** 2006 < <http://www.seplan.go.gov.br/sepin/pub/conj/conj8/05.htm>, Ed.)>. Acesso em:2012.
122. ROSENBROCK, H.H. **An automatic method for finding the greatest or least of a funcion.** Computer Journal 3: p.175-184.1960.
123. RUTTER, A.J.; MORTON, A.J.; ROBINS, P.C. **A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with**

- observations in some coniferous and hardwoods stands.** J. Appl. Ecol., 12: 367-380. 1975.
124. SANO, M. S.; ALMEIDA, S. P. - **Cerrado – Ambiente e Flora.** Planaltina – DF. Editora EMBRAPA CPAC, 1998.
125. SANTA CATARINA, A.; BACH, S. L. **Estudo do efeito dos parâmetros genéticos na solução otimizada e no tempo de convergência em algoritmos genéticos com codificações binária e real.** Acta Scientiarum: Technology. Maringá, v. 25, n.2, p. 147- 152, 2003.
126. SANTOS, I .*et al.* **Hidrometria Aplicada.** Curitiba: Instituto de Tecnologia para o desenvolvimento, 372p. 2001.
127. SCHAEFLI, B.; HINGRAY, B.; MUSY, A. **Improved calibration of hydrological models: use of a multi-objective evolutionary algorithm for parameter and model structure uncertainty estimation.** Hydrology: Science & Practice for the 21 st Century. Volume I, 2004.
128. 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.
129. SILVEIRA, A. L. L. **Provável efeito urbano nas relações IDF das chuvas de Porto Alegre.** In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 2, nº 2, pp 93- 107, Jul/Dez, 1997.
130. SIMONOVIC, S.P. **Reservoir systems analysis: closing gap between theory and practice.** Journal of Water Resources Planning and Management, New York, v.118, n.3, p.262-280. 1992.
131. SINGH, V. P. **Mathematical Models of Large Watershed Hydrology.** Louisiana State University. 2002.
132. SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H.V. **Model calibration, computer models of watershed hydrology** (ed. Singh. V.P), Water Resources Publications. Colorado. 23 – 68. 1995.
133. SRINIVAS, N.; DEB, K. **Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms.** Evolutionary Computation 2(3), pp. 221-248, 1994.
134. STURM, W. T. **Open Channel Hydraulics.** Georgia Institute of Technology. McGraw-Hill Higher Education. 2001
135. SUZUKI, M.; KATO, H.; TANI, M.; FUKUSHIMA, Y. **Throughfall, stemflow and rainfall interception in Kiryu experimental catchment.** J. Jap. For. Soc., v 61, p. 202 -210, 1979.
136. TECNOSAN ENGENHARIA. **EIA RIMA, Estudo e Impacto Ambiental e Relatório e Impacto Ambiental. Prefeitura Municipal de Goiânia, Instituto de Planejamento Municipal; Vias marginais dos córregos Botafogo e Capim Puba – GO; 1990.**
137. THORND AHL, S.; BEVEN, K. J.; JENSEN, J. B.; SCHAARUP- JENSEN, K. **Event based uncertainty assessment in urban drainage modeling, applying the GLUE methodology.** Journal of Hydrology, 357(3 - 4), pp. 421 – 437. 2008.
138. THORND AHL, S.; GRUM, M.; RASMUSSEN, M.R.; SCHAARUP-JENSEN, K. **Flow forecasting in drainage systems with extrapolated radar rainfall data and**

auto calibration on flow observations. 12nd International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, 10-15 September 2011.

139. TUCCI, C.E.M.; ORDONEZ, J.S.; SIMÕES LOPES, M. **Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH II Alguns Resultados.** Anais IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Fortaleza. 1981.

140. TUCCI, C. E. M **Modelos Hidrológicos** (1ª ed.). Porto Alegre: UFRGS/ABRH. 1998.

141. TUCCI, C. E. M. **Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas.** In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos – ABRH, Porto Alegre, Vol. 5, n. 1, p. 61-68, Jan./Mar., 2000.

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

143. TUCCI, C. E. M. Aspectos numéricos dos modelos hidrológicos. Disponível em: <http://rhama.net/wordpress/?p=196>. 2011.

144. VALENTE, F.; DAVID, J.S.; GASH, J.H.C. **Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models.** J. Hydrol. 190, 141 – 162. 1997.

145. VIESSMAN Jr, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to Hydrology.** Happer Collin College Publisjers, New York, 1996.

146. VIOLA, F.; NOTO, L.V.; CANNAROZZO, M.; LA LOGGIA, G. **Daily streamflow prediction with uncertainty in ephemeral catchments using the GLUE methodology.** Phys Chem Earth; 34:701–6. 2009.

147. VRUGT, J.A.; GUPTA, H. V.; BASTIDAS, L.A.; BOUTEN, W.; SOROOSHIAN, S. **Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models.** Water Resour. Res 39 (8), 1214. 2003.

148. WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; GOODRICH, D. C. **KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: Documentation and User Manual.** U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 pp. 1990.

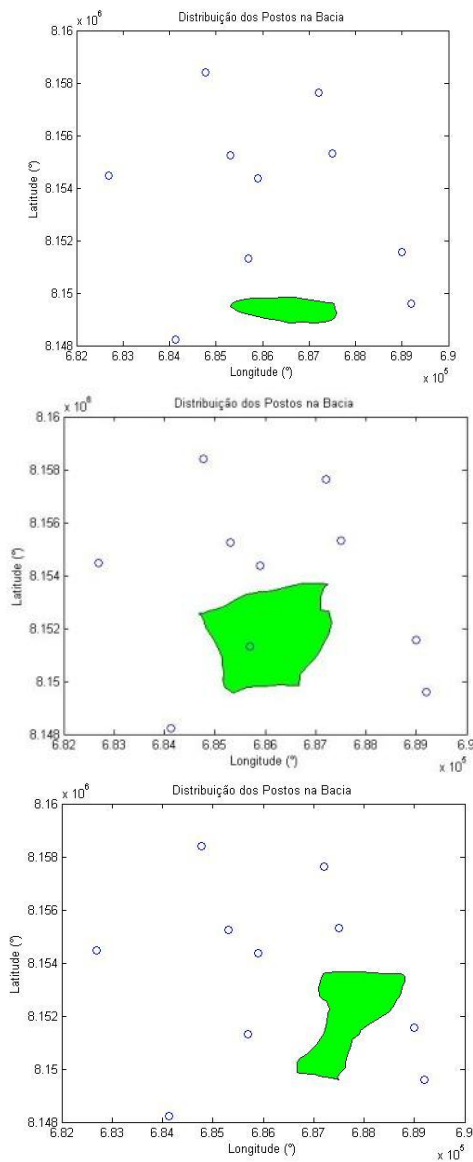
149. YAPO, P.O.; GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S. **Multi-objective global optimization for hydrologic models.** J. Hydrol. 204, 83 -97. 1998.

150. YEH, W. W. G. **Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review.** Water Resources Research, Washington. Vol. 21, nº 12, pp. 1797 – 1818. 1985.

151. ZITZLER, E.; THIELE, L. **Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Study and the Strength Pareto Approach,** In: IEEE Transactions on Evolutionary Computation 3(4), pp 257-271, 1999.

152. ZITZLER, E. **Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimization: Methods and Applications.** PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, Switzerland, 120p. 1999.

ANEXO A

Tabela 5. Três sub-bacias e suas características

Sub-bacia 01

Perímetro: 5,73 km

Área: 1,61 km²

Declividade: 1,55%

Área impermeável: +/- 85%

Largura do escoamento: 0,76 km

Comprimento do escoamento: 2,05 km

Sub-bacia 02

Perímetro: 11,45 km

Área: 7,58 km²

Declividade: 2,90%

Área impermeável: +/- 70%

Largura do escoamento: 2,28 km

Comprimento do escoamento: 3,20 km

Sub-bacia 03

Perímetro: 12,11 km

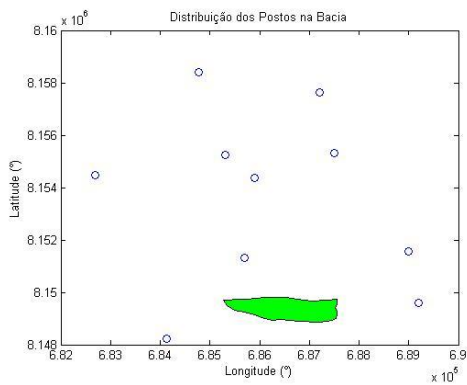
Área: 4,66 km²

Declividade: 1,873%

Área impermeável: +/- 60%

Largura do escoamento: 1,45 km

Comprimento do escoamento: 4,16 km

Tabela 6. Dez sub-bacias e suas características**Sub-bacia 01**

Perímetro: 5,73 km

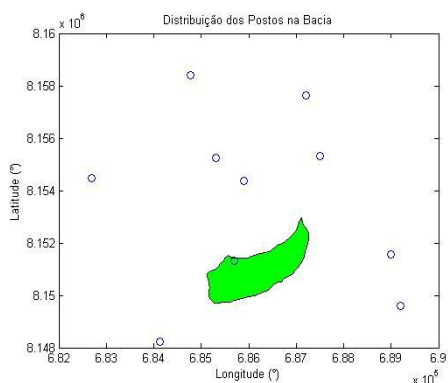
Área: 1,61 km²

Declividade: 1,55%

Área impermeável: +/- 85%

Largura do escoamento: 0,76 km

Comprimento do escoamento: 2,05 km

**Sub-bacia 02**

Perímetro: 8,82 km

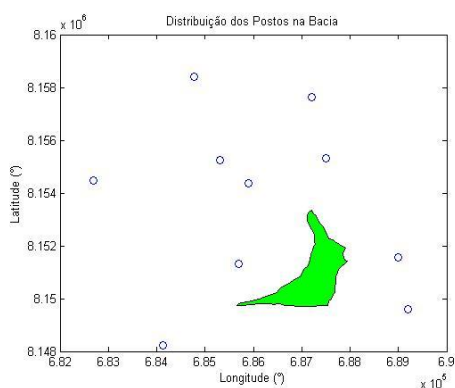
Área: 3,09 km²

Declividade: 3,02%

Área impermeável: +/- 90%

Largura do escoamento: 0,87 km

Comprimento do escoamento: 3,34 km

**Sub-bacia 03**

Perímetro: 10,32 km

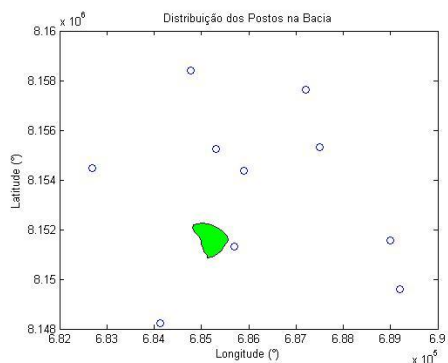
Área: 2,52 km²

Declividade: 1,69%

Área impermeável: +/- 65%

Largura do escoamento: 0,66 km

Comprimento do escoamento: 3,66 km

**Sub-bacia 04**

Perímetro: 3,43 km

Área: 0,65 km²

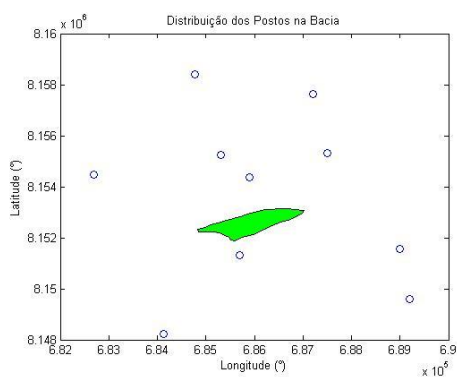
Declividade: 3,12%

Área impermeável: +/- 80%

Largura do escoamento: 0,51 km

Comprimento do escoamento: 1,21 km

Continuação da Tabela 6



Sub-bacia 05

Perímetro: 5,29 km

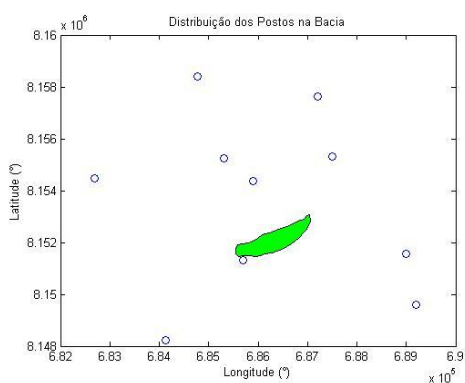
Área: 1,22 km²

Declividade: 2,66%

Área impermeável: +/- 75%

Largura do escoamento: 0,63 km

Comprimento do escoamento: 1,87 km



Sub-bacia 06

Perímetro: 4,87 km

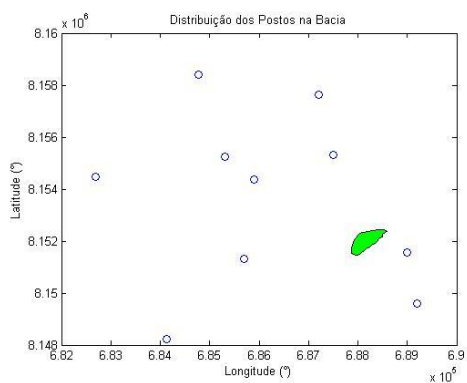
Área: 0,99 km²

Declividade: 2,94%

Área impermeável: +/- 75%

Largura do escoamento: 0,50 km

Comprimento do escoamento: 2,11 km



Sub-bacia 07

Perímetro: 2,64 km

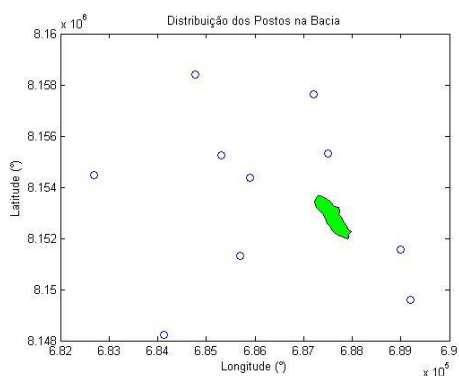
Área: 0,38 km²

Declividade: 2,07%

Área impermeável: +/- 85%

Largura do escoamento: 0,35 km

Comprimento do escoamento: 1,01 km



Sub-bacia 08

Perímetro: 3,85 km

Área: 0,55 km²

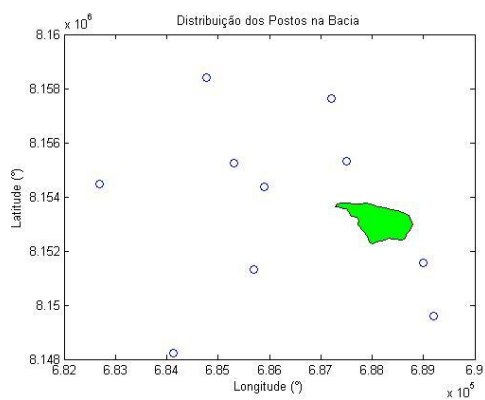
Declividade: 2,56%

Área impermeável: +/- 75%

Largura do escoamento: 0,36 km

Comprimento do escoamento: 1,63 km

Continuação da Tabela 6



Sub-bacia 09

Perímetro: 4,96 km

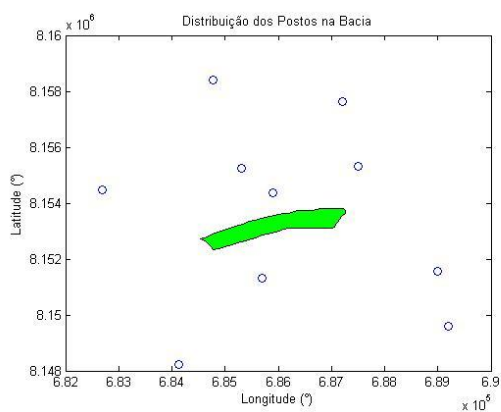
Área: 1,27 km²

Declividade: 4,24%

Área impermeável: +/- 85%

Largura do escoamento: 0,81 km

Comprimento do escoamento: 1,48 km



Sub-bacia 10

Perímetro: 6,71 km

Área: 1,57 km²

Declividade: 2,10%

Área impermeável: +/- 80%

Largura do escoamento: 0,61 km

Comprimento do escoamento: 2,75 km

ANEXO B

Tabela 7. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 01 – Três Sub-Bacias

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
1	0.852181602	Forte	0.004417	0.906806	52.24449	31.95427	7.030743	0.189063
1	0.847849562	Forte	0.003805	0.868951	71.69167	39.93562	9.184851	0.158907
1	0.840597997	Forte	0.003877	0.904127	118.6289	21.4586	4.55625	0.196492
1	0.829568328	Forte	0.007593	0.755566	37.28964	16.83844	4.851762	0.134231
1	0.821778685	Forte	0.006219	0.890452	52.64893	48.76596	9.684519	0.17626
1	0.818829382	Forte	0.005759	0.751527	74.8541	11.76802	7.596852	0.089199
1	0.794666188	Forte	0.006005	0.934658	92.27952	10.37624	1.827652	0.113258
1	0.783212567	Forte	0.008356	0.156598	17.5293	5.888173	8.288433	0.065633
1	0.770898541	Forte	0.003938	0.969308	93.70402	42.93752	2.289614	0.127379
1	0.76000319	Forte	0.010877	0.617392	13.99883	11.57271	2.857848	0.018289
1	0.727889652	Forte	0.007306	0.893981	112.1082	11.00736	5.954558	0.060273
1	0.7253033	Forte	0.008562	0.8005	43.31512	18.61399	2.47616	0.011348
1	0.718530874	Forte	0.008339	0.592343	21.94859	7.479883	8.615592	0.06852
1	0.707295094	Forte	0.007152	0.756261	23.05012	12.58796	7.316519	0.128594
1	0.69981996	Forte	0.004318	0.803238	115.8261	21.03139	9.83311	0.136168
1	0.69282116	Forte	0.005537	0.67539	38.77611	20.85535	6.961003	0.139487
1	0.663597327	Forte	0.013773	0.668487	16.70709	10.2117	8.8043	0.017136
1	0.659708322	Forte	0.005227	0.748727	34.56756	14.47136	6.153129	0.047235
1	0.64954153	Forte	0.005703	0.512807	23.67457	13.86702	3.428113	0.138999
1	0.63081277	Forte	0.004258	0.493573	92.29004	8.12023	8.614035	0.113069
1	0.620919561	Forte	0.006203	0.947195	59.30609	36.90819	7.844722	0.021108
1	0.619831018	Forte	0.00891	0.934855	110.9396	34.31219	7.778957	0.151151
1	0.598886999	Forte	0.006498	0.895502	56.59732	20.99639	7.795679	0.040955
1	0.589420335	Forte	0.005549	0.841369	84.76307	34.73937	5.996436	0.191374
1	0.582425738	Forte	0.011236	0.840621	36.61074	18.19191	9.073699	0.120576
1	0.578379221	Forte	0.006522	0.954014	83.32234	30.87136	9.732411	0.094918
1	0.551227941	Forte	0.013655	0.56568	17.27309	11.23084	3.941835	0.075052
1	0.53811674	Forte	0.012114	0.607378	17.87858	15.4667	9.576387	0.095746
1	0.516330154	Forte	0.010844	0.478048	72.60916	5.327467	9.865387	0.056679
1	0.508573546	Forte	0.013921	0.792048	19.38678	12.43058	5.886925	0.067469

Tabela 8. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 02 – Três Sub-Bacias

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
2	0.821445462	Forte	0.010209	0.898312	27.72725	18.27799	6.732679	0.057382
2	0.808894258	Forte	0.00865	0.817388	38.08356	17.16258	8.010578	0.19006
2	0.794227186	Forte	0.014038	0.877898	21.63676	21.50609	7.802295	0.117297
2	0.791200184	Forte	0.015566	0.964658	47.0895	44.12907	4.047713	0.023132
2	0.765778162	Forte	0.015395	0.93252	35.79825	13.56954	1.132491	0.100674
2	0.764710376	Forte	0.009936	0.868541	57.81411	17.21158	8.569656	0.102
2	0.749295508	Forte	0.015074	0.817186	26.83713	8.171689	2.965017	0.108694
2	0.745641442	Forte	0.011525	0.976289	31.17364	25.72423	0.055861	0.129825
2	0.738390629	Forte	0.015832	0.826244	30.35733	9.543743	8.079464	0.12849
2	0.723243978	Forte	0.011029	0.918428	54.51574	27.15717	5.458901	0.071427
2	0.716693845	Forte	0.014142	0.93348	33.61632	9.526058	7.595503	0.087131
2	0.705990666	Forte	0.01293	0.912828	66.85236	8.458813	8.743347	0.024678
2	0.704356221	Forte	0.003379	0.905025	51.88855	22.14338	1.798129	0.183745
2	0.70412294	Forte	0.016177	0.967375	42.18854	24.48339	7.208354	0.111637
2	0.702491265	Forte	0.007805	0.826696	36.30278	16.91178	8.515348	0.061934
2	0.699483958	Forte	0.007316	0.918961	32.9079	18.56051	7.302272	0.125794
2	0.690244872	Forte	0.018521	0.852231	23.88799	14.17324	3.658326	0.057524
2	0.672647031	Forte	0.015019	0.702599	48.50597	5.735146	8.81709	0.126115
2	0.667284062	Forte	0.019063	0.890657	46.89099	16.863	8.408658	0.068714
2	0.656422854	Forte	0.012218	0.979443	88.99567	10.83971	9.248976	0.073803
2	0.647587742	Forte	0.020425	0.950937	43.55237	30.04762	7.874434	0.087831
2	0.645669343	Forte	0.014602	0.862164	38.05254	12.05027	1.053142	0.144427
2	0.644755526	Forte	0.017869	0.953753	40.57396	15.30408	6.160377	0.107633
2	0.636001482	Forte	0.022179	0.926232	29.13561	15.96883	6.14411	0.018587
2	0.623473332	Forte	0.006708	0.515893	10.23986	5.703465	4.30767	0.088928
2	0.600758969	Forte	0.005487	0.272571	29.64599	5.652427	8.88382	0.188435
2	0.597146108	Forte	0.014463	0.878944	57.0301	11.84489	6.399628	0.143394
2	0.59201024	Forte	0.014948	0.824507	25.60297	21.45304	5.090995	0.028098
2	0.590299391	Forte	0.02158	0.850961	12.34645	5.791346	8.251992	0.033415
2	0.584572401	Forte	0.021086	0.723006	22.50268	8.13014	6.139032	0.002663
2	0.583710184	Forte	0.008575	0.990193	48.42136	25.81554	3.980087	0.039288
2	0.577400756	Forte	0.018395	0.946431	40.45382	19.17192	5.701702	0.197637
2	0.557841236	Forte	0.018725	0.986274	33.66144	15.08494	3.10981	0.06571
2	0.545410194	Forte	0.009392	0.932712	12.00092	10.72154	5.754905	0.114413
2	0.537997349	Forte	0.003369	0.770446	103.4964	6.484579	7.292497	0.036822
2	0.518509959	Forte	0.005167	0.859494	105.2834	16.83927	9.969781	0.04964
2	0.50371787	Forte	0.019316	0.826441	44.6077	14.78858	5.112655	0.059602

Tabela 9. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 06 – Três Sub-Bacias

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
6	0.860694477	Médio	0.002502	0.956474	49.05058	15.11137	1.575817	0.017229
6	0.84068799	Médio	0.002339	0.918682	60.17393	21.41146	8.669847	0.002634
6	0.827054581	Médio	0.002643	0.892642	51.50547	17.06817	8.97958	0.006406
6	0.741702292	Médio	0.001303	0.898705	59.74158	32.23568	3.80706	0.071785
6	0.739389184	Médio	0.00248	0.895686	52.99235	28.23766	4.574685	0.021516
6	0.665307028	Médio	0.003782	0.958851	64.92992	24.19292	3.204139	0.009628
6	0.63837212	Médio	0.001939	0.982005	60.90285	10.59563	0.730891	0.094527
6	0.626531247	Médio	0.00205	0.889697	58.20933	46.99147	7.447452	0.023544
6	0.617112228	Médio	0.003399	0.895679	42.26478	8.521024	3.464555	0.050921
6	0.5841563	Médio	0.003333	0.858665	30.92354	29.87932	5.954795	0.024551
6	0.567739711	Médio	0.003693	0.918416	24.07642	10.5958	6.162823	0.051742

Tabela 10. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 08 – Três Sub-Bacias

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
8	0.568465314	Médio	0.001338	0.652453	38.30364	6.226724	5.717342	0.169721
8	0.529716702	Médio	0.003576	0.873712	50.64056	13.2339	7.15121	0.124412

Tabela 11. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 11 – Três Sub-Bacias

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
11	-	Fraco	-	-	-	-	-	-

Tabela 12. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 12 – Três Sub-Bacias.

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
12	0.892712264	Forte	0.003598	0.923324	42.72479	21.90129	1.086499	0.064721
12	0.885335979	Forte	0.003041	0.962358	77.57794	39.15066	5.567506	0.026207
12	0.877028091	Forte	0.00166	0.66503	20.77048	17.98255	2.957168	0.15476
12	0.864007789	Forte	0.003147	0.777137	17.99981	16.33609	6.001404	0.178995
12	0.842046768	Forte	0.006708	0.515893	10.23986	5.703465	4.30767	0.088928
12	0.838785562	Forte	0.005049	0.920373	57.16153	47.48766	4.257971	0.0938
12	0.83564902	Forte	0.00365	0.880131	61.31604	40.83871	2.477568	0.011704
12	0.82909702	Forte	0.002495	0.401168	25.0119	11.36729	7.37942	0.114687
12	0.828755304	Forte	0.002746	0.621363	34.35684	16.47352	8.30533	0.073219
12	0.814149441	Forte	0.00292	0.833516	48.79122	39.65366	1.330366	0.106792
12	0.8084792	Forte	0.003379	0.905025	51.88855	22.14338	1.798129	0.183745
12	0.797081759	Forte	0.003369	0.770446	103.4964	6.484579	7.292497	0.036822
12	0.786871986	Forte	0.001987	0.851844	58.49635	54.11041	0.939414	0.15054
12	0.779304272	Forte	0.007805	0.826696	36.30278	16.91178	8.515348	0.061934
12	0.763116364	Forte	0.007346	0.916251	70.99877	40.34672	8.646016	0.029816
12	0.74643507	Forte	0.004172	0.601994	49.74911	14.10799	7.86898	0.053607
12	0.738739751	Forte	0.007357	0.639574	21.12303	17.11068	6.155004	0.003498
12	0.733410073	Forte	0.007417	0.984019	66.90852	23.84681	2.243328	0.03514
12	0.71984035	Forte	0.005167	0.859494	105.2834	16.83927	9.969781	0.04964
12	0.713401432	Forte	0.002062	0.450693	52.96787	7.265674	8.906206	0.015704
12	0.707865678	Forte	0.001945	0.533895	24.42698	21.39899	0.884442	0.198393
12	0.702110893	Forte	0.006107	0.823892	46.68758	30.76094	5.893123	0.081999
12	0.685397934	Forte	0.005895	0.800968	45.6242	30.67338	5.533126	0.066118
12	0.661906316	Forte	0.002907	0.742854	56.28216	28.04961	4.254085	0.098857
12	0.654580941	Forte	0.004769	0.732963	52.47424	20.26445	4.653305	0.09557
12	0.640392885	Forte	0.010209	0.898312	27.72725	18.27799	6.732679	0.057382
12	0.636316324	Forte	0.007316	0.918961	32.9079	18.56051	7.302272	0.125794
12	0.634173212	Forte	0.008575	0.990193	48.42136	25.81554	3.980087	0.039288
12	0.634142301	Forte	0.007125	0.703014	33.53474	21.15718	6.321866	0.044823
12	0.591696174	Forte	0.003539	0.571672	26.0095	23.741	7.181265	0.042208
12	0.57360834	Forte	0.005487	0.272571	29.64599	5.652427	8.88382	0.188435
12	0.55214109	Forte	0.002774	0.71584	54.66729	32.41219	9.321523	0.015708
12	0.550222473	Forte	0.00593	0.843338	58.85295	28.73387	0.826488	0.007355
12	0.541545062	Forte	0.002007	0.570203	31.55161	7.415329	6.000715	0.006725
12	0.540072841	Forte	0.004495	0.845344	92.88221	21.81759	7.19684	0.130806
12	0.534674472	Forte	0.00182	0.919839	18.50867	16.7016	8.783471	0.15375
12	0.524432938	Forte	0.003724	0.377805	25.1447	14.72067	5.197746	0.132595
12	0.506944628	Forte	0.009392	0.932712	12.00092	10.72154	5.754905	0.114413

Tabela 13. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 01 – Dez Sub- Bacias

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
1	0.872148133	Forte	0.0096918	0.7650635	17.481952	15.799812	1.0229003	0.0785953
1	0.871405727	Forte	0.0024735	0.936832	80.810179	51.045313	6.069731	0.1451836
1	0.861455907	Forte	0.0083998	0.7029328	29.630803	13.863869	6.6168486	0.1318231
1	0.850152827	Forte	0.0071885	0.9423038	89.104277	26.728173	6.7317204	0.0690559
1	0.832104188	Forte	0.0099967	0.8602206	31.663191	26.08955	2.9292198	0.0554368
1	0.827172532	Forte	0.0087497	0.9876145	105.5269	25.629671	7.6070774	0.1463744
1	0.820704452	Forte	0.0100108	0.7812538	29.764574	16.837776	4.50217	0.137046
1	0.820318804	Forte	0.0054682	0.1521318	25.787683	6.6970091	8.3645492	0.1626527
1	0.813734843	Forte	0.0083398	0.7300916	53.329369	14.679035	9.3938095	0.1248929
1	0.805945878	Forte	0.0216975	0.9554853	26.157041	12.279381	8.5319342	0.0174814
1	0.80137815	Forte	0.015415	0.8945304	27.427814	18.234196	6.080034	0.126865
1	0.799836653	Forte	0.0098046	0.8622047	35.127466	14.13377	6.709412	0.0603531
1	0.796715273	Forte	0.0047628	0.9916575	104.90008	19.075361	8.3724207	0.1874187
1	0.792052103	Forte	0.0202382	0.8764548	23.495591	12.251082	5.3868891	0.0089019
1	0.787170196	Forte	0.0093211	0.8623148	39.214486	33.895182	4.9345759	0.1589778
1	0.787017614	Forte	0.0033215	0.7742372	58.062473	30.624537	5.9873386	0.1882519
1	0.779991382	Forte	0.0171174	0.874459	20.420935	15.961874	8.6826408	0.1654591
1	0.779806362	Forte	0.0113678	0.8063606	59.831065	13.662088	8.6166223	0.0468715
1	0.776909203	Forte	0.0104958	0.9109551	86.980798	18.815354	8.7590796	0.1060894
1	0.776592256	Forte	0.0116351	0.5633596	11.992119	10.838206	3.1572075	0.0667499
1	0.771137114	Forte	0.0118199	0.7794299	53.518356	7.2882621	5.4756217	0.0175951
1	0.764911708	Forte	0.0140116	0.8608289	37.790814	18.893722	5.6318205	0.0799817
1	0.763839185	Forte	0.0038584	0.8255804	34.173392	23.875366	9.0428955	0.1118935
1	0.763231651	Forte	0.0123493	0.8677057	39.013262	25.784004	4.9282896	0.0732283
1	0.762155928	Forte	0.0215643	0.9286629	31.960623	9.9882555	4.8228204	0.0745534
1	0.760262556	Forte	0.0089184	0.9553444	72.030425	57.790462	4.332614	0.0395583
1	0.758953574	Forte	0.0115686	0.7646703	28.102598	18.646614	6.4163705	0.1042688
1	0.754502335	Forte	0.0054831	0.1254026	24.077052	5.3783817	9.94316	0.0188072
1	0.752974185	Forte	0.0046671	0.7759742	44.728643	25.820118	1.6465796	0.1729993
1	0.752042288	Forte	0.0152463	0.9985399	55.415232	38.233618	6.078007	0.1324226
1	0.749213139	Forte	0.0085364	0.8620502	82.969957	19.620334	6.3215606	0.0841855
1	0.745672877	Forte	0.0111648	0.8852662	62.465404	8.286325	6.4104967	0.1670591
1	0.745413181	Forte	0.0140893	0.8964826	36.194242	28.591473	1.7353284	0.0393263
1	0.742942945	Forte	0.0061135	0.8531035	60.676658	32.230378	7.4967671	0.0266947
1	0.736953456	Forte	0.0152674	0.9889478	47.333022	12.293349	7.4496264	0.153285
1	0.729172593	Forte	0.0019234	0.7504168	44.291583	19.108035	7.2093678	0.1761525
1	0.716759846	Forte	0.0051561	0.772538	50.293698	17.311323	4.2391977	0.0018208
1	0.7097134	Forte	0.0140194	0.9847783	58.374874	42.698404	9.2399296	0.1944842
1	0.704312332	Forte	0.0116808	0.5435716	25.898865	10.391406	8.9649778	0.0889717
1	0.703358038	Forte	0.009013	0.8068346	90.131283	5.5882321	7.7947195	0.1858004
1	0.697193973	Forte	0.0076702	0.9482294	44.711191	9.7861414	1.088546	0.136884

Continuação Tabela 13.								
1	0.693160565	Forte	0.009182	0.9344667	83.858803	42.289072	4.7676299	0.0191053
1	0.692722643	Forte	0.0122633	0.9146852	68.75537	18.66185	3.232308	0.0580391
1	0.692511516	Forte	0.0228867	0.9263396	38.631919	16.825323	8.3733813	0.0473166
1	0.689709321	Forte	0.0231799	0.9603777	55.199656	14.325191	6.6969608	0.0115068
1	0.682900297	Forte	0.0122969	0.9923251	33.549961	30.327257	6.3010654	0.0628835
1	0.677292033	Forte	0.020945	0.984985	55.141052	41.300055	8.6291249	0.0697225
1	0.676852482	Forte	0.0214739	0.8594347	42.435889	9.9074866	6.5106792	0.0124118
1	0.664771225	Forte	0.0108643	0.7221883	57.661008	12.46029	6.6982203	0.1098804
1	0.661196545	Forte	0.0253146	0.9873929	43.99594	23.307098	4.6742339	0.0730126
1	0.658494539	Forte	0.0143033	0.9894197	74.883995	17.066112	2.8242288	0.1791252
1	0.657530333	Forte	0.0103476	0.969497	36.677612	26.031074	9.3032555	0.0106736
1	0.656841333	Forte	0.0343548	0.9877147	24.193525	7.1461194	3.6020522	0.0637015
1	0.652409406	Forte	0.0050401	0.3618284	20.442044	13.602233	8.3953493	0.1877889
1	0.646050312	Forte	0.0179779	0.9456671	72.293997	5.9869651	6.2395176	0.1517261
1	0.622756657	Forte	0.008336	0.7255611	26.968342	26.469004	8.9381079	0.1976814
1	0.621652084	Forte	0.0099647	0.535623	39.863465	11.290886	8.7805825	0.0537212
1	0.617923526	Forte	0.0158209	0.6595441	44.084408	7.8969749	7.4645954	0.0832307
1	0.600530557	Forte	0.0084963	0.8819995	27.144363	11.893663	5.2408973	0.0423743
1	0.59716078	Forte	0.0190955	0.9824073	57.131262	21.08284	3.2777031	0.1963433
1	0.588254222	Forte	0.0092234	0.8246341	79.290328	12.090346	4.2036979	0.1751419
1	0.583847157	Forte	0.0091526	0.9692241	34.301441	16.688574	2.2525353	0.1801391
1	0.577743982	Forte	0.0362592	0.9887169	29.746888	10.23676	0.0870825	0.0023928
1	0.571156621	Forte	0.0233715	0.8785386	26.572611	24.358995	2.3166345	0.0520259
1	0.566424009	Forte	0.0164502	0.8706675	33.059188	31.017449	5.8561189	0.1365183
1	0.564603321	Forte	0.0154155	0.5091373	18.069434	10.045691	7.5139805	0.1286829
1	0.562105055	Forte	0.0211621	0.7695039	51.29784	9.3605303	9.2893124	0.0670203
1	0.560926535	Forte	0.0070382	0.7300054	35.708044	26.366023	3.311538	0.0558246
1	0.552389539	Forte	0.0058789	0.8068481	54.113312	35.490433	9.5837663	0.0253054
1	0.546635996	Forte	0.026295	0.9739657	50.218812	14.345101	1.2140519	0.1101445
1	0.542575374	Forte	0.0168297	0.8476063	59.50642	18.559532	5.6052385	0.0030698
1	0.538854938	Forte	0.0095949	0.3982192	26.782032	9.7702525	6.152511	0.1926435
1	0.535751625	Forte	0.0199265	0.9239401	47.486831	37.009404	2.4842468	0.0879717
1	0.534252669	Forte	0.0111098	0.8900879	59.094782	48.870493	9.1804054	0.1776427
1	0.532997202	Forte	0.0379982	0.9148664	27.205455	6.7783819	8.613333	0.0678684
1	0.532847137	Forte	0.0195496	0.8991376	51.061185	24.763971	8.6246888	0.1691946
1	0.525828764	Forte	0.0030399	0.6647922	31.162446	11.391104	5.4551668	0.062001
1	0.524801497	Forte	0.0096249	0.8029174	58.126363	19.305616	2.8067344	0.0030901
1	0.519351314	Forte	0.0325298	0.7721197	13.582377	8.0978655	7.6294784	0.0551666
1	0.514093687	Forte	0.027305	0.986468	50.206796	29.838906	7.3321278	0.1914346
1	0.500893948	Forte	0.0330255	0.9917383	46.585699	11.850141	5.3979518	0.1419629
1	0.500700644	Forte	0.0131821	0.8325344	110.11322	12.084349	8.9989322	0.1276744

Tabela 14. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 02 – Dez Sub- Bacias

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
2	0.831999382	Forte	0.025963	0.86684	66.33612	27.6851	2.83509	0.099639
2	0.829720381	Forte	0.024925	0.558681	31.32373	9.488355	2.953351	0.183189
2	0.827685068	Forte	0.016669	0.554893	106.8728	6.864666	8.270476	0.083968
2	0.825509325	Forte	0.028194	0.610761	33.13706	12.76711	8.82518	0.091571
2	0.824519626	Forte	0.024141	0.880952	76.54328	24.83566	4.32626	0.02992
2	0.824243661	Forte	0.0236	0.842187	71.23495	22.83348	4.185048	0.194693
2	0.81375168	Forte	0.025705	0.576014	35.34074	10.83684	8.908552	0.087814
2	0.813705172	Forte	0.024108	0.909278	73.60383	24.02866	2.310543	0.05949
2	0.81346196	Forte	0.028174	0.788325	45.18707	21.18947	5.996859	0.00734
2	0.810061409	Forte	0.028594	0.408703	18.40619	8.03256	8.636225	0.016744
2	0.809209903	Forte	0.015646	0.54487	107.8191	6.967828	9.677542	0.023225
2	0.80864835	Forte	0.027849	0.904845	71.13077	21.52336	1.644763	0.172647
2	0.807527674	Forte	0.027628	0.842561	40.57613	33.35837	1.482029	0.01236
2	0.80741675	Forte	0.02739	0.900697	58.76992	29.75012	0.272353	0.066046
2	0.807347856	Forte	0.031222	0.764514	48.69738	17.37276	6.495635	0.014657
2	0.806452029	Forte	0.024543	0.548207	17.76715	12.24344	2.767992	0.17022
2	0.804299972	Forte	0.035066	0.736141	23.79775	18.44291	3.465766	0.170596
2	0.804165451	Forte	0.018276	0.322609	19.8925	5.002659	1.552409	0.132296
2	0.799096558	Forte	0.030662	0.887476	40.28443	38.13674	4.29696	0.014237
2	0.795447445	Forte	0.02679	0.580929	25.19812	13.69486	3.665223	0.192706
2	0.794465905	Forte	0.028606	0.800032	56.17314	17.39496	4.745618	0.192914
2	0.793187585	Forte	0.027119	0.762378	32.08115	25.26222	5.518831	0.043841
2	0.792119061	Forte	0.023126	0.594619	101.6204	6.242582	9.14918	0.100694
2	0.789479589	Forte	0.014989	0.582886	111.3924	9.104439	9.051606	0.040443
2	0.788417795	Forte	0.035804	0.781974	41.9726	19.22531	6.267608	0.107244
2	0.787307088	Forte	0.019354	0.913676	119.3079	43.18615	8.587325	0.121013
2	0.786623124	Forte	0.031427	0.906544	90.68658	39.71948	7.287322	0.116021
2	0.785798735	Forte	0.032205	0.742848	54.56054	18.65025	7.239773	0.031541
2	0.784481885	Forte	0.024981	0.930371	78.85003	38.69602	0.146809	0.081833
2	0.784132265	Forte	0.034916	0.405022	10.60433	10.05504	8.246885	0.062882
2	0.783386682	Forte	0.02704	0.619168	32.88639	15.97245	9.922128	0.025789
2	0.773169938	Forte	0.024396	0.909192	101.979	23.54441	6.535741	0.002628
2	0.770585019	Forte	0.026005	0.873577	87.32921	23.15168	7.152905	0.036068
2	0.769966484	Forte	0.030813	0.695448	80.53842	12.99635	8.768461	0.046056
2	0.769130052	Forte	0.027562	0.862591	52.24924	44.96231	9.054018	0.160537
2	0.766942534	Forte	0.019803	0.841165	97.37128	11.57613	4.87278	0.072978
2	0.762357644	Forte	0.034482	0.434607	29.63051	6.082559	8.766813	0.023915
2	0.761556919	Forte	0.036248	0.863894	29.84184	28.17247	7.553494	0.111839
2	0.760463238	Forte	0.031295	0.740052	67.66584	12.44569	9.176015	0.023312
2	0.758293457	Forte	0.03797	0.52206	35.99016	8.754194	8.222369	0.119974
2	0.758251966	Forte	0.026774	0.701979	55.39463	18.36303	5.768226	0.04113

Continuação da Tabela 14

2	0.758165215	Forte	0.02283	0.821968	37.60195	32.59266	4.354324	0.018665
2	0.757700686	Forte	0.02941	0.739981	62.30498	10.10933	3.202133	0.052642
2	0.756919971	Forte	0.028078	0.921154	93.42106	42.50127	3.279474	0.139121
2	0.756713778	Forte	0.030422	0.486127	16.91639	11.97035	2.490438	0.17449
2	0.755603637	Forte	0.017613	0.138717	32.71923	6.398907	7.978587	0.162044
2	0.755050972	Forte	0.039816	0.859624	49.66033	28.76605	9.180656	0.087433
2	0.754696144	Forte	0.024932	0.583219	30.26105	13.0661	2.328041	0.127249
2	0.752127473	Forte	0.02296	0.85487	119.3469	12.89867	3.238415	0.162125
2	0.75189992	Forte	0.02186	0.766494	108.5498	10.53544	9.445056	0.125147
2	0.750905167	Forte	0.034798	0.779664	66.15707	15.82241	9.548014	0.187076
2	0.749777105	Forte	0.025967	0.389911	12.85642	9.910478	0.631803	0.131988
2	0.74976124	Forte	0.022252	0.707898	36.95272	12.30199	4.215235	0.170355
2	0.749015523	Forte	0.024381	0.3849	60.73126	8.522919	9.334301	0.151234
2	0.747068944	Forte	0.03355	0.409301	24.16055	10.12447	8.902169	0.129778
2	0.742447983	Forte	0.041321	0.683537	23.59743	11.67833	6.082613	0.057883
2	0.741525568	Forte	0.02769	0.797161	38.46985	31.41624	1.246452	0.158995
2	0.741307957	Forte	0.02554	0.943786	106.8794	33.50515	5.647385	0.152197
2	0.739685656	Forte	0.025079	0.661419	35.60805	10.94403	7.146653	0.0638
2	0.738452746	Forte	0.027044	0.791702	78.76103	17.31242	3.522446	0.097166
2	0.733720447	Forte	0.026326	0.842074	91.52908	33.90516	7.831555	0.100537
2	0.732311418	Forte	0.025149	0.603794	12.19096	10.71996	0.415577	0.104308
2	0.729577501	Forte	0.040436	0.873882	43.76328	36.9354	0.53558	0.142872
2	0.728878194	Forte	0.018824	0.348371	34.38768	8.026753	8.068707	0.018413
2	0.727660194	Forte	0.038355	0.909791	58.35816	37.55845	2.599837	0.053536
2	0.723545449	Forte	0.030156	0.907328	83.489	57.8714	9.845269	0.036353
2	0.723047145	Forte	0.032624	0.446234	30.37864	5.288569	6.164444	0.157344
2	0.720989595	Forte	0.030015	0.565686	64.37979	11.7693	8.766147	0.091476
2	0.720964261	Forte	0.045128	0.767201	29.89295	16.95508	4.282582	0.012093
2	0.714136266	Forte	0.025635	0.911275	90.98033	37.0335	1.044488	0.105274
2	0.713635228	Forte	0.028798	0.597651	19.75615	17.74953	2.840705	0.122815
2	0.713155398	Forte	0.022444	0.975483	107.3834	23.59079	2.126036	0.007373
2	0.710746377	Forte	0.040375	0.925617	52.44743	42.35204	6.613206	0.070811
2	0.709432543	Forte	0.037074	0.24046	14.56796	6.367271	2.479763	0.161918
2	0.708404851	Forte	0.024722	0.39422	40.3067	10.68826	8.449324	0.066371
2	0.70683859	Forte	0.030578	0.660497	27.94149	9.206952	5.232307	0.196994
2	0.70054694	Forte	0.025681	0.878853	89.12717	18.70617	6.815564	0.127268
2	0.700437707	Forte	0.034283	0.766971	40.67912	21.49743	1.645536	0.177778
2	0.697656237	Forte	0.029646	0.845647	98.33899	24.13189	4.451544	0.003433
2	0.696086068	Forte	0.02338	0.661383	99.03179	5.948543	9.385575	0.199835
2	0.687474262	Forte	0.019074	0.465605	33.9221	13.16647	8.466653	0.156829
2	0.686980019	Forte	0.04258	0.539792	15.98082	12.68409	4.947817	0.175608
2	0.686554757	Forte	0.015219	0.710671	55.82808	17.77241	5.47175	0.182756
2	0.679865548	Forte	0.041497	0.798164	56.32625	24.71997	7.313837	0.081171
2	0.678149039	Forte	0.023427	0.91414	95.41984	55.33173	1.64487	0.007135

Continuação da Tabela 14

2	0.675226251	Forte	0.034752	0.931771	46.38781	44.60347	4.361921	0.192613
2	0.674684676	Forte	0.018025	0.832018	75.78058	30.11506	2.568024	0.009608
2	0.673687298	Forte	0.031323	0.970319	76.04483	50.36466	8.109099	0.113362
2	0.67351403	Forte	0.020569	0.589642	16.29921	13.02622	8.55348	0.123119
2	0.672970552	Forte	0.024681	0.749207	100.2696	6.199164	6.572805	0.066311
2	0.671614313	Forte	0.027325	0.89452	66.69604	22.14064	5.221373	0.17356
2	0.671561689	Forte	0.021125	0.909164	58.59109	24.30369	1.521971	0.188963
2	0.669614371	Forte	0.010793	0.522929	87.79752	5.02067	6.691299	0.049533
2	0.668522743	Forte	0.010923	0.468738	93.38501	8.802498	7.596635	0.099214
2	0.664734541	Forte	0.037214	0.787848	38.57658	30.80289	8.625156	0.183096
2	0.664415814	Forte	0.018617	0.710191	28.52463	19.08529	3.032422	0.066164
2	0.662518182	Forte	0.052803	0.492941	12.14325	8.231556	2.476071	0.004355
2	0.660168116	Forte	0.044675	0.843327	43.84596	19.49945	4.734131	0.010363
2	0.658807552	Forte	0.028372	0.209306	14.81875	5.269676	0.877399	0.140057
2	0.65679962	Forte	0.046711	0.67515	15.28528	10.01458	4.35352	0.152634
2	0.654269307	Forte	0.051703	0.806298	34.56036	18.67129	7.706315	0.015696
2	0.651859418	Forte	0.020719	0.771213	71.40885	10.87821	7.236404	0.190371
2	0.650705912	Forte	0.043297	0.926441	65.79422	22.44996	0.64388	0.048365
2	0.649416319	Forte	0.035597	0.974855	95.01158	49.4194	9.953674	0.098826
2	0.648626991	Forte	0.012864	0.459563	99.09415	7.192742	6.062867	0.13421
2	0.646692143	Forte	0.049486	0.867401	38.75153	37.40685	2.531672	0.123561
2	0.640529554	Forte	0.025282	0.893255	106.6918	6.251708	1.643811	0.143018
2	0.640305368	Forte	0.044343	0.571417	47.65772	7.330588	7.934259	0.134909
2	0.638233127	Forte	0.046508	0.858657	48.52728	22.05758	9.075514	0.104529
2	0.637370547	Forte	0.017169	0.813425	56.04297	28.01621	7.694441	0.080937
2	0.637316109	Forte	0.01508	0.788727	80.92554	15.06948	1.626213	0.141477
2	0.636796892	Forte	0.024915	0.765133	80.94887	9.86131	9.993187	0.189005
2	0.634508842	Forte	0.041532	0.88583	45.98539	19.73676	1.399733	0.082595
2	0.634368372	Forte	0.03389	0.628502	72.36447	9.862613	5.670732	0.190816
2	0.633770762	Forte	0.04442	0.959329	90.61938	49.99618	5.62545	0.026918
2	0.631212432	Forte	0.025521	0.78186	59.03041	33.53135	7.629707	0.108031
2	0.630340734	Forte	0.043542	0.79003	57.29414	13.11661	7.623232	0.063847
2	0.628213836	Forte	0.03172	0.867295	74.95409	47.94985	9.843842	0.159413
2	0.627667639	Forte	0.040135	0.73319	61.40166	9.946868	9.702061	0.177951
2	0.625142765	Forte	0.049133	0.763403	43.83047	12.83602	8.406448	0.018201
2	0.620442065	Forte	0.01768	0.678175	26.95001	18.91474	8.287653	0.119687
2	0.620074024	Forte	0.040628	0.605545	27.13245	15.29193	4.165426	0.195758
2	0.61986301	Forte	0.046104	0.759128	81.52269	12.98673	9.735788	0.008092
2	0.619586479	Forte	0.017767	0.876632	60.97609	55.87553	7.869127	0.100048
2	0.61870403	Forte	0.036448	0.859442	57.92326	8.269257	0.884814	0.010733
2	0.618450943	Forte	0.028323	0.788519	40.40233	37.33307	3.72155	0.032277
2	0.61829095	Forte	0.039323	0.804432	55.66923	28.39467	4.574126	0.168627
2	0.617496645	Forte	0.052781	0.674353	40.20253	10.61707	9.521172	0.034632
2	0.616619962	Forte	0.031237	0.563103	52.76384	5.646629	2.571804	0.026239

Continuação da Tabela 14

2	0.612948372	Forte	0.049781	0.776253	29.66912	24.59739	4.474654	0.12818
2	0.612831365	Forte	0.034629	0.783701	53.51701	31.97991	9.283592	0.052604
2	0.611933701	Forte	0.047216	0.943585	69.08646	42.53334	5.509471	0.147794
2	0.608553235	Forte	0.051471	0.897779	48.51115	40.64111	3.949355	0.163442
2	0.604097712	Forte	0.014238	0.635168	76.9771	17.5898	7.846098	0.114626
2	0.603975711	Forte	0.015546	0.876938	106.265	46.12833	5.719389	0.030658
2	0.601469799	Forte	0.047789	0.828431	48.85159	30.47755	5.862794	0.157688
2	0.600104672	Forte	0.039415	0.840499	32.5955	16.72746	6.449767	0.003191
2	0.597827382	Forte	0.014269	0.236925	85.75981	7.075828	8.621215	0.187561
2	0.595208853	Forte	0.029943	0.877453	85.52341	49.85362	4.088466	0.143882
2	0.593755917	Forte	0.031438	0.545904	77.07027	8.443706	5.971344	0.125882
2	0.589922572	Forte	0.018682	0.960635	90.91884	47.42981	9.087008	0.099306
2	0.586512482	Forte	0.042149	0.718661	53.35911	19.09607	5.767927	0.066917
2	0.584861179	Forte	0.035987	0.737745	68.49624	7.295743	6.051826	0.12414
2	0.584547814	Forte	0.034727	0.883669	44.69807	18.08998	2.220953	0.031737
2	0.583996274	Forte	0.044517	0.825495	50.13637	7.544483	0.724223	0.090068
2	0.581970865	Forte	0.031678	0.86213	79.82846	45.4335	4.698146	0.049328
2	0.581435666	Forte	0.019101	0.178922	28.2827	9.461505	7.576652	0.021668
2	0.578097245	Forte	0.051966	0.828535	48.90771	18.08935	4.104952	0.068524
2	0.577117751	Forte	0.054357	0.742653	47.88386	12.14117	9.293606	0.041395
2	0.576892086	Forte	0.042796	0.775251	56.80871	10.5029	7.945838	0.013192
2	0.575818053	Forte	0.017243	0.967412	81.45954	58.5687	5.344458	0.137458
2	0.575522787	Forte	0.042484	0.862543	63.59593	16.31923	5.481878	0.023215
2	0.575517435	Forte	0.035541	0.806025	118.8787	25.15195	9.849927	0.044732
2	0.573799069	Forte	0.04499	0.875407	28.18476	16.81302	0.6757	0.019652
2	0.573734486	Forte	0.053367	0.889059	30.43425	27.5928	7.773349	0.146622
2	0.571932578	Forte	0.030869	0.751912	36.76586	32.8954	6.744205	0.184584
2	0.569850609	Forte	0.048237	0.890138	62.93749	38.86172	3.524482	0.076774
2	0.568204189	Forte	0.040549	0.972089	111.4962	47.91819	0.663251	0.14144
2	0.567384574	Forte	0.054542	0.599842	24.36368	12.10833	4.733572	0.022952
2	0.566030974	Forte	0.049863	0.911996	60.59186	22.28568	0.22049	0.134042
2	0.565798606	Forte	0.042672	0.920664	88.89499	45.12545	2.654304	0.043402
2	0.564050591	Forte	0.050193	0.677789	23.76702	18.43461	7.054464	0.189532
2	0.563873894	Forte	0.058003	0.661916	22.37602	10.52409	3.836315	0.116364
2	0.560032363	Forte	0.023542	0.83336	70.58246	45.38062	4.75433	0.132522
2	0.559508519	Forte	0.031955	0.787906	43.00895	11.28008	6.711765	0.143881
2	0.558572218	Forte	0.046458	0.961324	101.2094	54.95726	8.384847	0.040106
2	0.555563955	Forte	0.02796	0.830898	58.07907	45.76083	6.161067	0.075756
2	0.554869277	Forte	0.017144	0.799871	81.746	14.99413	8.924035	0.048881
2	0.5526605	Forte	0.059418	0.797133	23.29722	15.34812	7.403127	0.07905
2	0.551750759	Forte	0.039559	0.792992	80.47457	16.74568	3.727853	0.157698
2	0.551496578	Forte	0.027263	0.606574	27.0407	7.203669	9.84921	0.125949
2	0.547072047	Forte	0.041347	0.851963	56.55572	42.43631	5.420972	0.040353
2	0.546127234	Forte	0.060359	0.881471	42.68769	30.50031	7.283964	0.046806

Continuação da Tabela 14

2	0.546008261	Forte	0.037522	0.882659	94.93571	15.178	7.498454	0.197459
2	0.545324468	Forte	0.051749	0.730345	34.9536	21.38111	9.785722	0.133782
2	0.540992104	Forte	0.056686	0.861058	59.13275	28.26723	6.869075	0.081037
2	0.540546927	Forte	0.040773	0.916088	86.04878	58.32503	3.432376	0.112689
2	0.539852658	Forte	0.043707	0.490497	82.28496	6.561629	9.657529	0.121155
2	0.539701868	Forte	0.030336	0.451427	61.59561	10.5606	7.053584	0.099786
2	0.539002898	Forte	0.054369	0.318736	28.85161	6.928504	8.649162	0.021776
2	0.536938418	Forte	0.028591	0.807558	51.6023	42.13503	2.86964	0.086876
2	0.53678139	Forte	0.013644	0.888428	73.15188	44.08866	3.716536	0.105533
2	0.535895358	Forte	0.045584	0.824942	59.40512	19.14374	2.158791	0.137236
2	0.534693807	Forte	0.017548	0.865719	86.49801	14.57487	5.683026	0.112788
2	0.532399552	Forte	0.035053	0.889993	93.75122	55.05882	7.042243	0.056901
2	0.531751064	Forte	0.023926	0.858423	110.6384	19.55692	2.237976	0.166045
2	0.531219164	Forte	0.016206	0.883188	53.89589	45.30056	4.116751	0.029818
2	0.529355238	Forte	0.06626	0.691815	12.36096	12.16193	0.78808	0.18275
2	0.527482289	Forte	0.04683	0.946037	108.6137	36.48312	4.416349	0.005803
2	0.525191765	Forte	0.028505	0.645707	73.91169	10.45488	3.362172	0.082761
2	0.525018214	Forte	0.018328	0.598342	48.61989	8.015894	9.656734	0.117481
2	0.520739631	Forte	0.056108	0.832411	58.39202	16.47367	9.154723	0.051365
2	0.520309593	Forte	0.017765	0.74747	67.31173	11.90815	8.823465	0.062806
2	0.519682964	Forte	0.037186	0.753199	87.30439	16.05091	4.60926	0.110245
2	0.518020574	Forte	0.016117	0.787209	38.83813	28.24802	0.017148	0.118535
2	0.517088814	Forte	0.060688	0.821532	44.09272	22.89454	8.63369	0.183232
2	0.516758056	Forte	0.022916	0.083012	57.80723	6.942297	9.022422	0.014775
2	0.513161337	Forte	0.042199	0.846303	48.24955	45.74417	1.982959	0.077325
2	0.510589841	Forte	0.044404	0.390349	65.59617	5.944482	8.291129	0.084785
2	0.507858588	Forte	0.05149	0.901451	96.86742	23.5952	5.784411	0.048295
2	0.507555176	Forte	0.045469	0.746183	108.2801	15.67714	9.106335	0.031362
2	0.503819311	Forte	0.043995	0.73345	41.68063	23.03675	3.271361	0.110766
2	0.503242437	Forte	0.02583	0.862137	111.0205	7.490428	6.486634	0.055003

Tabela 15. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 06 – Dez Sub- Bacias.

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
6	0.712810149	Médio	0.0030409	0.9623953	77.577944	39.150665	5.5719388	0.0262067
6	0.687624534	Médio	0.0035984	0.9234006	42.724788	21.901289	1.0954121	0.0647206
6	0.627756179	Médio	0.0031472	0.7773602	17.99981	16.336086	6.0054028	0.1789948
6	0.564587421	Médio	0.007417	0.9840354	66.90852	23.846811	2.2510851	0.0351401

Tabela 16. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 08 – Dez Sub- Bacias.

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
8	0	Médio	0	0	0	0	0	0

Tabela 17. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 11 – Dez Sub- Bacias.

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
11	0	Fraco	0	0	0	0	0	0

Tabela 18. Eficiência e conjunto de parâmetros encontrados para Evento 12 – Dez Sub- Bacias.

Evento	eNS	Tipo de evento	Parâmetros					
			Manning Plano	Área Impermeável	Infiltração inicial	Infiltração final	Condutividade Hidráulica	Manning Canal
12	0.955591653	Forte	0.0073062	0.8940873	112.10817	11.00736	5.9586031	0.0602731
12	0.940492277	Forte	0.0089102	0.9349198	110.93964	34.312193	7.7811776	0.1511514
12	0.935975621	Forte	0.0108767	0.6177746	13.998832	11.572706	2.8649905	0.0182893
12	0.930714075	Forte	0.0128687	0.8207554	36.722755	16.259116	4.3196427	0.177721
12	0.926649722	Forte	0.0137732	0.6688187	16.707092	10.2117	8.8054961	0.0171356
12	0.925618698	Forte	0.0107081	0.9399263	90.085937	11.829193	2.6834708	0.1692413
12	0.92485155	Forte	0.0121138	0.6077704	17.878577	15.466705	9.5768104	0.0957461
12	0.922720767	Forte	0.011666	0.838323	44.16293	34.040021	9.1288481	0.1415982
12	0.918036134	Forte	0.0112358	0.8407804	36.610737	18.19191	9.0746257	0.1205757
12	0.914842647	Forte	0.0136547	0.5661141	17.273094	11.23084	3.9478928	0.0750525
12	0.909149287	Forte	0.0083563	0.1574416	17.5293	5.8881733	8.2901444	0.0656329
12	0.908057009	Forte	0.0105209	0.8063835	56.273945	25.282042	5.0152024	0.1504838
12	0.905943498	Forte	0.010588	0.86996	103.09609	7.5195593	8.849303	0.1318411
12	0.905578884	Forte	0.0085623	0.8006994	43.315115	18.613989	2.4836842	0.0113484
12	0.905344698	Forte	0.0060049	0.9347229	92.279518	10.376236	1.8358244	0.1132581
12	0.904823612	Forte	0.0128213	0.8400431	45.387426	32.109547	7.554117	0.1355503
12	0.903186396	Forte	0.0124107	0.8096885	51.491093	26.188535	7.8591372	0.1125335
12	0.90175666	Forte	0.0121393	0.8659636	69.881817	16.776381	7.7963546	0.1425663
12	0.90023149	Forte	0.0121346	0.9016365	54.528395	23.390921	5.6548285	0.1473089
12	0.895457695	Forte	0.0139214	0.792256	19.386781	12.430577	5.8910382	0.0674688
12	0.894609384	Forte	0.0075926	0.7558106	37.289639	16.838435	4.8569101	0.1342307
12	0.892074085	Forte	0.01512	0.8739816	26.069672	23.695916	9.6804038	0.1857637
12	0.886267204	Forte	0.0139497	0.8495534	22.593444	16.185073	8.6672523	0.1917887
12	0.884022235	Forte	0.0094173	0.6045022	20.582652	19.79546	1.4195972	0.1883609
12	0.883543785	Forte	0.0146031	0.8112945	34.044175	6.2129573	0.2244017	0.0271762
12	0.881493419	Forte	0.0130329	0.7735456	45.700469	8.5411178	2.4641272	0.1914008
12	0.878244217	Forte	0.0146924	0.6002173	40.251077	5.7366693	9.4503987	0.0338377
12	0.869050388	Forte	0.0114827	0.7466056	35.447593	28.49158	9.4181747	0.021027
12	0.868782011	Forte	0.015082	0.6535675	39.408832	7.6409656	7.5542007	0.0763038
12	0.848224346	Forte	0.0151757	0.8136257	12.056791	11.625848	4.9198232	0.0077815
12	0.847991631	Forte	0.0108442	0.4785697	72.609161	5.3274673	9.8655212	0.0566791
12	0.84646937	Forte	0.0057587	0.7517751	74.854105	11.76802	7.5992554	0.0891989
12	0.840548267	Forte	0.0124732	0.9369475	103.99582	37.209724	8.6053387	0.1890656
12	0.833349399	Forte	0.0079695	0.5203187	26.12043	14.913042	6.5829136	0.0050307
12	0.815375566	Forte	0.0083386	0.5927502	21.948595	7.4798826	8.6169769	0.0685195
12	0.814223414	Forte	0.0180176	0.6894356	20.480896	15.823568	8.9009377	0.1154833
12	0.808671488	Forte	0.006219	0.8905618	52.648931	48.765963	9.6848347	0.17626
12	0.807566509	Forte	0.0150662	0.8045262	43.524574	31.695953	8.4050806	0.0263057
12	0.80074411	Forte	0.0196257	0.8779377	24.55546	20.038236	1.9831816	0.0605961
12	0.789407942	Forte	0.0162059	0.8831884	53.895893	45.300557	4.1167505	0.0298178
12	0.782927614	Forte	0.007864	0.7063223	83.495854	18.515406	7.5101704	0.1203075

Continuação da Tabela 18

12	0.782779651	Forte	0.0191289	0.5586825	12.704208	5.5234111	5.247588	0.1796083
12	0.782527594	Forte	0.0113901	0.516877	69.83906	5.3943792	7.780456	0.1702458
12	0.781697813	Forte	0.0061128	0.8590275	93.601029	40.886865	7.3646402	0.1003902
12	0.780524681	Forte	0.0107261	0.9424185	51.644989	18.320035	4.4444973	0.1215274
12	0.778226081	Forte	0.0113635	0.5945913	24.358694	14.339053	0.5067437	0.1753156
12	0.776704054	Forte	0.0067062	0.9322639	108.94277	54.705131	4.892283	0.1814723
12	0.768402627	Forte	0.0094084	0.7180059	47.787046	30.440783	6.7366561	0.0614285
12	0.766845886	Forte	0.0055491	0.8415273	84.763072	34.73937	6.0004396	0.1913736
12	0.757285345	Forte	0.0186471	0.7962951	36.697522	8.9759678	5.3488969	0.1457699
12	0.756172832	Forte	0.0150195	0.9806088	51.527986	46.655627	1.8302301	0.0418424
12	0.755698035	Forte	0.0108812	0.3471241	20.373756	13.851063	8.6870417	0.1557218
12	0.754092443	Forte	0.0144893	0.9655494	32.430546	30.631428	0.8045245	0.1567508
12	0.752125258	Forte	0.0176804	0.6781751	26.950014	18.914739	8.2876534	0.1196866
12	0.75208085	Forte	0.0057029	0.5132938	23.67457	13.867021	3.434685	0.1389988
12	0.74845228	Forte	0.0200689	0.8845313	37.755116	26.235364	3.4055806	0.1847967
12	0.743771245	Forte	0.0149247	0.9897813	59.179036	54.796245	2.8728232	0.0031489
12	0.741862343	Forte	0.0080493	0.9029693	59.310316	16.619017	8.6436463	0.1301326
12	0.741742704	Forte	0.0055369	0.675715	38.776109	20.855347	6.9640422	0.139487
12	0.737658057	Forte	0.0043183	0.8034344	115.82611	21.031389	9.8332772	0.136168
12	0.735164551	Forte	0.0214414	0.8642608	41.522616	20.76301	9.5601153	0.0533118
12	0.734707774	Forte	0.0176105	0.9371543	28.603593	13.782668	1.1679751	0.1136832
12	0.733818467	Forte	0.0183284	0.5983424	48.619885	8.0158938	9.6567345	0.1174807
12	0.733289287	Forte	0.0132189	0.5491759	38.619322	15.390061	7.3390787	0.028409
12	0.729862623	Forte	0.0065223	0.9540597	83.322338	30.871361	9.7326785	0.0949176
12	0.722710827	Forte	0.0171693	0.8134252	56.04297	28.016215	7.6944415	0.0809366
12	0.722640074	Forte	0.013644	0.8884283	73.151882	44.08866	3.7165361	0.1055327
12	0.721841419	Forte	0.0172431	0.9674124	81.459541	58.568701	5.344458	0.137458
12	0.720393049	Forte	0.018617	0.7101905	28.524627	19.085293	3.0324219	0.0661642
12	0.719157022	Forte	0.0205691	0.5896424	16.299213	13.026222	8.5534797	0.1231192
12	0.717334471	Forte	0.011711	0.8918804	16.279015	12.560673	3.9119366	0.0289681
12	0.716794475	Forte	0.017144	0.7998711	81.746003	14.994132	8.9240354	0.0488814
12	0.716652916	Forte	0.007152	0.7565052	23.050123	12.587958	7.3192022	0.1285942
12	0.716250188	Forte	0.0177652	0.7474699	67.311726	11.908146	8.8234654	0.062806
12	0.714103433	Forte	0.0188884	0.8486419	66.634206	13.942248	7.3262361	0.0480847
12	0.70976118	Forte	0.0228169	0.659653	10.453736	7.3375688	9.1312953	0.1328485
12	0.709391266	Forte	0.0163188	0.9573581	30.253327	11.036538	0.8629347	0.1556901
12	0.699205879	Forte	0.0068224	0.6552252	49.246178	26.764026	6.2128008	0.0905922
12	0.698395359	Forte	0.0117836	0.9876546	105.17878	58.565127	0.2929068	0.0217337
12	0.696956273	Forte	0.0068148	0.5338209	27.160347	11.263338	0.882823	0.0085145
12	0.692949784	Forte	0.0080825	0.6870757	75.249218	22.791207	7.1444544	0.0420417
12	0.683961248	Forte	0.020574	0.9677919	36.909674	34.600127	3.9041745	0.0221149
12	0.683653812	Forte	0.0222456	0.787753	51.165106	11.032389	9.2220584	0.0238437
12	0.681347341	Forte	0.0100337	0.639524	40.387135	14.207719	1.554177	0.1203747
12	0.674957296	Forte	0.0104329	0.7547269	43.324686	42.608284	2.7787631	0.1552169

Continuação da Tabela 18

12	0.673070334	Forte	0.0186816	0.9606353	90.918835	47.42981	9.087008	0.0993059
12	0.670764582	Forte	0.017548	0.8657188	86.498009	14.574871	5.6830259	0.1127882
12	0.669866033	Forte	0.0152191	0.7106706	55.828078	17.772412	5.4717495	0.1827555
12	0.669282398	Forte	0.0117416	0.9616337	45.741255	12.153525	7.0355675	0.1279122
12	0.667532137	Forte	0.0038769	0.9042229	118.62892	21.458602	4.5616942	0.1964924
12	0.664148479	Forte	0.0161174	0.7872095	38.83813	28.248023	0.0171483	0.1185348
12	0.659525794	Forte	0.0042578	0.4940791	92.290039	8.1202296	8.6154214	0.1130688
12	0.648609117	Forte	0.0065986	0.4856661	33.636296	21.213795	8.5843309	0.084967
12	0.642335829	Forte	0.01945	0.9016535	66.489861	6.2944319	7.25026	0.0079081
12	0.640224097	Forte	0.0211247	0.9091642	58.591088	24.303688	1.5219708	0.1889627
12	0.635441745	Forte	0.0073347	0.4352128	38.460115	11.871938	3.4231867	0.1122128
12	0.634018515	Forte	0.018798	0.9743416	105.87261	33.176923	9.8657646	0.0194528
12	0.633667119	Forte	0.0251494	0.603794	12.190958	10.719962	0.4155766	0.1043083
12	0.628945211	Forte	0.0108634	0.8245723	87.953719	37.437604	7.3059754	0.0533979
12	0.628390894	Forte	0.02072	0.9571531	21.846175	21.094403	1.6612814	0.1455325
12	0.624464484	Forte	0.0202493	0.816896	81.231393	7.6935036	9.0210746	0.0911899
12	0.621166688	Forte	0.0112661	0.9065968	14.992204	7.1641655	5.2668452	0.1583124
12	0.615202462	Forte	0.0260937	0.9124747	38.470734	24.034502	2.798132	0.0057841
12	0.613213374	Forte	0.0147266	0.9859728	30.612753	12.832698	1.3639043	0.0388428
12	0.610401727	Forte	0.0241501	0.8760969	44.625777	11.119751	2.7213545	0.0351693
12	0.606931347	Forte	0.0228298	0.8219683	37.601951	32.592656	4.3543244	0.0186653
12	0.601908053	Forte	0.003938	0.969339	93.704018	42.93752	2.2973245	0.1273789
12	0.597155394	Forte	0.0224699	0.9413592	57.601503	16.181129	2.7320793	0.0554178
12	0.595701193	Forte	0.0222521	0.7078984	36.952716	12.301986	4.2152348	0.1703553
12	0.587913177	Forte	0.0129437	0.6483577	32.839435	30.162925	6.7927702	0.0327587
12	0.58771882	Forte	0.0188243	0.3483714	34.387676	8.0267529	8.068707	0.018413
12	0.58762723	Forte	0.0177673	0.876632	60.976085	55.875532	7.8691275	0.1000485
12	0.58093766	Forte	0.0142509	0.961547	14.775503	8.506575	9.2146542	0.1477286
12	0.568664005	Forte	0.0207188	0.771213	71.408852	10.878205	7.2364044	0.1903713
12	0.567949344	Forte	0.025079	0.6614192	35.608054	10.944032	7.1466532	0.0637998
12	0.566685714	Forte	0.0255767	0.7187411	37.796605	7.5041213	6.8781065	0.1107254
12	0.560382931	Forte	0.0272627	0.6065737	27.0407	7.2036688	9.8492097	0.1259491
12	0.559278974	Forte	0.0041133	0.3323122	30.630358	11.758577	4.1298792	0.1981861
12	0.552278326	Forte	0.0058624	0.6599572	98.32426	24.242079	9.8387298	0.1034721
12	0.551861855	Forte	0.0064982	0.8956065	56.597316	20.996393	7.7978835	0.040955
12	0.546725194	Forte	0.0272575	0.930872	46.893604	36.280773	6.3272445	0.0641693
12	0.542428085	Forte	0.0107934	0.5229295	87.797515	5.0206702	6.6912987	0.0495333
12	0.540304308	Forte	0.0089911	0.6078276	36.988789	28.337316	1.8296356	0.1972369
12	0.539476261	Forte	0.0261735	0.9631713	33.536842	25.772495	1.0679979	0.0926898
12	0.5268954	Forte	0.0061953	0.8339263	86.261092	34.853062	1.6860729	0.140074
12	0.525385137	Forte	0.0081168	0.5532181	41.23092	27.35669	6.7120105	0.1697219
12	0.517407377	Forte	0.0190832	0.9989384	37.68538	15.402242	3.3334496	0.1879877
12	0.516545529	Forte	0.0245433	0.5482073	17.767149	12.243444	2.7679923	0.1702201
12	0.513499493	Forte	0.0112382	0.4129826	51.263489	11.102043	6.1078974	0.066818

Continuação da Tabela 18

12	0.511304783	Forte	0.0182762	0.322609	19.892499	5.002659	1.5524092	0.1322959
12	0.506709507	Forte	0.0190738	0.4656053	33.922096	13.166472	8.4666528	0.156829
12	0.504483162	Forte	0.0236722	0.9528089	46.673938	11.20062	4.5401252	0.1748514
12	0.502723285	Forte	0.002942	0.8277468	101.72039	10.784104	4.3457103	0.0043098
12	0.50185143	Forte	0.0176131	0.1387167	32.719226	6.3989069	7.9785867	0.1620435