



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
URBANA E AMBIENTAL
- MESTRADO -

**OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO EM
REGIÕES SEMIÁRIDAS**

por

Petley de Medeiros Arruda

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para
obtenção do grau de Mestre*

A779o

Arruda, Petley de Medeiros.

Otimização de um modelo hidrossedimentológico em regiões semiáridas / Petley de Medeiros Arruda.-- João Pessoa, 2011.

111f.

Orientador: Celso Augusto Guimarães Santos

Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT

1. Engenharia Urbana e Ambiental. 2. Degradação da água.
3. Modelagem computacional. 4. Semiárido. 5. Otimização.
6. Modelo hidrossedimentológico.

UFPB/BC

CDU: 62:711(043)



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
URBANA E AMBIENTAL
- MESTRADO -

**OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO EM
REGIÕES SEMIÁRIDAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre.

Petley de Medeiros Arruda

ORIENTADOR: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos

PETLEY DE MEDEIROS ARRUDA

**OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO HIDROSEDIMENTOLÓGICO EM
REGIÕES SEMIÁRIDAS**

APROVADA EM: 24 de novembro de 2011 .

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. CELSO AUGUSTO GUIMARÃES SANTOS – UFPB
Orientador


Prof. Dr. EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA - UFPB
Examinador Interno


Prof. Dr. CAMILO ALLYSON SIMÕES DE FARIAS – UFCG
Examinador Externo

À minha família

AGRADECIMENTOS

À Deus;

À minha família pelo apoio, compreensão e pela eterna contribuição em minha educação;

Ao meu orientador Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos pela sugestão do tema de pesquisa e pelo apoio durante este período de trabalho;

À todo corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, principalmente aos professores com os quais tive a oportunidade de adquirir novos conhecimentos;

Aos colegas de curso, Flaviana Kalina, Victor Hugo, José Yure, Jakeliny Costa, Emerson Lima, Lucy Correia, Allison Araújo, Renato Porto e Gerald Silva, pelo companheirismo durante nossa jornada em comum;

Aos Geógrafos José Yure e Victor Hugo, pela amizade, apoio, confiança e pelo compartilhamento de conhecimentos;

Às colegas Isabelle Yruska e Paula Karenina, pelo apoio acadêmico, e porque não dizer, profissional;

À Marluce e Rosário, secretárias do PPGEUA, por fazer as coisas andarem e desatar os nós da burocracia;

Aos avaliadores, Eduardo Viana e Camilo Allyson Simões, pelas contribuições para a melhoria deste trabalho;

Aos professores Hamilcar Filgueira e Gustavo Lima que me acolheram durante meus compromissos com o Programa REUNI;

Ao Programa de Apoio a Planos de Reestruturação e Expansão das Universidades Federais (REUNI), pelo apoio financeiro durante a vigência do curso;

Por fim, a sociedade brasileira, que de uma forma ou de outra contribuiu para a realização deste trabalho.

“Não existem erros, apenas lições. O crescimento é um processo de tentativa e erro: experimentação. As experiências que não deram certo fazem parte do processo, assim como as bem sucedidas.”

(Albert Einstein)

RESUMO

A degradação qualitativa e quantitativa da água está entre os grandes problemas ambientais enfrentados pela sociedade atual. Gestores ambientais utilizam a modelagem computacional para simular e melhor compreender os fenômenos naturais que ocorrem nas bacias hidrográficas, auxiliando no planejamento de uso e preservação dos recursos naturais. Entre vários modelos existentes, o WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*) foi desenvolvido com a finalidade de simular a resposta hidrológica de pequenas bacias hidrológicas. Considerando estes e outros fatos, o objetivo do presente estudo é avaliar o desempenho de dois algoritmos de otimização na calibração do modelo WESP para simulação de processos hidrossedimentológicos no semiárido paraibano. Esta calibração foi realizada utilizando o método de otimização RPS (*Repulsive Particle Swarm*) e o método de otimização DE (*Differential Evolution*), na expectativa de encontrar o melhor conjunto de parâmetros usados na modelagem. Posteriormente, foi realizada a comparação entre as lâminas escoadas observadas e calculadas, e também a comparação dos resultados da produção de sedimentos gerados por estes escoamentos com os valores da produção observada. Os resultados mostram que a rotina de calibração automática RPS obteve um conjunto de parâmetros mais satisfatório, além de convergir com uma quantidade reduzida de interações em comparação com o método de otimização DE.

PALAVRAS-CHAVES: semiárido; modelo hidrossedimentológico; otimização.

ABSTRACT

The degradation of water quality and quantity are among the major environmental problems, which the society is facing today. Environmental managers use computer modeling to simulate and to better understand the natural phenomena that occur in watersheds, in order to assist the planning of the use and preservation of natural resources. Among several existing models, there is the WESP model (*Watershed Erosion Simulation Program*), which was developed in order to simulate the hydrological response of small basins. Considering these and other facts, the aim of this study is to evaluate the performance of two optimization algorithms to calibrate the WESP model, in order to simulate the runoff-erosion processes within the semiarid area of Paraíba state. This calibration was performed using the optimization methods RPS (*Repulsive Particle Swarm*) and DE (*Differential Evolution*), expecting to find the best set of parameters to be used in the modeling. Subsequently, it was performed a comparison between the observed and calculated runoff, and between the observed and calculated sediment yield. The results show that the automatic calibration routine RPS obtained a more satisfactory set of parameters, and converged with a reduced number of interactions, when compared to the DE optimization method.

Keywords: semiarid; runoff-erosion model; optimization.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo Geral	17
1.2 Objetivos Específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Erosão	18
2.2 Bacia Hidrográfica	19
2.3 Modelagem	20
2.3.1 Modelagem Computacional	20
2.3.2 Modelagem Hidrológica	23
2.3.3 Modelagem Hidrossedimentológica	24
2.4 Calibração de Modelos Matemáticos	25
2.4.1 Calibração Manual	25
2.4.2 Calibração Automática	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Modelo WESP	28
3.1.1 Equações do Modelo WESP	29
3.1.1.1 Infiltração	29
3.1.1.2 Escoamento Superficial	31
3.1.1.2.1 Fluxo no Plano	31
3.1.1.2.2 Fluxo no Canal	33
3.1.1.3 Erosão e Deposição	34
3.1.1.3.1 Erosão nos planos	34
3.1.1.3.2 Erosão nos canais	35
3.1.2 Sistema WESP	36
3.1.2.1 Parâmetros de entrada do modelo	37

3.1.2.2 Utilitário para cálculo do intervalo de tempo de simulação ..	39
3.1.2.3 Utilitário para modificação do arquivo de parâmetro	40
3.1.2.4 Utilitário WESP	40
3.1.3 Sequência computacional.....	41
3.1.4 Estimativa dos parâmetros	41
3.2 Métodos de Otimização por Calibração Automática	42
3.2.1 <i>Repulsive Particle Swarm</i>	42
3.2.1.1 <i>Particle Swarm Optimization</i>	42
3.2.1.1.2 Algoritmo PSO	43
3.2.2 <i>Differential Evolution</i>	44
3.2.2.1 Operadores do <i>Differential Evolution</i>	45
3.2.2.1.1 Operador de Mutação.....	45
3.2.2.1.2 Operador de Cruzamento	47
3.2.2.1.3 Operador de Seleção	49
3.2.2.2 Estratégias do <i>Differential Evolution</i>	50
3.3 Área de Estudo	52
3.3.1 Bacia Experimental de Sumé	53
3.3.1.1 Instalações na Bacia Experimental de Sumé.....	54
3.3.1.2 Microbacias	55
3.3.1.3 Dados Disponíveis	57
3.3.1.4 Discretização da Microbacia da Bacia Experimental Sumé ..	57
4 RESULTADOS	62
4.1 Resultados da calibração com o método de otimização RPS	65
4.2 Resultados da calibração com o método de otimização DE	69
5 CONCLUSÃO.....	82
6 REFERÊNCIAS	84
ANEXOS.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo para gerar o vetor doador $V^{(q+1)}$ de uma função bidimensional.....	46
Figura 2 - Ilustração do processo de <i>cruzamento binomial</i> $\alpha = 2$, $\beta = 4$ e $\gamma = N_p$	47
Figura 3 - Ilustração do processo de <i>cruzamento exponencial</i> $\alpha = 2$, $\beta = 4$ e $\gamma = N_p$	48
Figura 4 - Localização da Bacia Experimental de Sumé.....	53
Figura 5 - Croqui de localização das instalações da Bacia Experimental de Sumé.....	55
Figura 6 - Levantamento topográfico da microbacia 03	56
Figura 7 - Discretização n° 1: 4 elementos (3 planos e 1 canais).....	58
Figura 8 - Discretização n° 2: 10 elementos (7 planos e 3 canais)	59
Figura 9 - Discretização n° 3: 23 elementos (16 planos e 7 canais)	60
Figura 10 - Relação entre os valores da lâmina de escoamento calculado e os valores da lâmina de escoamento observado.....	62
Figura 11 - Relação entre os valores de produção de sedimento observada com os valores calculados para a discretização da bacia com 4 elementos e utilizando o algoritmo RPS.....	66
Figura 12 - Relação entre os valores da produção de sedimento observada com os valores calculados para discretização da microbacia com 10 elementos e utilizando o algoritmo RPS.....	67
Figura 13 - Relação entre os valores da produção de sedimento observada com os valores calculados para discretização da microbacia com 23 elementos e utilizando o algoritmo RPS.....	68
Figura 14 - Relação dos eventos que tiveram seus valores calculados subestimados, ocorrido na discretização da bacia com 23 elementos e utilizando o algoritmo RPS	69
Figura 15 - Relação entre os valores da produção de sedimento observada com os valores calculados para a discretização da microbacia com 4 elementos e WESP modelado com o algoritmo DE.....	70
Figura 16 - Relação entre os valores da produção de sedimento observada com os valores calculados para a discretização da microbacia com 10 elementos e WESP modelado com o algoritmo DE.....	71

Figura 17 - Relação entre os valores da produção de sedimento observada com os valores calculados para a discretização da microbacia com 23 elementos e WESP modelado com o algoritmo DE.....	72
Figura 18 - Comparação entre os valores menores ou iguais a 10 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da bacia com 4 elementos).....	73
Figura 19 - Comparação entre os valores maiores que 10 kg/ha até 1.000 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da microbacia com 4 elementos).....	74
Figura 20 - Comparação entre os valores maiores que 1.000 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da microbacia com 4 elementos).....	75
Figura 21 - Comparação entre os valores menores ou iguais a 10 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da bacia com 10 elementos).....	76
Figura 22 - Comparação entre os valores maiores que 10 kg/ha até 1.000 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da microbacia com 10 elementos).....	77
Figura 23 - Comparação entre os valores maiores que 1.000 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da microbacia com 10 elementos).....	78
Figura 24 - Comparação entre os valores menores ou iguais a 10 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da bacia com 23 elementos).....	79
Figura 25 - Comparação entre os valores maiores que 10 kg/ha até 1.000 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da microbacia com 23 elementos).....	80
Figura 26 - Comparação entre os valores maiores que 1.000 kg/ha da produção de sedimento observada com os valores da produção calculada com os algoritmos RPS e DE (discretização da microbacia com 23 elementos).....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Representação das estratégias da Evolução Diferencial	50
Tabela 2 - Características das microbacias	56
Tabela 3 - Geometria da microbacia ³ (4 elementos)	60
Tabela 4 - Geometria da microbacia ³ (10 elementos)	61
Tabela 5 - Geometria da microbacia ³ (23 elementos)	61
Tabela 6 - Valores do parâmetro N_s encontrado para cada evento, levando em consideração as diferentes discretizações da microbacia	63
Tabela 7 - Valores máximo, médio e mínimo dos parâmetros a , K_R e K_I	65

1 INTRODUÇÃO

Os recursos naturais são de grande valor para a humanidade, e os seus diversos usos fazem parte do constante desenvolvimento da vida humana. Nas atividades rurais e no meio urbano, existe dependência de algum recurso disponível na natureza. Dentre eles, a água talvez seja o recurso mais utilizado para consumo humano ou para atividades produtivas. Perante tal importância, deve-se ter uma atenção especial para os recursos hídricos.

É fato histórico que as ocupações que dão origem às cidades geralmente ocorreram nas proximidades de um rio ou reservatório natural de água. A retirada da vegetação destas áreas faz parte do processo de ocupação, gerando desequilíbrios de grandes proporções. O desmatamento provoca a redução do volume de água infiltrada no solo, aumentando o volume escoado e, por conseguinte, aumentando a carga de sedimento que é levada para rios e reservatórios devido a intensificação da erosão hídrica.

A erosão do solo é considerada um dos maiores problemas ambientais, pois causa degradação da qualidade da água para abastecimento público, assoreamento de rios e lagos, e conseqüentemente inundações, e também reduz a capacidade e a vida útil dos reservatórios de abastecimento de água e geração de energia (Lino, 2009). A ação erosiva da água sobre o solo de uma bacia hidrográfica é a origem de grandes quantidades de sedimentos que são transportados pelos cursos de água, provocando a degradação dos recursos hídricos e prejuízos significativos à população e ao meio-ambiente (Bicalho, 2006).

Questões relacionadas à erosão são cada vez mais debatidas, especialmente em regiões semi-áridas de países como o Brasil, onde grande parte da população depende de atividades econômicas ligadas ao uso do solo (Santos *et al.*, 2007). Para que o uso sustentável destes recursos seja posto em prática é necessária a sua preservação.

Compreender o funcionamento dos fenômenos envolvidos nesses processos é fundamental para que sejam desenvolvidas medidas de mitigação.

Na busca de melhor entender como os processos de erosão e escoamento ocorrem, e também quais as modificações geradas no meio ambiente, Santos (2008) sugere duas alternativas que têm sido bastante utilizadas: a primeira é uma análise das respostas hidrológicas em bacias representativas e experimentais; e a segunda é o uso de modelos que representem os processos físicos com base em dados observados.

Portanto, existe a necessidade de se desenvolver programas de gestão em nível de bacias hidrográficas. Desta forma, as bacias hidrográficas surgem como unidades fundamentais para o planejamento do uso e preservação dos recursos naturais.

Bacias representativas são definidas como aquelas que possuem características semelhantes, do ponto de vista hidrológico, de certa região. E as bacias experimentais definem-se como aquelas onde o solo e a vegetação são relativamente homogêneos e as características físicas uniformes (Fragoso, 2008).

Pesquisas com modelos de simulação desenvolvidas em bacias representativas são muito importantes devido ao fato que os seus parâmetros podem, a priori, serem considerados válidos para as regiões das quais estas bacias são representativas (Lopes, 2003).

O conhecimento da quantidade de escoamento superficial gerado e das perdas de solo associada é extremamente importante para qualquer planejamento racional de bacias hidrográficas (Srinivasan *et al.*, 1999).

Os modelos podem auxiliar os tomadores de decisão a lidar com esses problemas, fornecendo informações sistemáticas e consistentes (Yang *et al.*, 2007). Para tanto, um modelo que reproduza o comportamento hidrológico e sedimentológico destas bacias se constitui numa importante ferramenta para a previsão da lâmina escoada e do sedimento erodido durante um evento de precipitação (Aragão, 2000).

Modelos hidrossedimentológicos, que possam considerar os efeitos das mudanças de uso do solo, vêm sendo utilizados por pesquisadores em seus estudos. Os modelos de base física, principalmente aqueles que simulam os processos da erosão pela chuva, são ferramentas muito úteis para os tomadores de decisão e órgãos gestores, visto que, uma vez parametrizados, poderão ser utilizados para a previsão de

escoamento superficial e produção de sedimentos devido a um evento de precipitação, o que auxiliaria na gestão de corpos de água (Santos, 2008).

Com o advento da capacidade de processamento dos computadores, foram abertos precedentes ao desenvolvimento de modelos computacionais que permitam simular várias situações práticas simultaneamente, úteis em estudos de estratégias de manejo do solo e preservação ambiental (Sousa, 2007).

O modelo WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*) foi desenvolvido com a finalidade de simular a resposta hidrológica de pequenas bacias hidrológicas, sendo capaz de simular o escoamento e a erosão do solo sujeita a diferentes manejos de culturas e cobertura vegetal. Este modelo tem sido bastante utilizado em estudos anteriores com dados da Bacia Experimental de Sumé, por ser um modelo baseado nos processos físicos, distribuído e eventual (Aragão, 2000).

Apesar de vários pesquisadores terem aplicado o modelo WESP à Bacia Experimental de Sumé e terem obtido bons resultados (Galvão, 1990; Santos, 1997; Pereira, 1997; Aragão, 2000; Lopes, 2003; Davi, 2004; Paiva, 2008), poucos foram os trabalhos que utilizaram ferramentas de otimização na calibragem deste modelo.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho de dois algoritmos de otimização na calibração do modelo WESP para simular os processos hidrossedimentológicos de uma microbacia no semiárido paraibano.

1.2 Objetivos Específicos

- Testar e avaliar os algoritmos de otimização RPS e DE no processo de calibração dos parâmetros do modelo WESP.
- Sugerir uma técnica de otimização que seja mais eficiente na calibração automática dos parâmetros exigidos pelo modelo WESP.
- Verificar a influência da discretização da microbacia neste processo de otimização e modelagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Erosão

Um problema que muito tem contribuído para a degradação ambiental é a erosão, processo que corresponde ao desprendimento, transporte e deposição de partículas do solo. Este processo é resultado de uma combinação de fatores que são dependentes e estão interligados entre si e apresentando grande variabilidade espacial e temporal, tornando-se um fenômeno difícil de equacionar e quantificar.

Muitos estudos são desenvolvidos na busca de compreender melhor este processo. Entretanto, muitos dos estudos foram direcionados apenas com a preocupação dos danos causados pelo processo erosivo à produtividade agrícola. Recentemente estes estudos tiveram sua atenção especialmente voltada aos problemas ambientais de uma forma mais ampla (Silva *et al.*, 2010).

Os danos causados pelos sedimentos oriundos do processo erosivo têm afetado os recursos hídricos de forma qualitativa e quantitativa. Nesse sentido, é importante o seu conhecimento e sua quantificação para proceder a um melhor planejamento e gerenciamento dos recursos em uma bacia hidrográfica (Pereira, 2010). Estes sedimentos gerados numa bacia hidrográfica dependem de características naturais, como chuvas, tipos de solo, topografia, densidade de drenagem, cobertura vegetal e área de drenagem, e ainda de influências antrópicas, como o uso e ocupação do solo, uso da água, alterações no curso de água, entre outros (LIMA *et al.*, 2007).

Destaca-se na dinâmica destes sedimentos o escoamento superficial de água em uma bacia hidrográfica. Pode-se dizer que o escoamento é o principal agente responsável pelos processos de erosão dos solos. A erosão hídrica, de uma forma geral, é considerada um dos principais processos responsáveis pela degradação física do solo

(Santos *et al.*, 2007). Desta forma, Lino (2009) defende a importância de se estudar o processo hidrológico e o escoamento de água com o objetivo de entender a dinâmica de sedimentos e desenvolver medidas de mitigação para o processo erosivo que ocorra em qualquer bacia hidrográfica.

A cobertura vegetal é outro fator que merece destaque dentre os fatores que influenciam a erosão, e segundo Seganfredo *et al.* (1997), *apud* Aguiar *et al.* (2006), é o de maior influência sobre as perdas de solo, pois evita o impacto direto das gotas de chuva sobre a superfície, dissipando sua energia e com isso impedindo que ocorra desagregação do solo.

2.2 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica é definida como a área territorial delimitada topograficamente por divisores de águas, onde a água precipitada em seu perímetro resultará o escoamento, tendo um único ponto de saída (Villela & Mattos, 1975).

De acordo com a Lei 9.433/1997 (Política Nacional de Recursos Hídricos), a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Um dos princípios básicos dessa lei referente aos recursos hídricos é a gestão integrada dos mesmos, adotando-se a bacia como a unidade de planejamento (Santos, 2010).

A importância de se adotar a bacia hidrográfica como unidade de estudo e planejamento é devido ao fato desta ser uma unidade geográfica onde os recursos naturais se integram, de certa forma constituindo uma área de fácil reconhecimento e caracterização (Lino, 2009).

Pode-se considerar a bacia hidrográfica como um sistema, através do qual há uma variável de entrada, como por exemplo, a precipitação, que é transformada em uma variável de saída (a vazão). Mediante tal fato, uma das maneiras de representar esse processo é através da modelagem (Bravo *et al.*, 2007).

Segundo Pereira (2010), nas últimas décadas a modelagem tem sido intensamente utilizada em estudos de avaliação do comportamento e impactos das mudanças do uso do solo e suas influências nos processos de escoamento superficial, desprendimento, transporte e deposição de sedimentos em bacias hidrográficas. Hoje, a

bacia hidrográfica é o objeto de estudo da maioria dos modelos hidrológicos (Santos, 2010).

Em decorrência deste fato, os modelos hidrológicos estão sendo cada vez mais requisitados pelos hidrólogos e gestores ambientais como uma ferramenta para entender e gerenciar as atividades naturais e humanas que afetam os sistemas das bacias hidrográficas (Zhang *et al.*, 2008).

2.3 Modelagem

O uso da modelagem tem se mostrado uma importante ferramenta nos estudos ambientais, podendo verificar o comportamento dos sistemas naturais e prever os impactos resultantes de alterações que esses sistemas possam vir a apresentar (Lubitz, 2009). Christofolletti (1999) relata que os modelos matemáticos vêm sendo aplicados com eficiência, tanto no planejamento conservacionista, quanto na avaliação e controle do processo erosivo de bacias hidrográficas.

2.3.1 Modelagem Computacional

No desenvolvimento de muitos projetos, os pesquisadores e tomadores de decisão encontram dificuldades técnicas decorrentes de uma baixa disponibilidade de dados em suas pesquisas, e em alguns casos, pode ocorrer à inexistência destes dados, comprometendo os estudos. Essa dificuldade também é uma realidade na análise dos fenômenos climáticos e hídricos.

Buscando superar tais barreiras, eventualmente utiliza-se de modelos computacionais como instrumentos para gerar sequências artificiais de dados a fim de serem aplicadas na racionalização das análises em pesquisas e tomadas de decisão como, por exemplo, no controle das cheias, construção de barragens, sistemas de abastecimento de águas e recursos hídricos (Christofolletti, 1999).

De uma forma mais ampla, os modelos podem ser compreendidos como sendo uma representação simplificada da realidade. Christofolletti (1999) considera adequada a definição que foi apresentada por Haggett (1967) e Chorley (1975), afirmando que “os

modelos são estruturas simplificadas da realidade que supostamente apresentam, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade”.

Tucci (2005) define modelo como sendo a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar respostas para diferentes entradas. Sinteticamente, o modelo é uma representação do sistema, onde os processos que ocorrem no mesmo são representados de forma matemática, física ou analógica, de modo a atingir um objetivo, podendo ser classificados como:

Contínuos e discretos – Os modelos contínuos são caracterizados por fenômenos contínuos no tempo, e os discretos se dão em intervalos. Os sistemas hidrológicos são contínuos e são representados por modelos discretos.

Concentrado e distribuído – Um modelo distribuído apresenta suas variáveis variando no espaço e no tempo, já um modelo concentrado não leva em conta a variabilidade espacial.

Estocástico e determinístico – a principal diferença entre estocástico e determinístico é o conceito de probabilidade. Se na formulação do modelo utiliza-se probabilidades o modelo é dito estocástico, caso contrário é determinístico.

Conceitual e empírico – quando um modelo considera os processos físicos é dito conceitual. Os modelos empíricos são aqueles que ajustam os valores simulados aos observados não considerando os processos físicos.

Embora os procedimentos de aplicação para todos os modelos diferem devido às variações específicas da física, química e sistemas biológicos de cada tentativa de representação, eles têm muitos passos em comum. A modelagem, ou a aplicação do modelo, é composta de três fases (Donigian, 2002):

Inicia-se com a fase que inclui a coleta de dados, preparação de entrada do modelo, e avaliação de parâmetros, ou seja, todos os passos necessários para configurar um modelo e se preparar para a execução do modelo.

A segunda fase consiste na calibração. Esta é a fase em que o modelo é avaliado para determinar se é de razoável representação, para fins do estudo.

A finalização do estudo de modelagem inclui a utilização do modelo, como uma ferramenta de apoio à decisão para efeitos de gestão e de regulamentação. Refsgaard (2007) complementa esta fase realçando a possibilidade de incluir simulações de cenários. A possibilidade de elaboração de cenários, segundo Xavier (2009), trata-se de uma das mais importantes vantagens da utilização de modelos matemáticos, por permitir a alteração das configurações dos parâmetros de entrada do modelo resultando na obtenção de condições virtuais, que leva a uma visualização antecipada de conseqüências futuras, causadas por determinados fatores hipoteticamente inseridos. Nesta fase, os gestores têm um papel dominante, pois com base nos resultados da modelagem será feito o processo de planejamento.

O objetivo da modelagem é compreender melhor os sistemas e prever situações futuras, possibilitando direcionar as ações de decisão (Machado, 2002). De acordo com Uzeika (2009), pode-se dizer que a modelagem é uma forma prática, rápida e barata de simular cenários futuros dos recursos naturais, possibilitando a proposição de soluções para contornar uma situação subsequente indesejada (Pereira, 2010).

Embora amplamente usados e mencionados, os modelos estão longe de se constituir em panacéia universal e devem ser usados considerando as suas limitações, procurando-se discernir as maneiras mais adequadas para superá-las. Talvez o maior problema com os modelos seja a avaliação da sua acuidade ou ajustagem das suas previsões. Um segundo problema está relacionado com o estabelecimento de valores aos parâmetros do modelo e na identificação com os parâmetros fisicamente mensuráveis no mundo real (Christofolletti, 1999).

Algumas desvantagens podem ser observadas na aplicação de modelos de simulação, entre elas está a dificuldade de encontrar dados disponíveis e representativos para o desenvolvimento e calibração do modelo; ou então, a necessidade do emprego de relações simplificadas entre as variáveis intervenientes, devido à complexidade dos fenômenos representados ou por limitações computacionais (Pereira, 2010).

Portanto, é obvio que os modelos nunca irão substituir as observações de campo e os experimentos de laboratórios, mas podem aumentar em muito a sua eficiência por meio de diversas maneiras (Christofolletti, 1999). Está evidente que os estudos de modelagem geralmente não abordam todo o planejamento e processo de gestão, mas trata-se de uma ferramenta de apoio ao processo. Modelagem é aplicada como uma

resposta para um problema identificado, geralmente não a única resposta, e se destaca pelo poder de fornecer suporte para as decisões dos gestores.

Quando se trata de gestão dos recursos hídricos, os fenômenos do ciclo hidrológico são extremamente difíceis de serem representados; neste caso, a utilização de modelos computacionais se torna imprescindível na análise quantitativa e qualitativa desses fenômenos. Esses modelos são extremamente úteis, pois permitem, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (Santos, 2010).

2.3.2 Modelagem Hidrológica

Os complexos processos do ciclo hidrológico podem ser representados por meio da modelagem hidrológica e existe um grande número de modelos disponíveis, com variados objetivos (Paiva *et al.*, 2006). Conforme menciona Tucci (2005), a ciência desenvolveu modelos hidrológicos como ferramentas para melhorar o entendimento do comportamento do sistema em uma bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas.

Esses modelos são baseados em equações matemáticas que descrevem, de forma simplificada, o comportamento hidrológico da bacia (Bravo *et al.*, 2007). A modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico, e consequentemente, sobre todos os processos físicos que nele ocorrem. Todos esses processos são representados através de métodos matemáticos (Santos, 2009).

A utilização desses modelos é particularmente importante devido a escassez de dados hidrológicos suficientes para o desenvolvimento destes estudos. Portanto, estes modelos são essenciais para a análise e simulação da hidrologia numa bacia hidrográfica, atuando como uma ferramenta auxiliar na solução de problemas de planejamento e no processo de tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos (Santos, 2010).

2.3.3 Modelagem Hidrossedimentológica

Os processos hidrossedimentológicos são resultados da interação entre os processos hidrológicos e sedimentológicos. O manejo inadequado do solo pode acentuar tais processos, com destaque para a água, que é um dos principais agentes causadores do desprendimento de partículas de rochas e solos que irão contribuir para a produção de sedimentos da bacia, aumentando a quantidade de sedimentos acumulados no seu exutório e gerando problemas sociais, econômicos e ambientais, tal como, assoreamento de rios ou reservatórios d'água (Malutta, 2010; Lopes, 2008).

A aplicação de um modelo hidrossedimentológico pode permitir a realização de simulações com diferentes cenários de uso em uma bacia hidrográfica, podendo assim estabelecer uma importante contribuição para o planejamento da mesma pelo respectivo comitê de bacia, onde alternativas de uso poderão ser simuladas e avaliadas e, dessa forma, determinar previamente medidas para a preservação da mesma (Pereira, 2010).

Para Santos (2009), modelos hidrossedimentológicos que possam considerar os efeitos das mudanças de uso do solo vêm sendo cada vez mais utilizados por pesquisadores em seus estudos. Estes modelos, com destaque para os que simulam os processos da erosão pela chuva, são ferramentas muito úteis para os tomadores de decisão e gestores ambientais.

Nos últimos anos, o número de estudos hidrossedimentológicos desenvolvidos no Brasil aumentou consideravelmente devido ao fato da relevância dada a esse tema por diversos pesquisadores, no país e no exterior (Silva & Santos, 2008). Há destaque para os estudos em regiões onde o monitoramento hidrossedimentológico é precário, ou mesmo inexistente, pois a utilização destes modelos proporciona estimativas da geração do escoamento superficial e da perda do solo (Neto & Srinivasan, 2011).

Existe uma diversidade de modelos hidrológicos que simulam a hidrologia e os processos erosivos. Christofolletti (1999) cita alguns destes modelos, por exemplo, o CREAMS, ANSWERS, AGNPS, KINEROS, EUROSEM, WEPP e LISEM. Pereira (2010) também apresenta uma vasta lista com alguns modelos hidrossedimentológicos utilizados para processo de erosão em bacias hidrográficas, são eles, USLE, ANSWERS, EPIC, AGNPS, CREAMS, WESP, GLEAMS, RUSLE, SWAT, MIKE -

SHE, CHDM, KINEROS2, EROSEM, EROSION3D, LISEN, TOP MODEL, SLURP, WEPP e IMPIERO.

2.4 Calibração de Modelos Matemáticos

Após a implementação do modelo, pode-se dar início a fase de calibração. Nesta fase, a calibragem do modelo consiste em estabelecer parâmetros para as entradas e condições internas do sistema, a fim de se verificar a adequação das respostas (Christofoletti, 1999).

A calibração pode ser definida como um procedimento de ajuste dos valores dos parâmetros de um modelo, onde se busca reproduzir a resposta da realidade dentro da faixa de precisão especificada nos critérios de desempenho (Refsgaard, 2007), um passo necessário na aplicação de qualquer modelo. Para a maioria dos modelos, a calibração é um procedimento iterativo de avaliação de parâmetros, como resultado da comparação entre os valores simulados e observados de interesse dos estudos (Donigian, 2002; Bravo *et al.*, 2009).

Para Machado (2002), a calibração de um modelo matemático é a forma de diminuir as incertezas inerentes a uma representação simplificada de um sistema real. Muitos modelos necessitam da calibração para que reproduzam o fenômeno modelado o mais próximo possível da realidade (Santos, 2009). Logo, o objetivo da calibração é encontrar os valores de alguns parâmetros do modelo, que permitam uma boa representação do sistema, que é encontrado quando os valores calculados pelo modelo reproduzem, com boa precisão, os valores observados.

2.4.1 Calibração Manual

Em sua forma mais simplificada, a calibragem teve início sendo realizada manualmente, por tentativas e erros, sendo um processo iterativo, onde o usuário altera os valores dos parâmetros do modelo a cada tentativa, comparando visualmente os resultados obtidos com os valores observados em campo, com o objetivo de verificar se conseguiu uma melhor representação do sistema (Vrugt *et al.*, 2003; Bravo *et al.*, 2007).

Esta abordagem geralmente requer um alto grau de conhecimento especializado do modelo e do sistema, e pode ser altamente eficaz quando realizado por modeladores experientes (MacLean, 2009; Madsen *et al.*, 2002). Nesse processo, o usuário é quem decide se o resultado encontrado é satisfatório, na comparação entre os valores calculados e observados. Uma das grandes vantagens desse procedimento é permitir que o usuário agregue ao processo sua experiência e conhecimento sobre o modelo (Bravo *et al.*, 2009). Entretanto, o processo de calibração manual utiliza critérios subjetivos e, dessa forma, diferentes usuários do modelo podem obter um conjunto de parâmetros completamente diferentes para um mesmo estudo (Bravo *et al.*, 2007).

Manualmente, a calibração se torna uma tarefa muito tediosa (Madsen *et al.*, 2002), podendo se tornar um processo muito lento e repetitivo, especialmente quando o modelo utilizado tem um grande número de parâmetros e quando o usuário for inexperiente (Collischonn & Tucci, 2003). Outra dificuldade que o usuário pode encontrar está em deduzir a lógica pela qual os parâmetros devem ser ajustados, na busca para melhorar sua representação (Bravo *et al.*, 2009).

Hoje em dia, a calibração manual é muitas vezes substituída ou complementada por procedimentos automáticos, que buscam superar os problemas em prol de um desenvolvimento mais eficaz e eficiente dos procedimentos de calibração (Blasone *et al.*, 2007). A calibração manual costumava ser uma prática comum para a calibração de modelos em décadas passadas, mas com o desenvolvimento de recursos computacionais e da disponibilidade de algoritmos de otimização, fez deste processo humano-modelo intensivo e interativo se tornar obsoleto (Kamali, 2009).

2.4.2 Calibração Automática

Atualmente, devido ao nível de complexidade dos modelos, a calibração manual está sendo menos utilizada, seja pela subjetividade existente ou pela razão de seu sucesso ficar dependendo da experiência do modelador e de seu conhecimento no sistema a ser modelado (Muleta, 2005). Com o objetivo de tornar mais rápido e eficiente o processo de calibração foram desenvolvidos algoritmos de otimização que se baseiam na utilização intensiva de computadores (Bravo *et al.*, 2007).

A calibração automática envolve o uso de um algoritmo de busca para determinar o melhor ajuste dos parâmetros, oferecendo uma série de vantagens sobre a abordagem manual. A forma automatizada da calibração é mais rápida, menos subjetiva, e uma vez feita a extensa pesquisa das possibilidades de parâmetros existentes, é altamente provável que os resultados sejam melhores do que aqueles que poderiam ser obtidos manualmente (Muleta, 2005; Blasone *et al.*, 2007).

Os procedimentos de calibração automática podem ser classificados como estratégias locais ou de busca global, dependendo do padrão de evolução das soluções, ou seja, conjuntos de parâmetros. Métodos locais envolvem a estimativa de um conjunto de parâmetros únicos, usando regras determinísticas e apenas as informações sobre o valor da função objetivo. Métodos globais envolvem um conjunto maior de soluções usando tanto regras determinísticas como estocásticas (Vrugt *et al.*, 2003).

Atualmente, um grande número de técnicas de otimização encontram-se disponíveis e, apesar disso, sua aplicação é limitada por restrições computacionais. Elas também têm sido utilizados em vários estudos comparativos para investigar o desempenho de diferentes técnicas de calibração automática, principalmente os métodos globais Vrugt *et al.*, (2003) comparam os resultados obtidos pela aplicação de dois diferentes algoritmos de calibração automática para modelos hidrológicos, e cita outros trabalhos que também realizaram comparações semelhantes, como Gan & Biftu (1996); Cooper *et al.*, (1997); Kuczera (1997); Franchini *et al.*, (1998), Thyer *et al.*, (1999) e Madsen *et al.*, (2002).

Madsen *et al.* (2002) apresentou uma comparação com três diferentes métodos automatizados para a calibração de modelo chuva-vazão e também relata em seu estudo a ocorrência de um grande número de trabalhos que têm sido realizados comparando diferentes algoritmos para a calibração automática de modelos *chuva-vazão*.

Zhang *et al.* (2008) também mencionam os trabalhos citados por Madsen (2002) e acrescentam em seu relato a pesquisa desenvolvida por Chen *et al* (2005) que compararam o desempenho do *Tank Model* com dois métodos de calibração automática diferentes. Estes estudos vêm sendo conduzidos para avaliar o desempenho de diferentes algoritmos em diversas áreas de conhecimento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico são apresentados os materiais e métodos que foram utilizados no estudo. Em síntese, é apresentada uma descrição do modelo hidrossedimentológico e das técnicas de otimização utilizadas para a calibração automática do modelo.

O modelo escolhido a ser aplicado neste trabalho foi o modelo WESP, pois o mesmo foi desenvolvido para simular a resposta hidrossedimentológica de pequenas bacias e já foi calibrado com sucesso para uma região semiárida nordestina (Santos *et al.*, 2000).

3.1 Modelo WESP

Desenvolvido por Lopes (1987), em seu trabalho intitulado *A numerical model of watershed erosion and sediment yield*, o modelo WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*) foi desenvolvido com o objetivo de simular o escoamento superficial e a erosão em pequenas bacias hidrográficas localizadas em regiões de clima semiárido. Trata-se de um modelo distribuído, de base física e baseado em eventos de chuva.

Neste modelo a bacia hidrográfica é representada por um conjunto de elementos geométricos divididos entre planos de escoamento e canais de drenagem. Os planos contribuem com o fluxo na lateral ou no topo do canal, conduzindo o excesso de chuva sequencialmente ao longo dos planos e canais, em efeito cascata, até a saída da bacia.

3.1.1 Equações do Modelo WESP

3.1.1.1 Infiltração

A infiltração é a única forma considerada pelo modelo como perda de água da precipitação, desconsiderando, por exemplo, a perda da precipitação por evaporação. Portanto, o que não for infiltração será considerado como excesso de precipitação.

O modelo utiliza a equação de infiltração de Green-Ampt (1911), modificada por Mein & Larson (1973), para calcular o excesso de precipitação durante uma chuva constante. E para chuvas instáveis é utilizada a equação desenvolvida por Chu (1978), levando em conta o cálculo do tempo de empoçamento.

A taxa de infiltração f_c (m/s) no tempo t (s) pode ser escrita na seguinte forma, considerando a modificação proposta por Mein & Larson (1973):

$$f_c = K_s \left(1 + \frac{N_s}{F} \right) \quad (1)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica efetiva do solo (m/s), F é a lâmina acumulada de infiltração (m), N_s é o potencial efetivo, ou potencial da capilaridade, associado à frente de molhamento (m). Neste trabalho foi admitido o valor de 5 mm h^{-1} para a condutividade hidráulica.

O acúmulo de infiltração pode ser expresso como:

$$F = (\theta_s - \theta_i)L_f \quad (2)$$

onde θ_s é o conteúdo de água do solo na saturação (m^3/m^3), θ_i é o conteúdo inicial de água do solo (m^3/m^3) e L_f é a profundidade da frente de molhamento contando a partir da superfície (m).

O potencial de capilaridade N_s pode ser calculado como:

$$N_s = (\theta_s - \theta_i)\Psi \quad (3)$$

onde Ψ é o potencial mátrico do solo ou potencial capilar e varia de 0 até a profundidade de L_f (m). No desenvolvimento desta pesquisa o parâmetro do potencial de capilaridade na frente de molhamento teve que ser calibrado individualmente para cada evento estudado.

Mein & Larson (1973) aplicaram o modelo de Green-Ampt para uma chuva permanente, determinando a infiltração acumulada no tempo de empoçamento como:

$$F = it_p \text{ para } t = t_p \quad (4)$$

$$F = it \text{ para } t < t_p \quad (5)$$

$$f_c = K_s \left[1 + \frac{N_s}{F} \right] \text{ para } t > t_p \quad (6)$$

Entretanto, Aragão (2000) ressalta que na natureza as chuvas não são permanentes e que a validade da aplicação da equação de Green-Ampt para as chuvas não permanentes depende do grau de não permanência das chuvas.

A equação de Green-Ampt para chuva não permanente foi utilizada por Chu (1978). Para este caso o tempo de empoçamento foi determinado como sendo igual a:

$$t_p = t_{n-1} + \frac{(K_s N_s)}{(i - K_s) - P(t_{n-1}) + R(t_{n-1})} \quad (7)$$

onde, t_p é o tempo de empocamento (s), i é a intensidade de precipitação (mm/h), P é a chuva acumulada (mm), R é o escoamento acumulado (mm) e t_{n-1} é o tempo no início do intervalo considerado (h).

3.1.1.2 Escoamento Superficial

O início do escoamento superficial corresponde ao tempo em que a taxa de precipitação iguala ou supera a taxa de infiltração (Srinivasan *et al.*, 2003). No modelo WESP, o escoamento superficial, tanto nos planos como nos canais, é considerado unidimensional, não permanente e espacialmente variado.

O fluxo da bacia é representado em uma série de planos retangulares, em que as vazões ocorrem sequencialmente de um elemento para o outro. Para cada plano são estabelecidos seus valores médios de comprimento, largura, declividade e rugosidade, representando uma zona de escoamento superficial.

3.1.1.2.1 Fluxo no Plano

A equação de continuidade e a equação da quantidade de movimento, com a simplificação da onda cinemática, são utilizadas para calcular numericamente a vazão líquida ao longo do plano com a passagem do tempo. A equação da continuidade para os planos é dada por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = r_c \quad (8)$$

onde h é a altura do fluxo (m), u a velocidade média local do fluxo (m/s), x a variável espaço (m), t a variável de tempo (s), r_c a intensidade de chuva efetiva (m/s) igual a $I(t) = f(t)$, onde $I(t)$ é a intensidade da chuva (m/s).

A equação de quantidade de movimento é dada por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{u \partial u}{\partial x} + \frac{g \partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) - r \left(\frac{u}{h} \right) \quad (9)$$

onde $h(x,t)$ é a profundidade do fluxo numa distância x (m) do início do plano no tempo t , $u(x,t)$ é a velocidade média (m/s), $r(x,t)$ é a taxa de entrada lateral do fluxo por unidade de comprimento.

A equação para a velocidade do escoamento superficial nos planos pode ser obtida a partir da aproximação da onda cinemática, em que a declividade da linha de energia é considerada igual à declividade do plano ou do fundo do canal, isto é:

$$S_0 = S_f \quad (10)$$

onde S_0 é a declividade do plano ou do fundo do canal (%) e S_f é a declividade da linha de energia (%). Quando os efeitos da gravidade e de atrito dominam sobre os outros fatores na equação da quantidade de movimento, considera-se esta aproximação válida, resultando numa relação simples entre a velocidade e a profundidade do fluxo:

$$u = \alpha' h^{m-1} \quad (11)$$

onde h é a espessura da lâmina de fluxo (m), α' é um parâmetro de rugosidade da superfície igual a $\left(\frac{1}{n_p} \right) \cdot S_0^{1/2}$, e m' é um parâmetro de geometria igual a $\frac{5}{3}$, resultado da combinação da Equação (11) com a equação de Manning para escoamento turbulento. É importante lembrar que n_p é o coeficiente de rugosidade (fator de atrito) de Manning do plano. Para esta pesquisa foi adotado o valor igual a 0,2.

3.1.1.2 Fluxo no Canal

O modelo considera como desprezível o efeito da precipitação direta sobre o canal. O fluxo num canal é proveniente dos planos, que estão localizados em suas laterais ou na extremidade superior. Eventualmente, o fluxo também pode ser originário de um ou mais canais a montante.

O fluxo concentrado nos canais também é descrito pelas equações da continuidade e da quantidade de movimento. Para os canais a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial(UA)}{\partial x} = q_A \quad (12)$$

onde A é a área da seção transversal do canal (área de escoamento) em m^2 , U a velocidade média do fluxo no canal (m/s), e q_A a vazão lateral por unidade de comprimento do canal ($m^3/s/m$).

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(S_0 - S_f) - q_A \left(\frac{u}{A} \right) \quad (13)$$

Com base na abordagem da onda cinemática, a Equação (13) pode ser reduzida para:

$$Q = \alpha'' R_H^{m'-1} A \quad (14)$$

onde R_H é o raio hidráulico, α'' é igual a $\left(\frac{1}{n_c} \right) S_0^{1/2}$ com n_c sendo o fator de atrito de Manning para os canais (0,3 neste estudo).

3.1.1.3 Erosão e Deposição

O modelo leva em conta os processos de desagregação, transporte e deposição nos planos e canais. A erosão ocorre devido ao impacto das gotas da chuva bem como à força de cisalhamento do escoamento.

3.1.1.3.1 Erosão nos planos

A equação da continuidade para os sedimentos nos planos é dada por:

$$\frac{\partial ch}{\partial t} + \frac{\partial(cuh)}{\partial x} = e_I + e_R - d \quad (15)$$

onde $c(x,t)$ é a concentração de sedimentos em transporte (kg/m^3), e_I representa a taxa de desprendimento de sedimentos pelo impacto da chuva ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), e_R é a taxa de desprendimento de sedimentos pela força de cisalhamento ($\text{kg/m}^2/\text{s}$), e d a taxa de deposição de sedimentos ($\text{kg/m}^2/\text{s}$). A taxa e_I ($\text{kg/m}^2/\text{s}$) é obtida pela relação:

$$e_I = K_I I r_c \quad (16)$$

onde K_I é um parâmetro de destacamento do solo pelo impacto da chuva (kg s/m^4). A taxa e_R ($\text{kg/m}^2/\text{s}$) é expressa pela relação:

$$e_R = K_R \tau^{1.5} \quad (17)$$

onde K_R é um fator de destacamento pela tensão de cisalhamento do escoamento ($\text{kg m/N}^{1.5}\text{s}$), e τ é a tensão de cisalhamento efetiva (N/m^2) dada por:

$$\tau = \gamma R_H S_f \quad (18)$$

onde γ é o peso específico da água (N/m³) A taxa de deposição d (kg/m²/s) é expressa como:

$$d = \varepsilon V_s c \quad (19)$$

onde ε é um coeficiente do plano, que depende das propriedades do solo e fluido (igual a 0,5 neste estudo), $c(x,t)$ é a concentração de sedimentos em transporte no plano (kg/m³), e V_s a velocidade de queda da partícula (m/s) dada por:

$$V_s = F_o \sqrt{\frac{(\gamma_s - \gamma)}{\gamma} g d_s} \quad (20)$$

onde

$$F_o = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{g d_s^3 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} - \sqrt{\frac{36v^2}{g d_s^3 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} \quad (21)$$

sendo γ_s o peso específico do sedimento (N/m³), v a viscosidade cinemática da água (m²/s), d_s é o diâmetro médio dos sedimentos (m), e g a aceleração da gravidade (m/s²).

3.1.1.3.2 Erosão nos canais

Para os canais a equação de continuidade para os sedimentos é escrita como:

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial(CUA)}{\partial x} = e_r - d_c + q_s \quad (22)$$

onde $C(x,t)$ é a concentração de sedimentos em transporte no canal (kg/m^2), q_s a entrada lateral de sedimentos no canal (kg/m/s), e_r a taxa de erosão do material do leito (kg/m/s), e d_c a taxa de deposição de partículas no canal (kg/m/s).

A taxa de erosão do material do leito e_r (kg/m/s) é calculada pela expressão:

$$e_r = a(\tau - \tau_c)^{1,5} \quad (23)$$

onde a é o parâmetro de erodibilidade do sedimento ($\text{kg m}^2/\text{N}^{1,5}\text{s}$), e τ_c a força crítica de cisalhamento para entrada de sedimentos (N/m^2), a qual é calculada pela relação:

$$\tau_c = \delta(\gamma_s - \gamma)d_s \quad (24)$$

onde d é um coeficiente (0,047 neste estudo).

O termo de deposição no canal d_c (kg/m/s) é igual a:

$$d_c = \varepsilon_c T_W V_s C \quad (25)$$

onde ε_c é o parâmetro de deposição para os canais, considerado como sendo igual a 1 no presente caso, e T_W a largura superior do escoamento (m).

3.1.2 Sistema WESP

O sistema computacional WESP é formado por quatro subsistemas: um gerador de arquivos de entrada (*INPUT.exe*), um utilitário para cálculo do intervalo de tempo de simulação (*PLNSTAB.exe*), um utilitário para modificar os parâmetros no arquivo de entrada (*WESPAR.exe*) e o modelo WESP propriamente dito.

3.1.2.1 Parâmetros de entrada do modelo

O programa INPUT é responsável em gerar os arquivos de entrada a partir das informações fornecidas pelo usuário. São informações gerais sobre a discretização da bacia e informações específicas referentes aos planos e canais que compõem a bacia. Estes arquivos são organizados da seguinte forma:

A primeira linha do arquivo contém informações que são comuns para toda a bacia:

1. **Durat**: duração do evento (s);
2. **Δt**: intervalo de tempo para os cálculos numéricos (s);
3. **Clen**: comprimento característico da bacia (m);
4. **Abasin**: área da bacia (m²).

A segunda linha do arquivo também contém informações que são comuns para toda a bacia:

1. **Visc**: viscosidade cinemática da água;
2. **Grav**: aceleração da gravidade (m/s²);
3. **Gamwat**: peso específico da água (N/m³);
4. **Gamsed**: peso específico dos sedimentos (N/m³);
5. **Power**: o expoente n da equação da velocidade de fluxo.

A partir da terceira linha, as informações ocorrem em grupos de três linhas e dependem das características dos elementos (planos ou canais):

1. **Xlenght**: comprimento do elemento na direção do escoamento (m);
2. **Width**: largura do elemento (m). Quando este parâmetro é igual a zero, o elemento é identificado como um canal;

3. **Slope**: declividade do elemento;

4. **Alpha**: razão entre a raiz quadrada da declividade e o número de Manning.

Caso o elemento seja um plano a segunda linha do grupo conterà as seguintes informações:

1. **Ntop**: número do elemento que contribui imediatamente à montante do elemento atual;

2. **Ks**: condutividade hidráulica saturada (m/s);

3. **Ns**: potencial de sucção (m) - parâmetro de umidade/tensão ou sucção capilar;

4. **M**: índice do padrão de chuva. Utilizado na rotina de leitura do arquivo de chuva.

Caso o elemento seja um plano a terceira linha do grupo conterà as seguintes informações:

1. **Theta**: fator de peso espacial nas equações numéricas;

2. **Omega**: fator de peso temporal nas equações numéricas;

3. **Sedsize**: tamanho característico do sedimento (m);

4. **K_I**: parâmetro de erodibilidade pelo impacto das gotas de chuva (kg s/m^4);

5. **K_R**: parâmetro de erodibilidade pelo fluxo superficial ($\text{kg m/N}^{1.5}\text{s}$).

Caso o elemento seja um canal, a segunda linha do grupo conterà as seguintes informações:

1. **Ntop**: número do elemento que contribui imediatamente à montante do elemento atual;

2. **Nleft**: número do elemento que contribui pela lateral esquerda do elemento;

3. **Nright**: número do elemento que contribuí pela lateral direita do elemento;

4. **Nchn1**: número do primeiro canal à montante no topo do canal atual;

5. **Nchn2**: número do segundo canal à montante no topo do canal atual;

6. **Zl e Zr**: declividade das paredes do canal;

7. **Bottom**: largura de fundo do canal (m).

Caso o elemento seja um canal, a terceira linha do grupo conterà as seguintes informações:

1. **Theta:** fator de peso espacial nas equações numéricas;
2. **Omega:** fator de peso temporal nas equações numéricas;
3. **Sedsize:** tamanho característico dos sedimentos (m);
4. **Clambda:** parâmetro para a tensão de cisalhamento crítica;
5. **a:** parâmetro de erodibilidade pelo fluxo superficial ($\text{kgm/N}^{1,5}\text{s}$).

3.1.2.2 Utilitário para cálculo do intervalo de tempo de simulação

O programa *PLNSTAB* foi desenvolvido com a finalidade de fornecer o intervalo de tempo (Δt) de simulação que permitisse a convergência do modelo numérico. Ele utiliza como informações de entrada o valor do comprimento do maior canal ou da maior cascata de planos, a declividade do maior canal ou do elemento mais a jusante na cascata de planos, o valor do coeficiente de rugosidade de Manning do elemento acima citado, o valor da condutividade hidráulica saturada e o valor da intensidade máxima do evento.

Este intervalo de tempo é calculado no utilitário *PLNSTAB*, utilizando a seguinte equação:

$$\Delta t' < \frac{\Delta x}{\alpha m \left[\frac{i_{\text{máx}} - K_s}{\alpha} \right]} \quad (26)$$

onde L é o comprimento do elemento mais abaixo no comprimento característico (m), m é um parâmetro de geometria igual a $2/3$, $i_{\text{máx}}$ é a intensidade máxima da chuva correspondente ao evento (m/s), α é um parâmetro relacionado à rugosidade da superfície igual a $(1/n)S^{1/2}$ onde n é o fator de atrito de Manning do elemento mais abaixo no comprimento característico igual a 0,02 para os planos e 0,03 para os canais, e Δx é dado por:

$$\Delta x < \frac{L}{N-1} \quad (27)$$

onde N é o valor máximo entre 3 e $15L/L_{\text{máx}}$, tendo $L_{\text{máx}}$ como o comprimento característico (m). O comprimento característico é definido com sendo a soma dos comprimentos da maior cascata de planos ou o maior canal, o que for maior.

3.1.2.3 Utilitário para modificação do arquivo de parâmetro

O subsistema WESPAR é um programa específico do modelo WESP que permite a modificação dos valores de parâmetros durante o processo de simulação. No entanto, as modificações também podem ser efetuadas através de um editor de texto. Estas técnicas são utilizadas pelo usuário quando o mesmo realiza a calibração manual do modelo.

3.1.2.4 Utilitário WESP

O modelo WESP propriamente dito é composto por três rotinas principais de simulação (Lopes, 1987): a rotina de infiltração; escoamento superficial e; erosão e deposição.

Cada rotina utiliza uma ou mais subrotinas:

a) Infiltração

INFIL - calcula as taxas de infiltração nos planos de escoamento usando a equação de Green-Ampt e gera o histograma do excesso de precipitação;

b) Escoamento superficial (planos e canais)

PLNFLOW - propaga o excesso de precipitação através dos planos de escoamento, usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos.

CHNFLOW - propaga o escoamento superficial concentrado através dos segmentos de canais, usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos.

c) Erosão e deposição

PLNSED - calcula as taxas de desprendimento do solo pelo impacto das gotas de chuva e tensão de arrastamento, e as taxas de deposição nos planos de escoamento, e propaga o sedimento através dos planos de escoamento, usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos.

CHNSED - calcula as taxas de desprendimento por arrastamento, as taxas de deposição nos leitos dos canais e propaga o sedimento através dos segmentos de canais, usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos.

3.1.3 Sequência computacional

A seqüência computacional no modelo é organizada de tal modo que o fluxo de entrada requerido por qualquer elemento (plano ou canal), em qualquer estágio da simulação, provém de elementos previamente processados. Esta seqüência é determinada pelo usuário durante o processo de discretização da bacia hidrográfica. A ordem na qual os elementos aparecem na linha de fluxo define a seqüência computacional (Lopes, 1987).

3.1.4 Estimativa dos parâmetros

Muitos dos parâmetros do WESP podem ser determinados através da medição direta, ou obtidos de investigações anteriores na mesma área experimental. Desta forma, alguns parâmetros devem ser estimados ou calibrados usando dados existentes. Estes parâmetros podem ser agrupados nas seguintes categorias:

a) Parâmetros que são obtidos através de ensaios na área experimental ou de acordo com as características geométricas dos elementos: *Clen*, *Temperature*, *Diameters*, *Densities*, *Identifier*, *Upstream*, *Length*, *Width*, *Slope*, *Upstream*, *Lateral*, *SSI*, *SS2*.

b) Parâmetros que são obtidos através de literatura, com base em trabalhos efetuados na bacia em estudo ou em áreas semelhantes: *Grav*, *Gramwat*, *Gamsed*, *Power*, *Alpha*, *M*, *Theta*, *OmegaeClambda*.

c) Parâmetros que precisam de calibração: K_s , N_s , K_I , K_{Re} e a .

d) Parâmetros que estão relacionados ao evento em estudo: *Durat* e Δt

3.2 Métodos de Otimização por Calibração Automática

A aplicação bem sucedida de um modelo hidrológico depende de quão bem o modelo é calibrado (Zhang *et al.*, 2008). O objetivo da calibração é encontrar os valores dos parâmetros utilizados na modelagem que permitam uma boa representação do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Para tal, vêm sendo desenvolvidos diferentes algoritmos de busca automática. A seguir são apresentadas as técnicas de otimização utilizadas para a calibração automática do modelo em estudo.

3.2.1 Repulsive Particle Swarm

O *Repulsive Particle Swarm* (RPS) – em português, Enxame de Partículas Repulsivas, é um método de otimização variante do *Particle Swarm Optimization* (PSO), proposto por Urfalioglu (2004), que se torna particularmente mais eficaz em descobrir o ótimo global em espaços de busca muito complexo.

3.2.1.1 Particle Swarm Optimization

Esta técnica de otimização foi introduzida pela primeira vez por Kennedy e Eberhart (1995), também conhecida apenas pela abreviação em inglês PSO. Trata-se de uma técnica de computação estocástica baseada metaforicamente no comportamento social de populações, como por exemplo, um enxame de insetos.

A partir da observação de um enxame, verificou-se que o comportamento da população é influenciado pela experiência individual acumulada por cada indivíduo, bem como pela experiência acumulada pela população.

Com base nestas observações, constata-se que o comportamento se dá inicialmente sem nenhuma orientação prévia. As partículas, ou indivíduos, se

aglomeram até que uma delas consiga encontrar uma melhor posição, do ponto de vista do objeto escolhido, o que acaba por atrair as partículas que estiverem mais próximas. Ao longo do tempo, o grupo acaba alcançando o objetivo, desenvolvendo assim, o que chamamos de inteligência social, onde um indivíduo aprende com o acerto do outro (Nascimento, *et al.*, 2009). Portanto, cada partícula representa uma solução matemática para o problema. Neste caso, para cada partícula em busca da solução ideal, há uma função objetivo no espaço de busca.

3.2.1.2 Algoritmo PSO

No algoritmo padrão do PSO, o sistema é inicializado com as partículas da população em uma posição e velocidade aleatória. Cada partícula permanece atualizando dinamicamente a sua posição, com base em sua posição anterior e informações sobre a velocidade. Durante este procedimento, a melhor posição encontrada no espaço de busca recebe a denominação de p_{best} , e o melhor local encontrado por todas as partículas da população é chamado de g_{best} .

O procedimento do PSO se comporta da seguinte forma (O’Neil & Brabazon, 2006; Juang *et al.*, 2010):

- I. Inicializa-se cada partícula da população pela seleção aleatória de valores para a sua localização e vetores de velocidade;
- II. Avalia-se o valor da aptidão de cada partícula. Se o valor atual da aptidão é maior do que o melhor valor encontrado para a adequação de partículas até momento, então, o p_{best} é revisto;
- III. Determina-se a localização da partícula com maior aptidão e rever g_{best} se necessário;
- IV. Para cada partícula, calcula-se a velocidade de acordo com a equação 1;
- V. Atualiza-se a localização de cada partícula de acordo com a equação 3;
- VI. Se o número máximo de iterações ou o objetivo for alcançado, então o processo é encerrado e as últimas g_{best} é a solução ideal. Caso contrário, repete-se as etapas II–V até que os critérios de parada sejam cumpridos.

Através da seguinte equação é atualizado o vetor de velocidade da partícula:

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1 \cdot random_1 \cdot (p_{best_i} - X_i^k) + c_2 \cdot random_2 \cdot (g_{best} - X_i^k) \quad (28)$$

onde V é a velocidade atual da partícula i na iteração k , w é o peso da inércia, c_1 e c_2 são os coeficientes de aceleração, $random_1$ e $random_2$ são números aleatórios entre 0 e 1, X_i^k é a posição atual da partícula i na iteração k , p_{best_i} é o melhor valor de i da partícula e g_{best} é o melhor valor de avaliação entre os p_{best} .

O peso da inércia (w) é dado por:

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \cdot k \quad (29)$$

onde w_{\max} é o peso inicial, w_{\min} é o peso final, $iter_{\max}$ é o número máximo de iteração e k é o número atual da iteração.

A posição de cada partícula é atualizada usando a equação:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \quad (30)$$

e verifica que $X_{\min} \leq X_i^{k+1} \leq X_{\max}$ onde X_{\min} e X_{\max} representam limites inferior e superior, respectivamente.

Alguns parâmetros de entrada do algoritmo são requeridos ao modelador e a escolha destes parâmetros é decisiva no desempenho do método. Neste estudo foi utilizado o seguinte conjunto de parâmetros: N (tamanho da população)= 100, $ITER$ (número de iterações) = 10, NN (quantidade de vizinhos) = 25, MX (tamanho máximo de variáveis de decisão)= 100, $NSIGMA$ (define a existência ou não de perturbação caótica)= 1 e $ITOP$ (topologia) = 3.

3.2.2 Differential Evolution

O algoritmo *Differential Evolution* (DE), que em português é conhecido como Evolução Diferencial, pertence à classe dos algoritmos evolucionários. Desenvolvido por Storn & Price em 1995, trata-se de um método de busca direta estocástico, que surgiu das tentativas de resolver o problema de ajuste polinomial de Chebychev.

O método tem início na geração aleatória de uma população de indivíduos, onde cada indivíduo representa um ponto no espaço de soluções potenciais de um dado problema, cobrindo todo o espaço de busca. Em geral, a população inicial é criada por uma distribuição de probabilidade uniforme, quando não há nenhum conhecimento sobre o problema.

Uma nova população de mesmo tamanho surge a partir das modificações ocorridas na população inicial e este procedimento ocorre até que a otimização seja encerrada. Estas modificações ocorrem com a geração de novos indivíduos, denotados vetores modificados ou doadores, por intermédio da adição da diferença ponderada entre dois indivíduos aleatórios da população a um terceiro indivíduo também escolhido aleatoriamente. Procedimento conhecido como *mutação*. Em seguida, as componentes do indivíduo doador são misturadas com as componentes de um indivíduo escolhido aleatoriamente, denominado vetor alvo, resultando no vetor chamado vetor tentativa ou vetor experimental. O processo de misturar os parâmetros é chamado de *cruzamento*.

Se o vetor experimental resultar um valor da função objetivo menor que o vetor alvo, então o vetor experimental substitui o vetor alvo na geração seguinte, caso contrário, o vetor alvo é mantido na próxima geração. Este último procedimento é chamado de *seleção*.

3.2.2.1 Operadores do *Differential Evolution*

Os objetivos dos operadores da DE são manter a diversidade da população, evitar convergências prematuras e obter a melhor solução. Tais operadores são os seguintes:

3.2.2.1.1 Operador de Mutação

Sejam os vetores X_α , X_β e X_γ escolhidos aleatoriamente e distintos entre si. Na geração q um par de vetores (X_β, X_γ) define uma diferença $X_\beta - X_\gamma$. Esta diferença é multiplicada por $F > 0$, sendo denotada por diferença ponderada, e é usada para perturbar o terceiro vetor X_α ou o melhor vetor X_{best} da população. Este processo que resulta o vetor doador $V^{(q+1)}$ pode ser escrito matematicamente como:

$$V^{q+1} = X_\alpha^q + F(X_\beta^q - X_\gamma^q) \text{ ou } V^{q+1} = X_{best}^q + F(X_\beta^q - X_\gamma^q) \quad (31)$$

onde os índices aleatórios $\alpha, \beta, \gamma \in \{1, \dots, N_p\}$ são inteiros distintos entre si e diferentes do índice d . O número de indivíduos da população, N_p , deve ser maior ou igual a 4. F é um número real e constante pertencente ao intervalo que controla a amplitude da diferença ponderada.

A Figura 1 mostra um exemplo bidimensional que ilustra os diferentes vetores que participam da geração do vetor doador $V^{(q+1)}$.

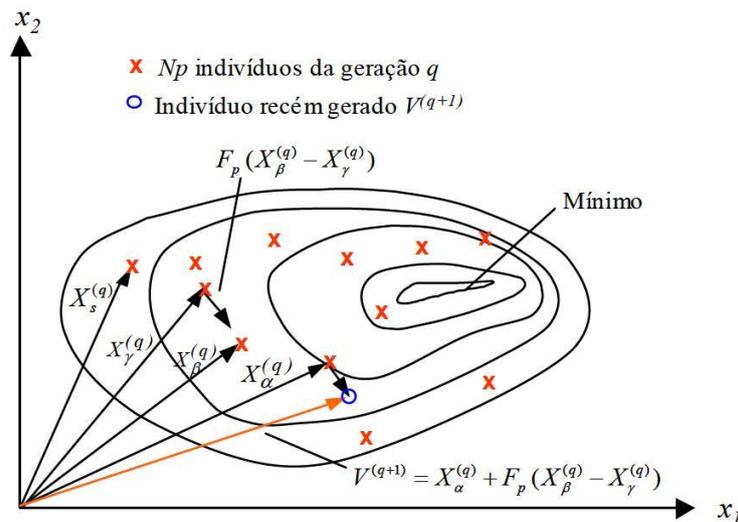


Figura 1 - Processo para gerar o vetor doador $V^{(q+1)}$ de uma função bidimensional (Oliveira, 2006.).

Sendo o número de indivíduos da população grande o suficiente, pode-se melhorar a diversidade da população perturbando o vetor com duas diferenças ponderadas na criação do vetor doador V^{q+1} . Neste caso, selecionam-se aleatoriamente cinco vetores diferentes da q -ésima população e diferentes entre si, e usam-se dois pares de diferenças ponderadas na perturbação. Este processo é dado por:

$$V^{q+1} = X_{\alpha}^q + F(X_{\lambda}^q - X_{\beta}^q + X_{\gamma}^q - X_{\delta}^q) \text{ ou } V^{q+1} = X_{best}^q + F(X_{\lambda}^q - X_{\beta}^q + X_{\gamma}^q - X_{\delta}^q) \quad (32)$$

Os índices escolhidos aleatoriamente $\alpha, \beta, \gamma \in \{1, \dots, N_p\}$, são inteiros mutuamente distintos e diferentes do índice d .

3.2.2.1.2 Operador de Cruzamento

O *cruzamento* é introduzido para aumentar a diversidade dos indivíduos que sofreram a mutação. Neste processo é escolhido outro vetor aleatoriamente, chamado de vetor alvo X_a^q , diferente dos vetores utilizados na obtenção do vetor doador. Storn & Price (1995) apresentaram um tipo de cruzamento, denominado *cruzamento binomial* (Figura 2), que consiste em misturar as componentes deste vetor alvo com as componentes do vetor doador V^{q+1} , proporcionando o vetor experimental U^{q+1} , conforme apresentado abaixo:

$$u_i^{q+1} = \begin{cases} v_i^{q+1}, & \text{se } r_i \leq P_c \\ x_{a,i}^q, & \text{se } r_i > P_c \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (33)$$

sendo r_i números aleatórios obtidos no intervalo $[0, 1]$, u_i^{q+1} , v_i^q e $x_{a,i}^q$ as respectivas componentes dos vetores experimental U^{q+1} , doador V^{q+1} e alvo, para $i = 1, 2, \dots, n$ e P_c um número também do intervalo $[0,1]$, fornecido pelo usuário, e denominado de *probabilidade de cruzamento*.

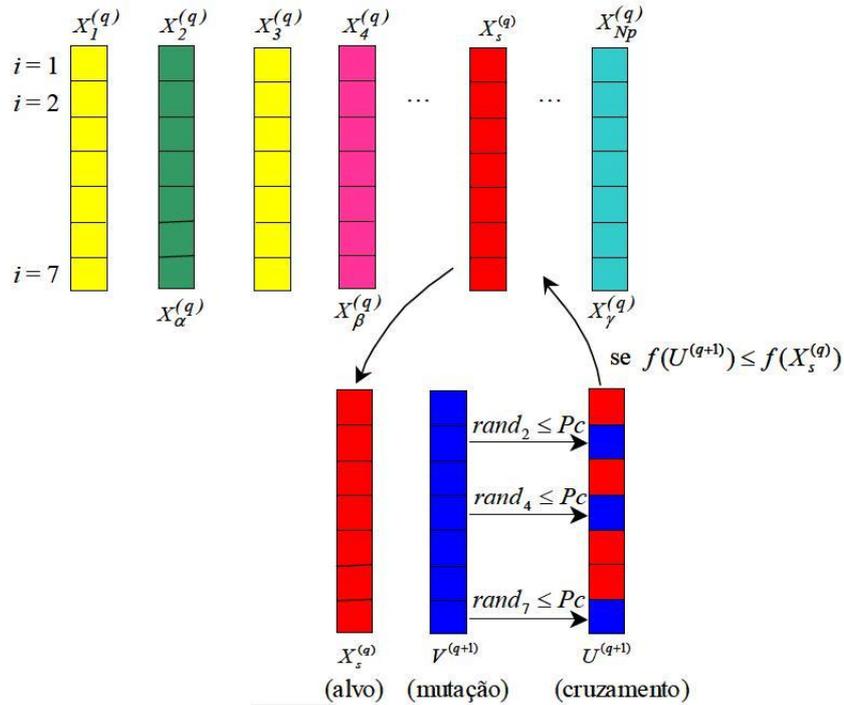


Figura 2. Ilustração do processo de *cruzamento binomial* $\alpha = 2$, $\beta = 4$ e $\gamma = N_p$ (Oliveira, 2006.)

Outro operador de cruzamento foi desenvolvido por Storn & Price (1997), denominado *cruzamento exponencial* (Figura 3), de maneira que o vetor experimental é obtido efetuando-se a troca de variáveis entre o vetor doador e o vetor alvo seguindo a seguinte regra: gera-se números aleatórios r_i , $i = 1, 2, \dots, n$, sendo que o número r_i corresponde à respectiva variável da posição i . A partir de $i = 1$, e de um em um, compara-se os números aleatórios r_i com a probabilidade de cruzamento P_c . Enquanto r_i for menor ou igual a P_c , troca-se a variável $x_{a,i}^q$ do vetor alvo pela correspondente variável v_i^{q+1} do vetor doador. Na primeira vez que um número r_i ultrapassar P_c , nenhuma troca é executada e as variáveis restantes são deixadas intactas. Ou seja, se j é o primeiro valor em que se tem $r_j > P_c$, então:

$$u_i^{q+1} = \begin{cases} v_i^{q+1}, & \text{para } i = 1, 2, \dots, j-1 \\ x_{a,i}^q, & \text{para } i = j, j+1, \dots, n, \end{cases} \quad (34)$$

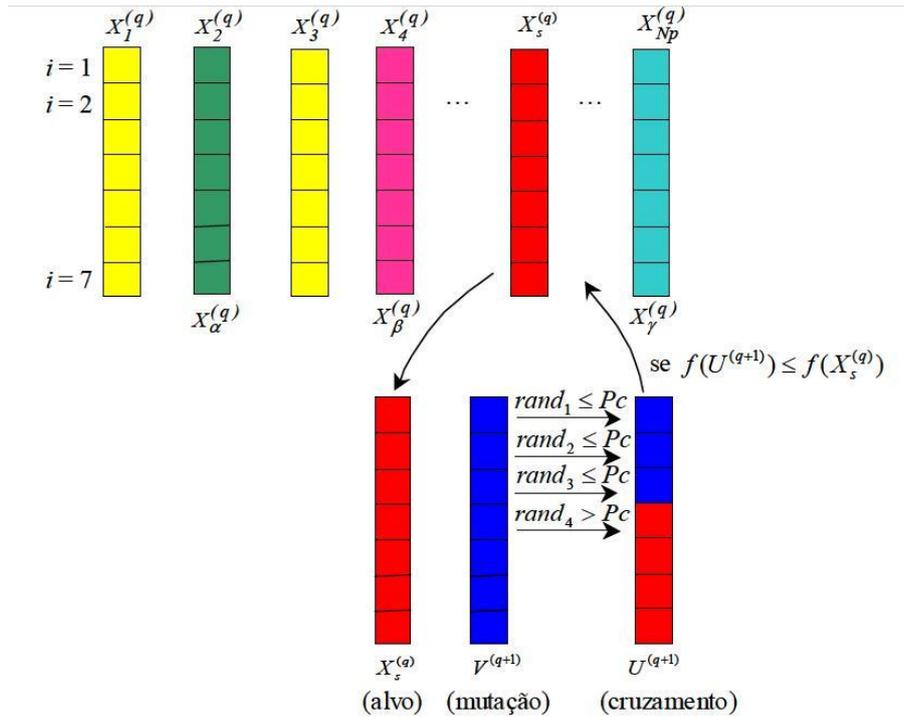


Figura 3. Ilustração do processo de *cruzamento exponencial* $\alpha = 2$, $\beta = 4$ e $\gamma = N_p$ (Oliveira, 2006.)

Se após o cruzamento uma ou mais componentes do vetor experimental estiver fora da região de busca, fazem-se as seguintes correções:

$$\begin{cases} \text{Se } u_i^q < x_i^{\text{inf}}, \text{ então faz - se } u_i^q = x_i^{\text{inf}} \\ \text{Se } u_i^q > x_i^{\text{sup}}, \text{ então faz - se } u_i^q = x_i^{\text{sup}} \end{cases} \quad (35)$$

3.2.2.1.3 Operador de Seleção

Este processo é responsável em produzir melhores “filhos”. Diferentemente de outros algoritmos evolutivos, a DE não usa hierarquia nem seleção proporcional. Em vez disso, o custo (valor da função objetivo) do vetor experimental U^{q+1} é calculado e comparado com o custo do vetor alvo X_d^q . Se o custo do vetor alvo for menor que o custo do vetor experimental, o vetor alvo avança para a próxima geração. Caso

contrário, o vetor experimental substitui o vetor alvo na geração seguinte. Este processo pode ser escrito conforme a Equação (34).

$$\begin{aligned} \text{Se } f(U^{q+1}) \leq f(X_a^q), \text{ então } X_a^{q+1} \text{ será igual a } U^{q+1} \\ \text{Se } f(U^{q+1}) > f(X_a^q), \text{ então } X_a^{q+1} \text{ será igual a } X_a^q \end{aligned} \quad (36)$$

Finalizando este operador, a q -ésima população dá lugar à $(q+1)$ -ésima população, para $q = 1, 2, \dots, q_{\max}-1$. O procedimento é finalizado através de algum critério de parada, sendo que um número máximo de gerações deve ser estabelecido.

3.2.2.2 Estratégias do *Differential Evolution*

No método DE, as estratégias podem variar de acordo com o tipo de indivíduo a ser modificado na formação do vetor doador, o número de indivíduos considerados para a perturbação e o tipo de cruzamento a ser utilizado, podendo ser escritas da seguinte forma: DE/a/b/c, onde:

a - especifica o vetor a ser perturbado, podendo ser “rand” (um vetor da população escolhido aleatoriamente) ou “best” (o vetor de menor custo da população);

b - determina o número de diferenças ponderadas usadas para a perturbação do vetor definido por a ;

c - denota o tipo de cruzamento (exp: exponencial; bin: binomial).

Inicialmente, o trabalho da estratégia básica foi usando apenas o operador cruzamento binomial, onde o cruzamento é executado em cada variável sempre que um número $r \in [0, 1]$ aleatório for menor que a probabilidade de cruzamento P_c (Storn e Price, 1995).

Posteriormente, foram desenvolvidos por Storn e Price (1997) outras estratégias usando o operador cruzamento exponencial, em que o cruzamento é executado nas variáveis em um laço até que esteja dentro do limite de P_c . A primeira vez que um número $r \in [0, 1]$ aleatório ultrapassa o valor de P_c , nenhum cruzamento é executado e as variáveis restantes são deixadas intactas.

Desta maneira têm-se dez estratégias que podem ser descritas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Representação das estratégias da Evolução Diferencial (ED).

Número	Mutação	Notação
1	$V^{(q+1)} = X_{\alpha}^{(q)} + F(X_{\beta}^{(q)} - X_{\gamma}^{(q)})$	ED/rand/1/bin
2	$V^{(q+1)} = X_{best}^{(q)} + F(X_{\beta}^{(q)} - X_{\gamma}^{(q)})$	ED/best/1/bin
3	$V^{(q+1)} = X_{\alpha}^{(q)} + F(X_{\lambda}^{(q)} - X_{\beta}^{(q)} + X_{\gamma}^{(q)} - X_{\delta}^{(q)})$	ED/rand/2/bin
4	$V^{(q+1)} = X_{best}^{(q)} + F(X_{\alpha}^{(q)} - X_{\beta}^{(q)} + X_{\gamma}^{(q)} - X_{\delta}^{(q)})$	ED/best/2/bin
5	$V^{(q+1)} = X_{old}^{(q)} + F(X_{best}^{(q)} - X_{old}^{(q)} + X_{\gamma}^{(q)} - X_{\delta}^{(q)})$	ED/rand-to-best/2/bin
6	$V^{(q+1)} = X_{\alpha}^{(q)} + F(X_{\beta}^{(q)} - X_{\gamma}^{(q)})$	ED/rand/1/exp
7	$V^{(q+1)} = X_{best}^{(q)} + F(X_{\beta}^{(q)} - X_{\gamma}^{(q)})$	ED/best/1/exp
8	$V^{(q+1)} = X_{\alpha}^{(q)} + F(X_{\lambda}^{(q)} - X_{\beta}^{(q)} + X_{\gamma}^{(q)} - X_{\delta}^{(q)})$	ED/rand/2/exp
9	$V^{(q+1)} = X_{best}^{(q)} + F(X_{\alpha}^{(q)} - X_{\beta}^{(q)} + X_{\gamma}^{(q)} - X_{\delta}^{(q)})$	ED/best/2/exp
10	$V^{(q+1)} = X_{old}^{(q)} + F(X_{best}^{(q)} - X_{old}^{(q)} + X_{\gamma}^{(q)} - X_{\delta}^{(q)})$	ED/rand-to-best/2/exp

No DE a capacidade de achar o mínimo global em uma rápida taxa de convergência é muito sensível às variáveis de controle N_p e CR (Carmo, 2004). Algumas regras para a escolha destes parâmetros são abordadas a seguir:

- Tamanho da população N_p : Este valor depende do custo da função objetivo e dos outros parâmetros do algoritmo. Uma grande população tem maior probabilidade de achar o mínimo global para funções multimodais. Para este estudo foi utilizado $N_p = 100$.

- Constante de Cruzamento CR : Para um valor alto de CR tem-se uma convergência rápida. Entretanto, a partir de um certo valor em diante a velocidade de convergência pode decrescer ou a população pode convergir prematuramente. Este valor depende do custo da função objetivo. Neste estudo foi utilizado $CR = 0,9$.

Outros parâmetros também devem ser escolhidos pelo modelador na busca de melhorar o desempenho do algoritmo DE aplicado ao modelo WESP. O seguinte conjunto de parâmetros foi escolhido: $ITER$ (número de iterações) = 1000 e $FACT$ (fator de escala) = 0,5.

3.3 Área de Estudo

A coleta de dados em bacias hidrográficas nem sempre é possível devido aos poucos recursos financeiros, falta de pessoal treinado e principalmente devido ao fato que para se ter uma boa representatividade da realidade, se faz necessário um longo período de coleta dos dados hidrológicos e sedimentológicos (Santos, 2008). Por isso, a escolha de uma área com dados de escoamento e erosão disponíveis muitas vezes torna-se imprescindível no uso de modelos hidrossedimentológicos.

Dentre as bacias representativas e experimentais implantadas no Nordeste, as de Sumé, instaladas no semiárido paraibano, têm fornecido valiosas informações que serviram de base para vários estudos (Santos, 2008). Os estudos nessa região foram iniciados pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE) no começo da década de 1970 (Cadier & Freitas, 1982 apud Davi, 2004). A maioria destes estudos teve como intuito modelar o processo de escoamento superficial e erosão, a exemplo dos estudos desenvolvidos por Santos (1994), Aragão (2000), Lopes (2003), Davi (2004) e Paiva (2008).

Os dados de campo utilizados neste trabalho são originários da Bacia Experimental de Sumé (BES), localizada na cidade de Sumé, no Estado da Paraíba (Figura 4), estando inserida nas delimitações da Bacia Representativa de Sumé. A bacia experimental teve seus estudos iniciados em meados de 1982 (Srinivasan & Galvão, 2003).

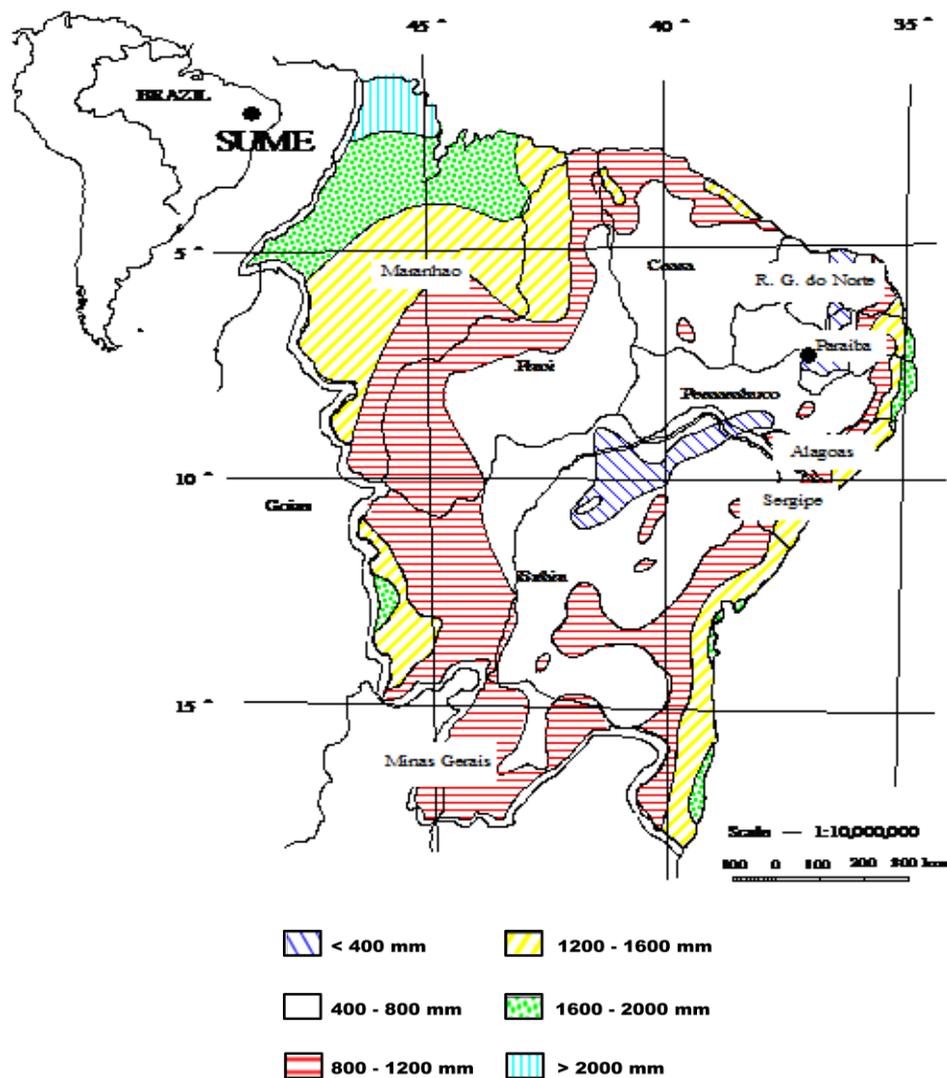


Figura 4. Localização da Bacia Experimental de Sumé (Santos, 1997).

3.3.1 Bacia Experimental de Sumé

A Bacia Experimental de Sumé, que hoje se encontra desativada, está localizada entre os municípios de Sumé e Monteiro, uma região denominada por Cariris Velhos e considerada uma das mais secas do Nordeste (Paiva, 2008). Trata-se de uma bacia que representa a situação de grande parte do nordeste brasileiro, onde o solo, o relevo, a vegetação e o clima são semelhantes.

A precipitação média anual varia entre 550 e 600 mm, com decenal seca igual a 300 mm e decenal úmida igual a 900 mm. O período mais chuvoso é centralizado entre

os meses de fevereiro e abril, com período chuvoso entre janeiro e junho. A temperatura média anual varia entre 23 e 27°C com amplitudes térmicas diárias de 10°C. A insolação apresenta uma média anual igual a 2800 horas enquanto que a evapotranspiração média é de 2000 mm/ano (Lopes, 2003).

A superfície da Bacia Experimental de Sumé é composta por 85% de solo tipo bruno não-cálcico vértico, os outros 15% restantes são representados por manchas de solos bruno não-cálcico associados a raros vertissolos. Os solos são rasos, com espessura variando de alguns decímetros a pouco mais de 1 m (Davi, 2004). O relevo varia de ondulado a pouco ondulado, com declividade média inferior a 10% (Paiva, 2008).

Predomina vegetação de caatinga hiperxerófila densa, similar à vegetação observada em toda a região dos Cariris Velhos. Entre as espécies mais significativas, pode-se destacar o Xiquexique (*Cereus Gounellei*), Mandacaru (*Cereus Jamacaru*), Braúna (*Schinopsis Brasiliensis*), Favela (*Jatropha Phillacantha*), Quixaba (*Bumelia Sertorum*), Aroeira (*Astonium Urundeva*), Umbuzeiro (*Ipodias Tuberosa*), Pinhão (*Jatropha Curcas*), Macambira (*Bromélia Laciniosa*), Marmeleiro (*Cróton Hemyargyreus*) e Caatingueira (*Caesalpinia Pyramidalis*) (Cadier & Freitas, 1982 *apud* Paiva, 2008).

3.3.1.1 Instalações na Bacia Experimental de Sumé

Para caracterizar a topografia do terreno e a cobertura vegetal, foram instaladas quatro microbacias com áreas entre 0,5 e 1 ha e nove parcelas experimentais de 100 m², todas operadas sob chuva natural. Estas microbacias, tal como as parcelas experimentais, apresentam diversas condições topográficas e de manejo e uso do solo. Além dos dados de escoamento superficial, também foram coletadas amostras padronizadas para estimativa da quantidade de sedimentos transportados pelo fluxo (Srinivasan & Galvão, 2003). A Figura 5 mostra o croqui das instalações da Bacia Experimental de Sumé.

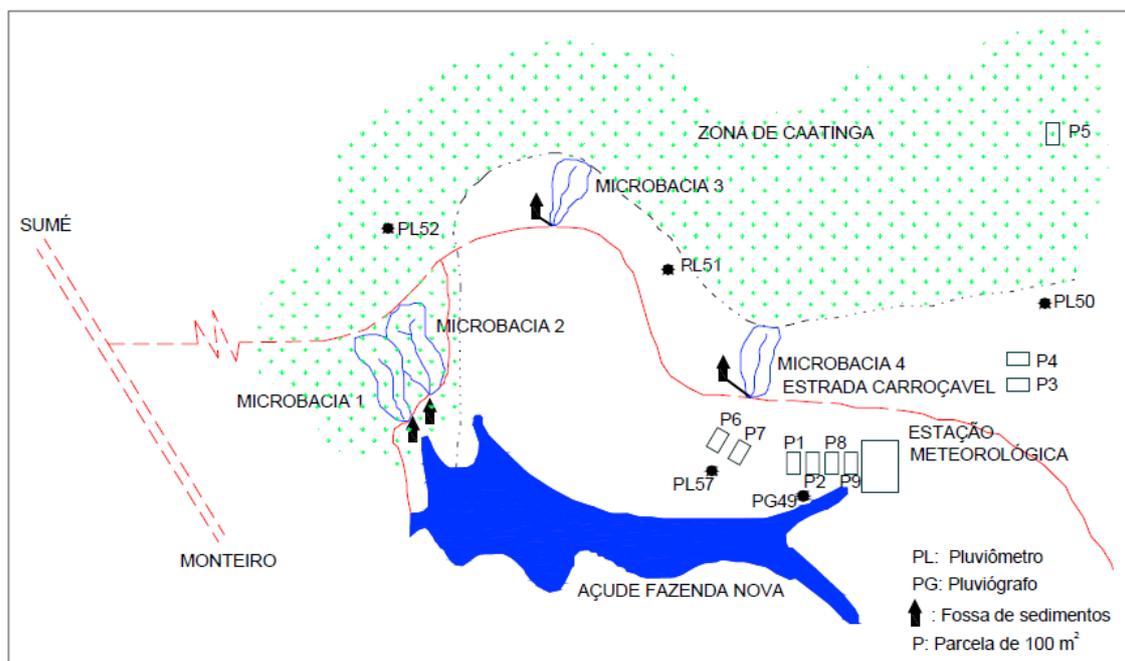


Figura 5. Croqui de localização das instalações da Bacia Experimental de Sumé (Davi, 2004).

3.3.1.2 Microbacias

As microbacias começaram a ser operadas no início do período chuvoso de 1982, e foram realizados os levantamentos topográfico, botânico, pedológico, entre outros, com a finalidade de estabelecer as características físicas da bacia experimental (Cadieret al., 1983 *apud* Paiva, 2008). Foram obtidos com estas instalações, os dados referentes à lâmina escoada e peso total de sedimentos produzidos em cada um dos eventos da precipitação que geram escoamento superficial. As características relativas as microbacias são apresentadas na Tabela 2.

Duas das microbacias instaladas na Bacia Experimental de Sumé (microbacia 1 e 2) estão localizadas em área com cobertura nativa de caatinga, estando as microbacias 3 e 4 localizadas numa área onde a cobertura nativa foi retirada. Para este estudo foram utilizados os dados provenientes da Microbacia 03 (Figura 6).

Tabela 2. Características das microbacias (Srinivasan & Galvão, 2003).

Microbacia	Área (ha)	Perímetro (m)	Declividade Média (%)	Cobertura Vegetal
01	0,62	398	7,0	Caatinga Nativa
02	1,07	466	6,1	Caatinga Nativa
03	0,52	302	7,1	Inexistente
04	0,48	270	6,8	Inexistente

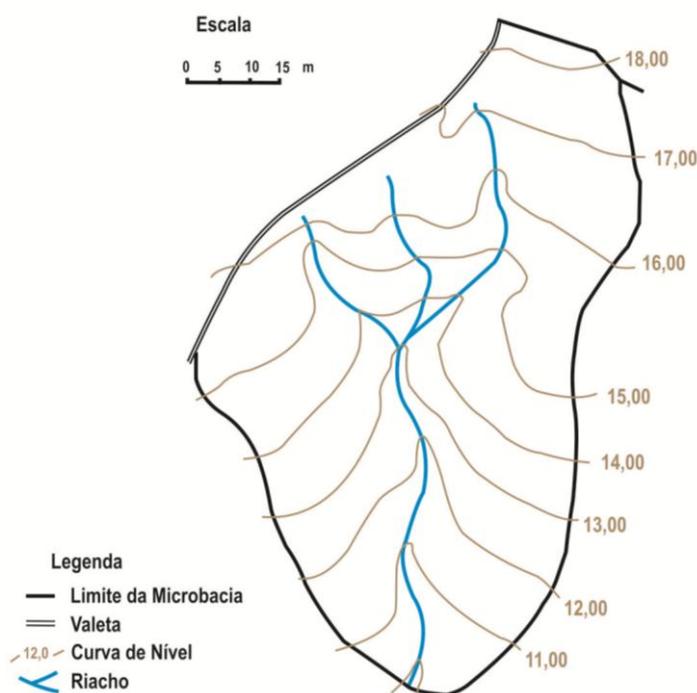


Figura 6. Levantamento topográfico da Microbacia 03 (Srinivasan & Galvão, 2003).

Em cada microbacia foi instalada uma fossa retangular de 2,3 m³ de capacidade, equipada com um vertedor triangular de 90°, um linígrafo e um dispositivo de amostragem das águas que sangram. O vertedor foi dimensionado para uma vazão máxima de 270 L/s, o que corresponde à descarga provocada por uma chuva com intensidade de 100 mm/h que escoaria em sua totalidade sobre uma superfície de 1 ha, com uma velocidade média de 0,2 a 0,3 m/s no canal da fossa (Srinivasan & Galvão, 2003).

3.3.1.3 Dados Disponíveis

A Bacia Experimental de Sumé (BES) possui, provavelmente, o maior acervo de dados sobre escoamento superficial e produção de sedimentos em pequenas bacias do semiárido brasileiro (Silva, 2008).

A coleta de dados hidrossedimentológicos na Bacia Experimental de Sumé compreendeu o período 1982 a 1991. Cada evento de precipitação que gerou escoamento em alguma unidade experimental recebeu um número de identificação e a denominação de “*cheia*”. Nos dez anos de coleta de dados foram catalogados 264 eventos.

No trabalho desenvolvido por Lopes (2003), o autor cita a necessidade de excluir alguns eventos que poderia levar a resultados fora da realidade. Com o intuito de evitar possíveis erros gerados por estes dados, para este estudo foram selecionados os eventos entre 1987 e 1991. No total foram utilizados 44 eventos (ver Anexo), dos quais 21 foram selecionados tendo como base o trabalho de Santos *et al.* (1994). Os outros eventos selecionados foram escolhidos por terem sido coletados num período em que a microbacia foi bem administrada, aumentando a confiabilidade dos dados. Para cada um destes eventos foi construído o seu respectivo hietograma de chuva, ilustrando o comportamento de infiltração e do excesso de chuva, a qual gera a lâmina de escoamento (ver Anexo).

3.3.1.4 Discretização da Microbacia da Bacia Experimental de Sumé

A discretização é definida como a divisão da bacia em estudo em planos e canais para obter a sua modelagem. Para cada elemento discretizado da bacia são calculados: a largura dos elementos planos; o comprimento dos elementos planos e canais; e a declividade média dos planos e canais.

Neste estudo, a geometria da microbacia hidrográfica foi representada por três discretizações. Foram utilizadas as mesmas discretizações feitas por Santos (1994) para a Microbacia³ da Bacia Experimental de Sumé. A microbacia foi discretizada inicialmente em 4 elementos, sendo 1 canal e 3 planos(Figura 7); em seguida teve a segunda discretização com 10 elementos, dos quais 3 são canais e 7 são planos (Figura

8); por último tem uma discretização mais detalhada, com 23 elementos, ficando composta por 16 planos e 7 canais (Figura 9). As Tabelas 3, 4 e 5 apresentam as dimensões determinadas para cada elemento conforme a discretização utilizada.

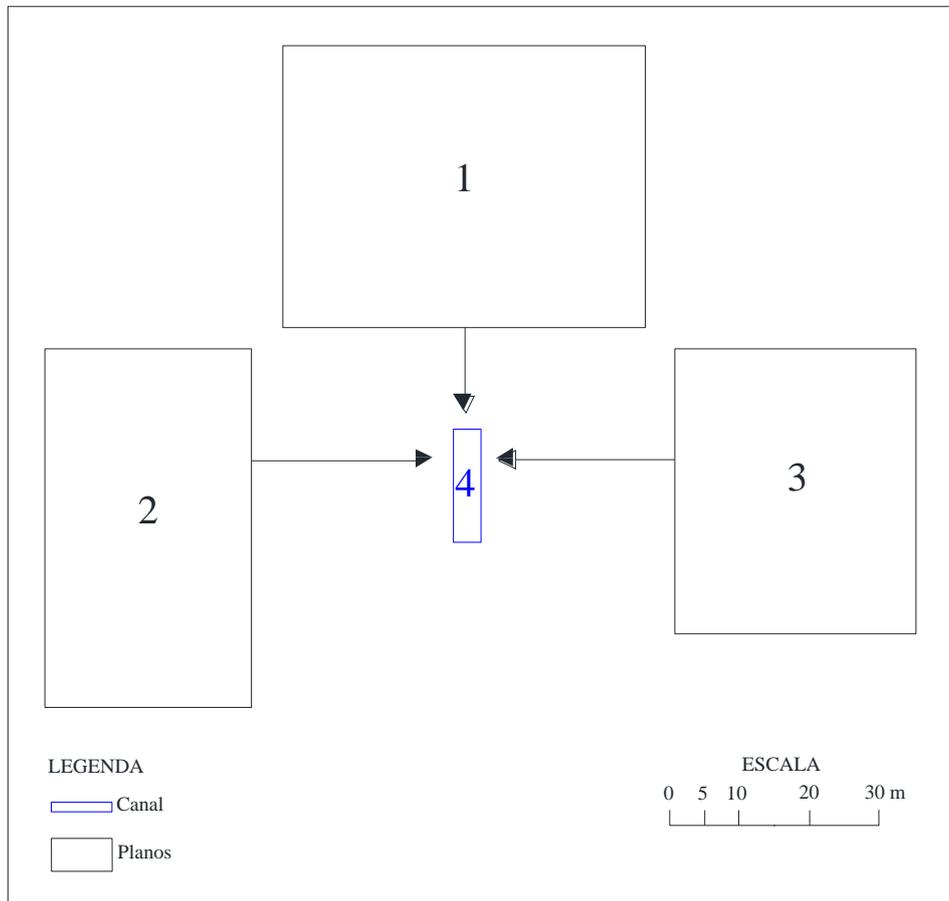


Figura 7 – Discretização n° 1: 4 elementos (3 planos e 1 canal).

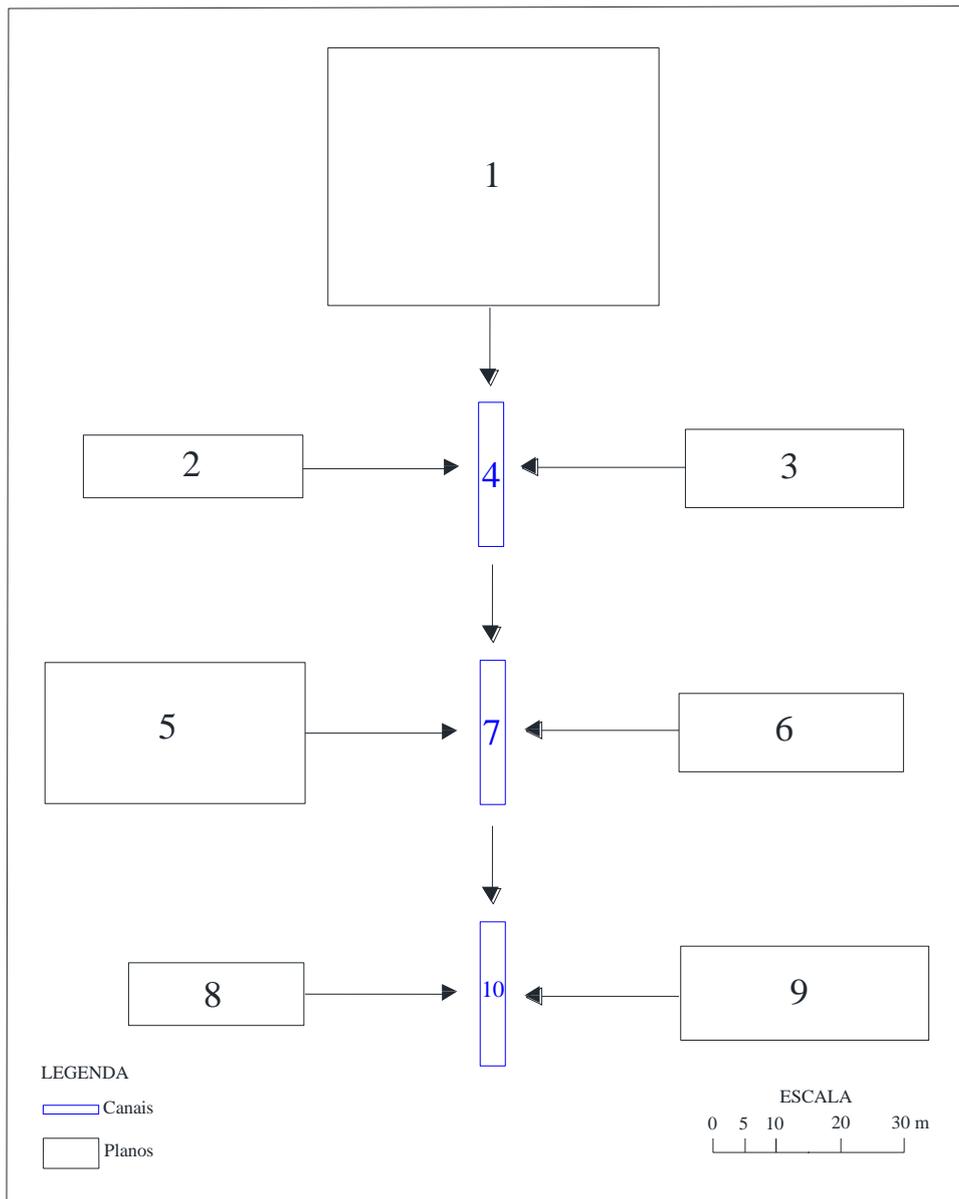


Figura 8 – Discretização n° 2: 10 elementos (7 planos e 3 canais).

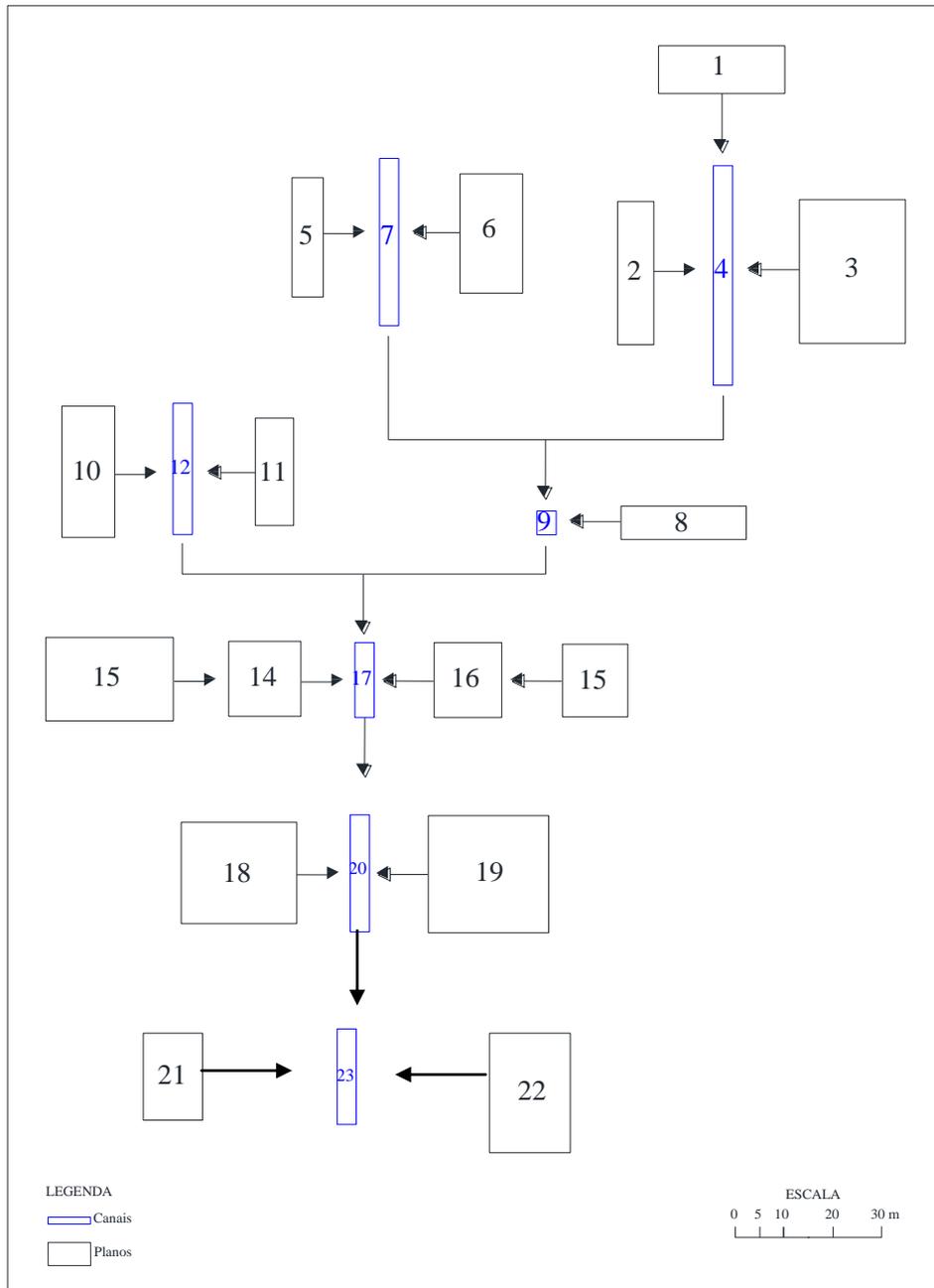


Figura 9 – Discretização n° 3: 23 elementos (16 planos e 7 canais).

Tabela 3 - Geometria da Microbacia3 (4 elementos).

Elemento	Área (m ²)	Comprimento (m)	Largura (m)	Declividade	Fundo (m)
1	2169	41,20	52,64	0,085	-
2	1573	30,00	52,43	0,090	-
3	1458	35,00	41,66	0,105	-
4	-	16,53	-	0,050	0

Tabela 4 - Geometria da Microbacia3 (10 elementos).

Elemento	Área (m ²)	Comprimento (m)	Largura (m)	Declividade	Fundo (m)
1	2166,66	41,18	52,60	0,0896	-
2	349,12	34,87	10,02	0,0936	-
3	434,45	34,67	12,52	0,0998	-
4	-	23,04	-	0,0554	0
5	931,36	41,33	22,54	0,0806	-
6	447,00	35,67	12,52	0,0903	-
7	-	23,04	-	0,0466	0
8	278,85	27,85	10,02	0,0791	-
9	592,56	39,43	15,03	0,0878	-
10	-	16,53	-	0,0665	0

Tabela 5 – Geometria da Microbacia3 (23 elementos).

Elemento	Área (m ²)	Comprimento (m)	Largura (m)	Declividade	Fundo (m)
1	262,00	10,0	26,2	0,080	-
2	225,00	7,5	30,0	0,080	-
3	662,20	22,0	30,1	0,057	-
4	-	46,0	-	0,078	0
5	162,50	6,5	25,0	0,030	-
6	325,00	13,0	25,0	0,028	-
7	-	35,0	-	0,085	0
8	182,00	26,0	7,0	0,076	-
9	-	5,0	-	0,080	0
10	302,50	11,0	27,5	0,090	-
11	180,00	8,0	22,5	0,063	-
12	-	27,5	-	0,073	0
13	463,75	26,5	17,5	0,091	-
14	235,50	15,0	15,7	0,133	-
15	206,72	13,6	15,2	0,059	-
16	219,80	14,0	15,7	0,143	-
17	-	15,7	-	0,060	0,1
18	508,80	24,0	21,2	0,071	-
19	612,50	25,0	24,5	0,080	-
20	-	24,5	-	0,049	0,1
21	223,86	12,3	18,2	0,090	-
22	378,00	16,8	2,5	0,085	-
23	-	20,0	-	0,04	0,2

4 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos no estudo. Inicialmente, é feita uma comparação entre as vazões de escoamento observadas e calculadas (Figura 10). Posteriormente, são apresentados os resultados da produção de sedimentos gerados por estes escoamentos, com o intuito de verificar o desempenho dos métodos de otimização utilizados no modelo hidrossedimentológico.

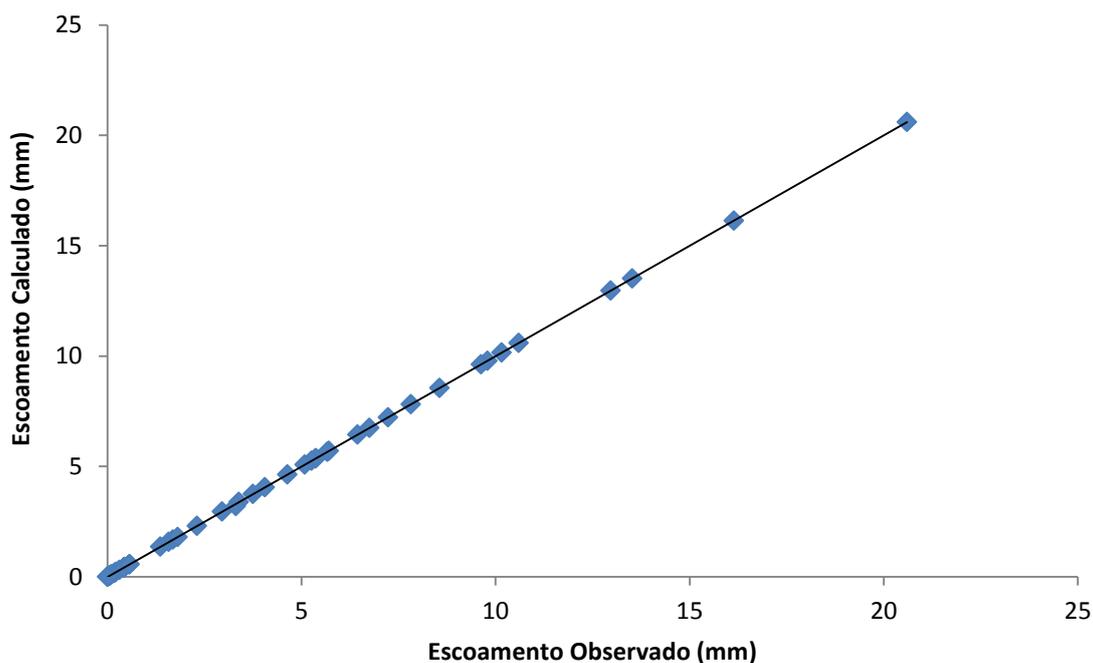


Figura 10 - Relação entre os valores da lâmina de escoamento calculado e os valores da lâmina de escoamento observado.

A calibragem do modelo WESP tem início com a calibração do parâmetro de tensão e umidade do solo (N_s). Este parâmetro está relacionado apenas com o escoamento. O parâmetro N_s foi calibrado evento por evento (Tabela 6). A sua média

não pode ser calculada, devido a sua relação e dependência com a umidade antecedente do solo. Foi escolhida a seguinte faixa de variação para o parâmetro N_s : 0,1 a 200 mm.

Os três parâmetros restantes calibrados estão relacionados com o processo de erosão, de modo que a otimização deve ser feita de acordo com o ajuste dos dados de produção de sedimentos calculados e observados. A faixa em que esses parâmetros podem variar foi escolhida da seguinte forma: a (0,0001 a 0,1 kg m²), K_R (0,1 a 10,0 kg m/N^{1.5} s), e K_I (0,1 × 10⁸ a 10,0 × 10⁸ kg s/m⁴). Na Tabela 7 são apresentados os valores médios destes parâmetros, como resultado da calibração do modelo WESP com os algoritmos de otimização em estudo. Nos Anexos temos estes valores encontrados para cada evento estudado.

A Figura 10 apresenta a correlação entre os valores da lâmina de escoamento calculado e os valores da lâmina de escoamento observado. Os valores da lâmina de escoamento calculado demonstram o ótimo resultado da calibração do parâmetro N_s . A calibração foi realizada manualmente e neste processo, dentre os 44 eventos calibrados, apenas três eventos (evento 204, 206 e 217) tiveram que ter seus valores de condutividade hidráulica (K_s) alterados, ficando igual a 2, 1 e 1, respectivamente. O ocorrido é devido ao fato que após reduzir seus valores de N_s ao máximo permitido só foi possível aumentar a vazão estimada e calibrá-la quando diminuía-se o valor de K_s .

Tabela 6 – Valores do parâmetro N_s encontrado para cada evento, levando em consideração as diferentes discretizações da microbacia.

Evento	N_s		
	Discretização1	Discretização2	Discretização3
144	0,070160000	0,069957000	0,070645000
146	0,017078000	0,017132000	0,016539000
148	0,029154000	0,029407000	0,028960000
152	0,011122900	0,011278700	0,007144700
155	0,031866000	0,031802400	0,030694300
159	0,001977200	0,001892500	0,001710000
160	0,005904000	0,005846000	0,006015000
161	0,006846300	0,006889600	0,005551000
162	0,089038000	0,088996000	0,082611000
165	0,007892000	0,007866800	0,007340000
167	0,000859000	0,000855700	0,000449700

Tabela 6 – Valores do parâmetro N_s encontrado para cada evento, levando em consideração as diferentes discretizações da microbacia (continuação).

Evento	N_s		
	Discretização^o1	Discretização^o2	Discretização^o3
168	0,005868200	0,005892600	0,004876300
171	0,005097000	0,005029000	0,004907000
172	0,005224200	0,005226400	0,004288600
174	0,005966400	0,005808000	0,004993000
177	0,005896000	0,005892100	0,003138200
178	0,016254800	0,016065000	0,012891400
179	0,014185800	0,013871000	0,011569000
183	0,013303400	0,013216100	0,011180100
184	0,001964600	0,001920000	0,001669700
186	0,032953000	0,032651600	0,030056000
187	0,006100000	0,005875500	0,003844000
190	0,004084000	0,003959200	0,003630000
191	0,002086000	0,002042900	0,001936000
194	0,012464000	0,012510000	0,012518000
197	0,012985600	0,012818000	0,010384800
198	0,005337200	0,005349600	0,002514700
200	0,014446000	0,014356000	0,014098000
204	0,000404300	0,000386200	0,000067840
205	0,001294600	0,001367000	0,001226000
206	0,000000001	0,000000001	0,000000001
210	0,000389400	0,000392800	0,000062100
216	0,002008400	0,001767900	0,001614600
217	0,000600400	0,000593000	0,000410200
223	0,004770000	0,004752000	0,004843000
228	0,000671800	0,000690700	0,000348750
229	0,015962200	0,015925400	0,012946400
239	0,000380200	0,000359050	0,000128300
246	0,007908600	0,007795000	0,005749500
250	0,003556000	0,003506000	0,003502000
253	0,003475000	0,003471800	0,002087000
254	0,010836100	0,010929000	0,010663000
263	0,020192000	0,019934000	0,019520000

Tabela 7 - Valores máximo, médio e mínimo dos parâmetros a , K_R e K_I .

		Discretização ^o 1			Discretização ^o 2			Discretização ^o 3		
		a	K_R	K_I	a	K_R	K_I	a	K_R	K_I
RPS	Máximo	0,1000	2,9336	9,8720	0,1000	2,9562	9,9640	0,1000	2,9714	9,2708
	Média	0,0113	1,6794	4,4900	0,0140	1,7613	4,6518	0,0346	2,1170	3,6600
	Mínimo	0,0003	1,0003	0,1793	0,0003	1,0011	0,1793	0,0003	1,0065	0,3958
DE	Máximo	0,0954	2,9766	7,8849	0,9000	2,9965	9,2198	0,9000	2,9998	8,3164
	Média	0,0089	1,4700	3,3705	0,0311	1,7506	4,3983	0,0413	1,8732	4,4689
	Mínimo	0,0001	1,0000	0,1035	0,0001	1,0000	0,1010	0,0001	1,0000	0,1011

Conforme dito anteriormente, foram utilizadas duas rotinas para a calibração automática dos parâmetros de erosão do modelo hidrossedimentológico WESP, a rotina RPS e a rotina DE. Os resultados deste estudo são apresentados a seguir.

4.1 Resultados da calibração com o método de otimização RPS

A comparação visual da produção de sedimentos simulados com os valores observados foi realizada com base nas Figuras 11, 12 e 13. Observando os gráficos destas figuras nota-se a *Linha de Igualdade*, a partir da qual é possível constatar eventos que tiveram a produção de sedimentos superestimada ou subestimada.

Na Figura 11 encontra-se a calibração do modelo com o algoritmo RPS, levando em consideração a configuração da microbacia com a primeira discretização proposta, dividida em 4 elementos. É possível observar que houve uma superestimação para a produção de sedimentos em nove eventos simulados. Também ocorreu uma subestimação do valor simulado para um evento, não visível no gráfico devido seu valor de produção de sedimento ser pequeno em relação à maioria dos eventos. O evento mencionado é o evento 160, que teve sua produção de sedimento observada em 10,14 kg/ha e sua produção calculada igual a 5,76 kg/ha, este valor calculado teria sido maior se o escoamento observado fosse maior.

O mesmo justifica os eventos que tiveram seus valores de produção de sedimento superestimados, nestes casos de forma inversa. Se estes eventos tiverem seus valores de escoamento reduzidos, a produção de sedimento será menor, o que diminuiria a superestimação. Como mencionado anteriormente, a confiabilidade dos dados coletados é importante para evitar alguns erros na modelagem.

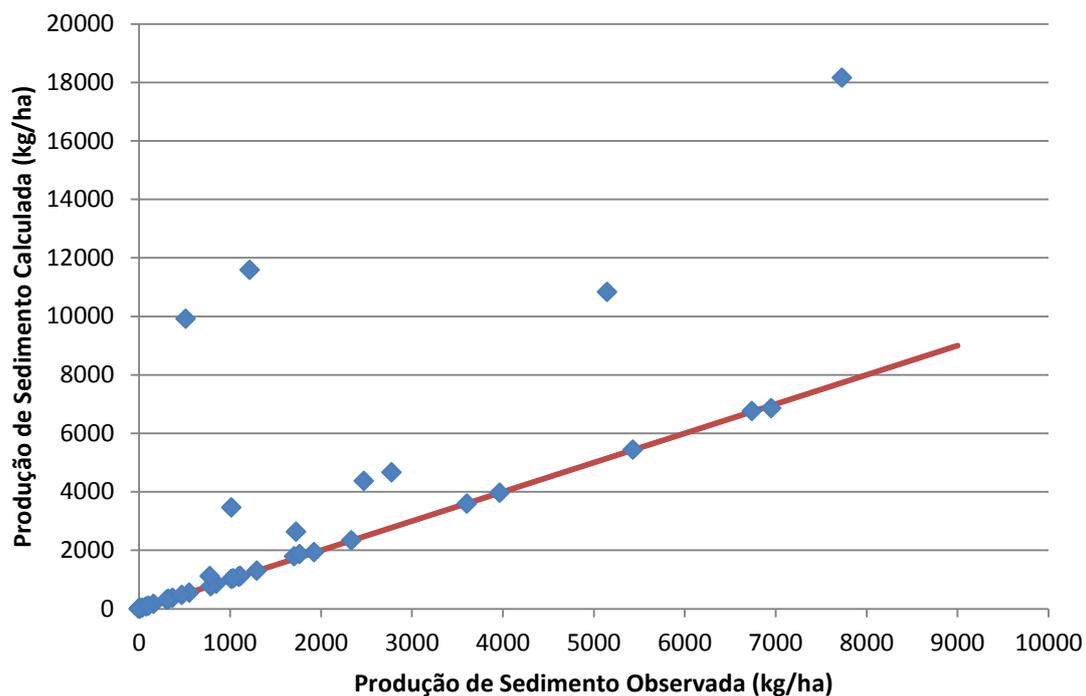


Figura 11 - Relação entre os valores de produção de sedimento observada com os valores calculados para a discretização da bacia com 4 elementos e utilizando o algoritmo RPS.

É possível observar na Figura 12 que houve uma menor superestimação para a produção de sedimento dos eventos calibrados, quando apenas dois eventos tiveram seus valores superestimados. Novamente o evento 160 foi o único a ter seu valor calculado subestimado. A maioria dos valores simulados ficou próximo, ou exatamente sobre a *Linha de Igualdade*, resultado de uma calibração mais precisa.

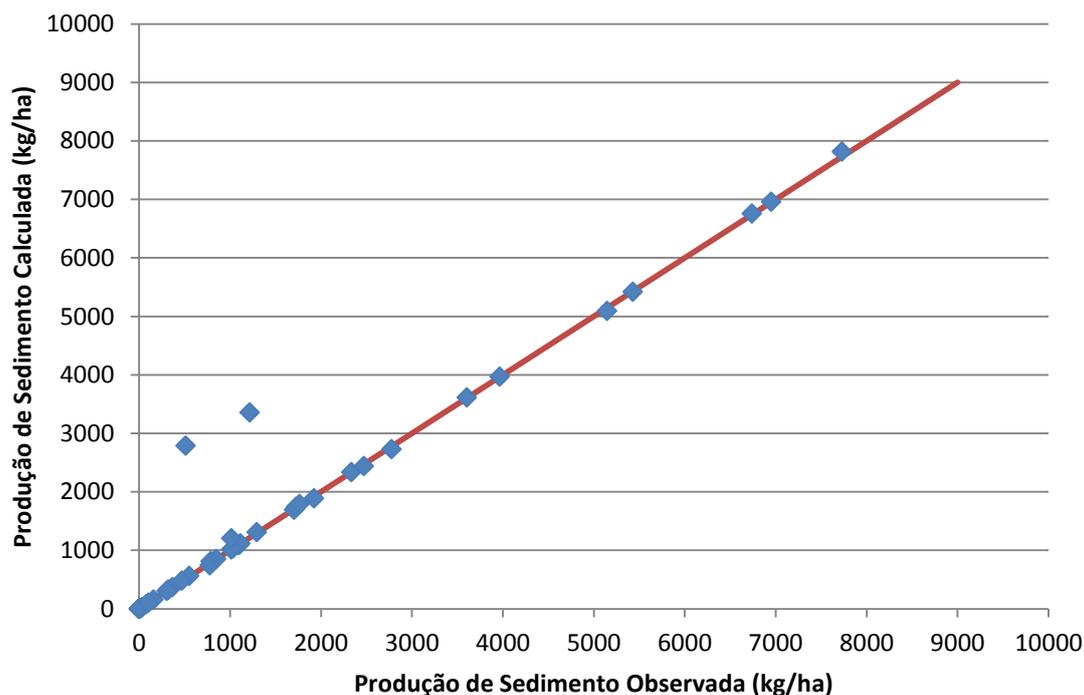


Figura 12 - Relação entre os valores de produção de sedimento observada com os valores calculados para discretização da bacia com 10 elementos e utilizando o algoritmo RPS.

Pode-se observar que com a discretização da microbacia em 10 elementos, os resultados apresentaram menos eventos com valores calculados superestimados ou subestimados. Uma melhor calibração dos eventos também é possível quando a discretização da microbacia é bem representativa. Caso esta discretização seja pouco ou muito detalhada, aumenta as incertezas na calibração dos eventos.

Na Figura 13 temos os resultados da calibração do modelo utilizando o algoritmo RPS, levando em consideração uma discretização mais detalhada da microbacia, com 23 elementos. Observa-se que não ocorreu superestimação nos valores simulados, como ocorrido anteriormente; entretanto, cinco eventos tiveram seus valores simulados subestimados. Além do evento 160, que teve seu valor subestimado nas duas calibrações anteriores, os eventos 146, 191, 194 e 200 também tiveram seus valores de produção de sedimento subestimados.

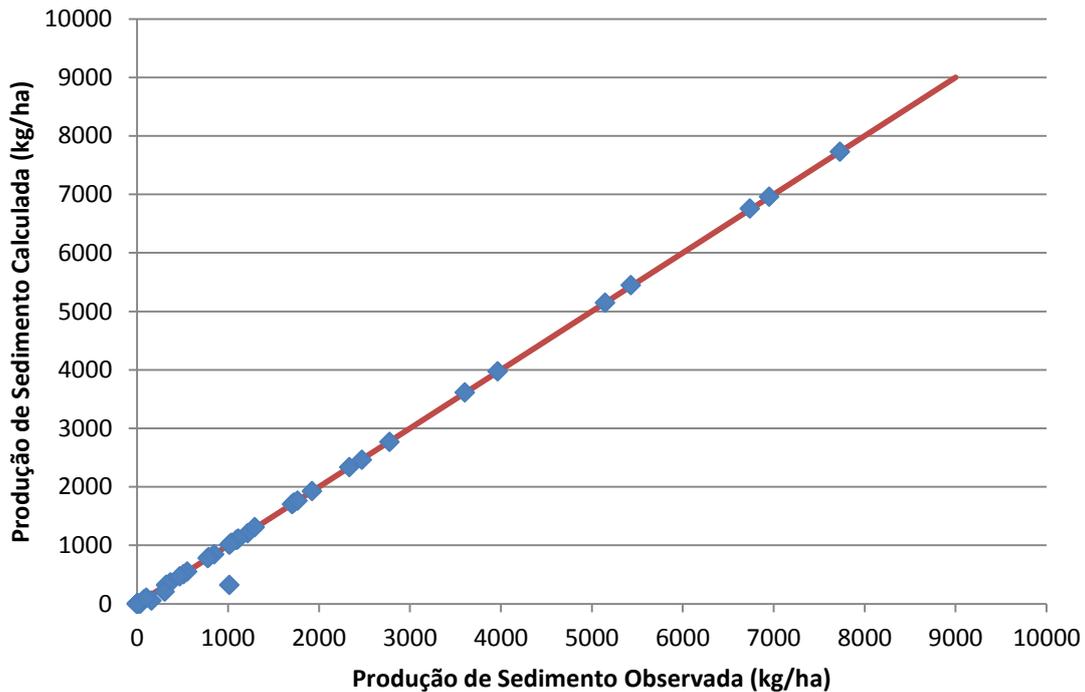


Figura 13 - Relação entre os valores de produção de sedimento observada com os valores calculados para discretização da bacia com 23 elementos e utilizando o algoritmo RPS.

4.2 Resultados da calibração com o método de otimização DE

Para comparar o desempenho da calibração automática utilizando o algoritmo DE, também são expostos os gráficos com a correlação entre os valores observados e calculados para a produção de sedimentos com este modelo. É importante destacar que ao iniciar a calibração destes eventos, o programa WESP superestimava os dados utilizados, provocando o cancelamento operacional do sistema. Então, dos 44 eventos selecionados para a calibração do modelo, apenas 31 eventos foram simulados com a discretização da microbacia com 4 e 10 elementos. Com a terceira discretização (23 elementos) foram simulados 32 eventos, apenas um evento a mais que nos casos anteriores.

É possível observar na Figura 15 que houve tanto superestimação como subestimação nos valores simulados. A produção de sedimentos foi superestimada para seis eventos e teve apenas um evento em que seu resultado foi subestimado.

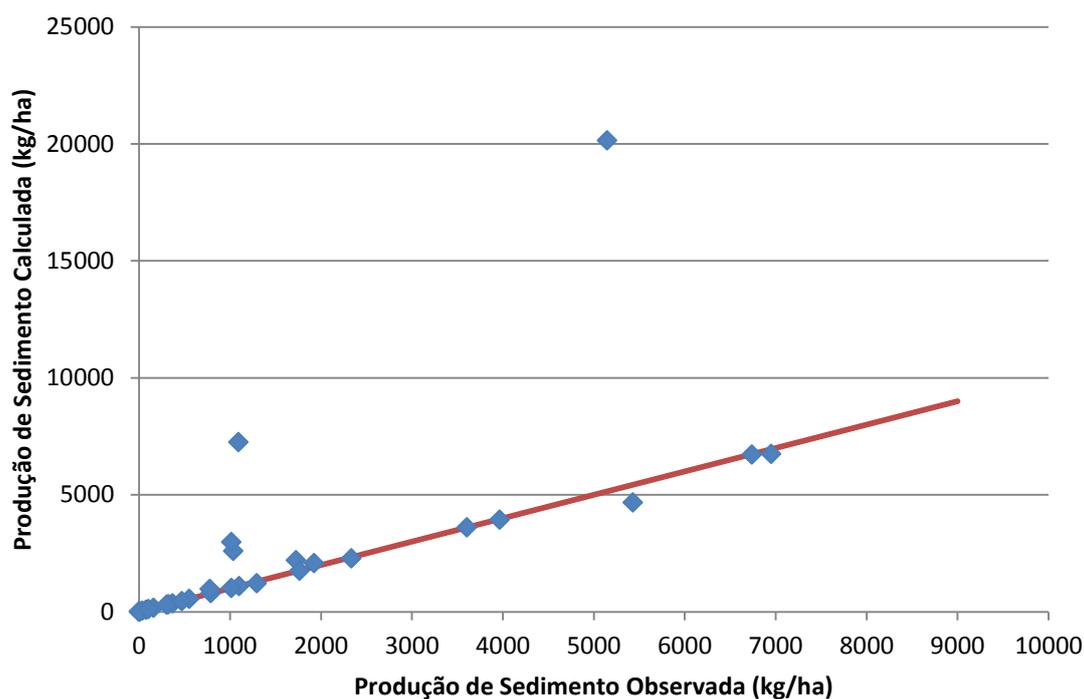


Figura 15 - Relação entre os valores da produção de sedimento observada com os valores calculados para a discretização da bacia com 4 elementos e utilizando o algoritmo DE.

Na Figura 16, temos os resultados da calibração do modelo utilizando o algoritmo DE, levando em consideração a microbacia discretizada em 10 elementos. Visualmente é possível observar também que houve eventos superestimados e subestimados. Nesta simulação, diferentes eventos foram superestimados em comparação à calibração anterior. Apenas um evento teve sua produção de sedimento simulada superestimada, ficando relativamente mais afastado da *Linha de Igualdade*.

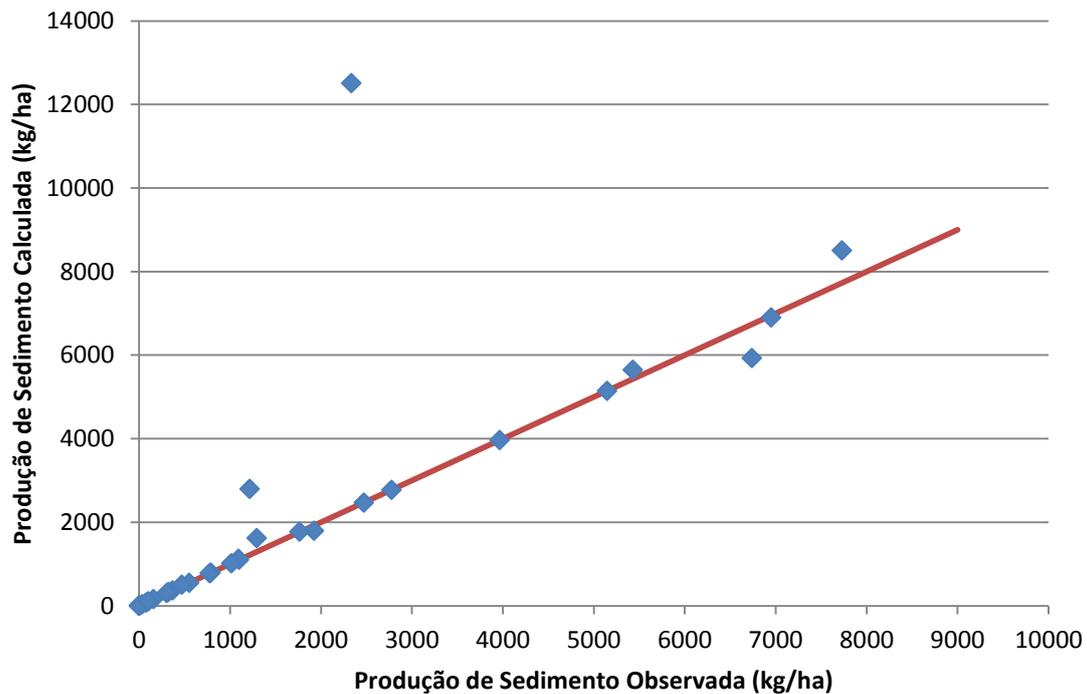


Figura 16 - Relação entre os valores da produção de sedimento observada com os valores calculados para a discretização da bacia com 10 elementos e utilizando o algoritmo DE.

Observando a Figura 17, é possível constatar que nesta calibração também ocorreram eventos superestimados e subestimados. Valores que nas calibrações anteriores tinham sido calibrados corretamente, neste caso foram superestimados ou subestimados. Apenas um evento ficou abaixo da *Linha de Igualdade*, os outros eventos que também não tiveram bons resultados simulados ficaram acima desta linha, diminuindo a precisão da calibração.

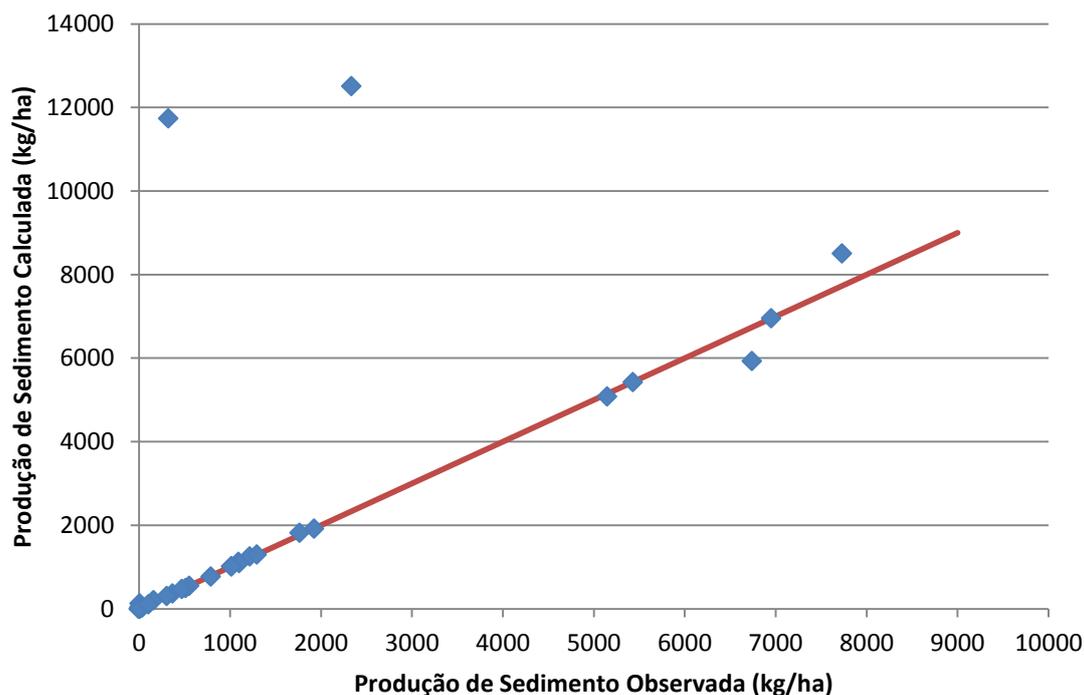


Figura 17 - Relação entre os valores da produção de sedimento observada com os valores calculados para a discretização da bacia com 23 elementos e utilizando o algoritmo DE.

Para finalizar a comparação do desempenho das técnicas de otimização utilizadas na calibração do modelo WESP, também são apresentados os gráficos a seguir (Figuras 18–26), que mostram simultaneamente os resultados da produção de sedimento calculada para cada evento.

Tendo em mente facilitar a visualização dos dados, os eventos foram separados em três faixas de produção de sedimento. Na primeira, são apresentados apenas os eventos que tiveram uma produção de sedimento até 10 kg/ha. Na segunda faixa de classificação, foram utilizados os eventos que ficaram com sua produção acima de 10 kg/ha e menor que 1000 kg/ha. Por último, foram utilizados os demais eventos, onde a produção de sedimento observada foi superior a 1000 kg/ha.

Na Figura 18, são apresentados oito eventos que tiveram seus valores de produção de sedimento menor ou igual a 10 kg/ha. Com exceção do evento 160, cujo resultado foi subestimado, os demais eventos obtiveram uma boa calibração com o algoritmo RPS, com alguns resultados exatos e outros com uma precisão próxima aos valores calculados.

Vale destacar que a calibração do modelo com o algoritmo DE não foi realizada para os eventos 148, 160, 171 e 223. Entre os eventos simulados, os que não obtiveram resultados iguais aos observados, foram superestimados. Mas, como ocorrido na simulação com o RPS, na simulação com o DE estes resultados também apresentam uma boa precisão com os valores calculados.

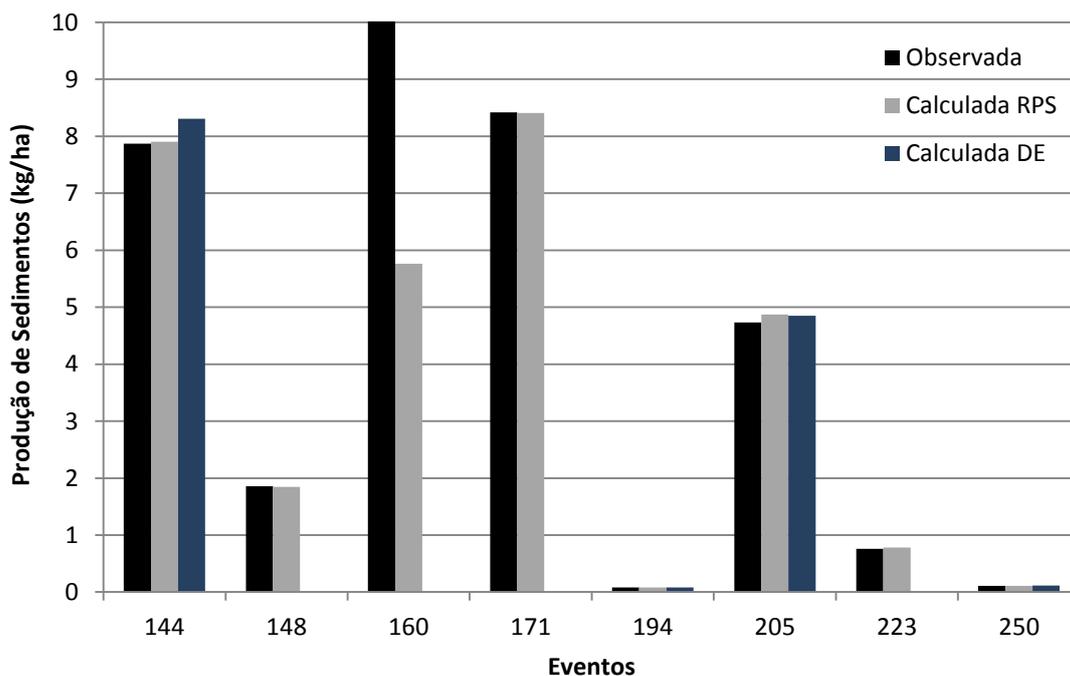


Figura 18 - Comparação entre os valores observados da produção de sedimentos menores ou iguais a 10 kg/ha com os calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 4 elementos).

Na Figura 19, podem ser observados 14 eventos com seus valores de produção de sedimento entre 10 e 1000 kg/ha. Os valores encontrados na calibração com o algoritmo RPS, na sua maioria, tiveram resultados iguais aos valores observados, e apenas dois eventos foram subestimados, mas estes mantiveram uma precisão aceitável, e dois eventos foram superestimados.

Ainda na Figura 19, entre os 14 eventos calibrados com o algoritmo DE, três eventos ficaram de fora, não sendo simulados. Dos eventos calibrados, apenas um evento teve sua produção de sedimento superestimada, fato este que também foi observado quando calibrado com o algoritmo RPS. Para os demais eventos, considera-

se uma ótima precisão nos resultados simulados, e alguns apresentaram valores iguais aos simulados.

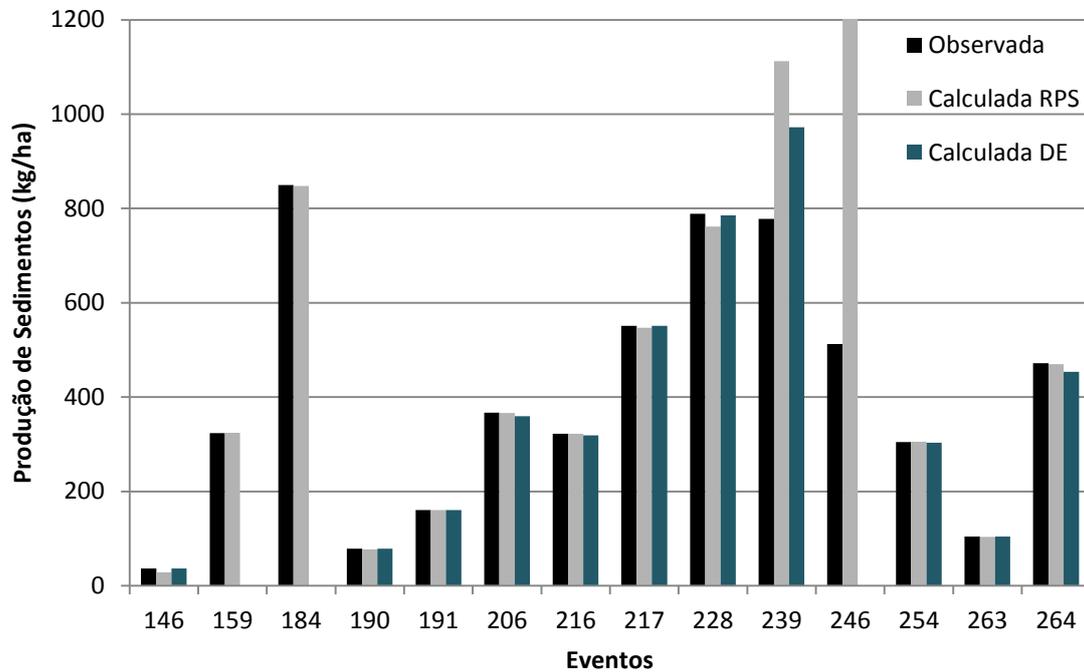


Figura 19 - Comparação para os valores observados da produção de sedimentos entre 10 e 1000 kg/ha com os calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 4 elementos).

O intervalo com os eventos que apresentaram valores observados maiores que 1000 kg/ha de sedimento reúne a maioria dos eventos simulados. Na Figura 20 estão 22 eventos com a produção de sedimento observada maior que 1000 kg/ha. Ao serem calibrados com o algoritmo RPS, sete eventos tiveram seus resultados simulados superestimados, não sendo considerado um bom resultado. Nenhum evento foi subestimado, ao ponto de ser avaliado como insatisfatório. Mas, na sua maioria dos 22 eventos, 17 obtiveram resultados simulados satisfatórios, ou seja, quando não foram precisos foram exatos em seus valores estimados.

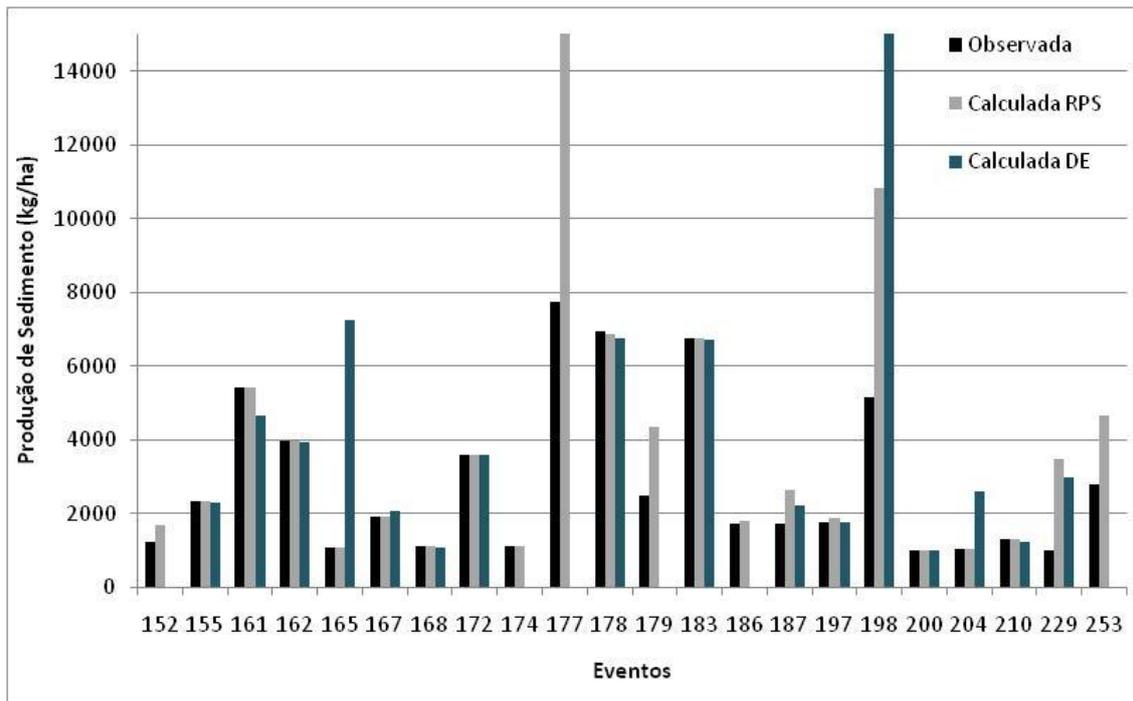


Figura 20 - Comparação entre os valores observados da produção de sedimentos maiores que 1000 kg/ha com os calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 4 elementos).

Quando o modelo WESP foi calibrado com o algoritmo DE, teve mais seis eventos que não foram possíveis de serem utilizados, foram eles: eventos 152, 174, 177, 179, 186 e 253. Entre os eventos calibrados com este algoritmo, 10 eventos apresentaram os valores simulados precisos em relação aos valores observados. Dos seis eventos que não atingiram bons resultados, cinco tiveram seus valores simulados superestimados e um foi subestimado.

Como mostra a Figura 21 com a calibração com o algoritmo RPS, o evento 3 teve seu valor simulado subestimado, uma subestimação maior que na calibração anterior quando a bacia foi discretizada com 4 elementos. Os demais eventos obtiveram uma boa calibração, ficando os resultados exatos ou com uma precisão aceitável em relação aos valores observados. Dos resultados da calibração com o modelo utilizando o algoritmo DE, todos os eventos que foram simulados apresentaram seus valores iguais aos observados, resultado de uma boa calibração. Entretanto, com a metade dos eventos em questão não foi possível simular com o modelo.

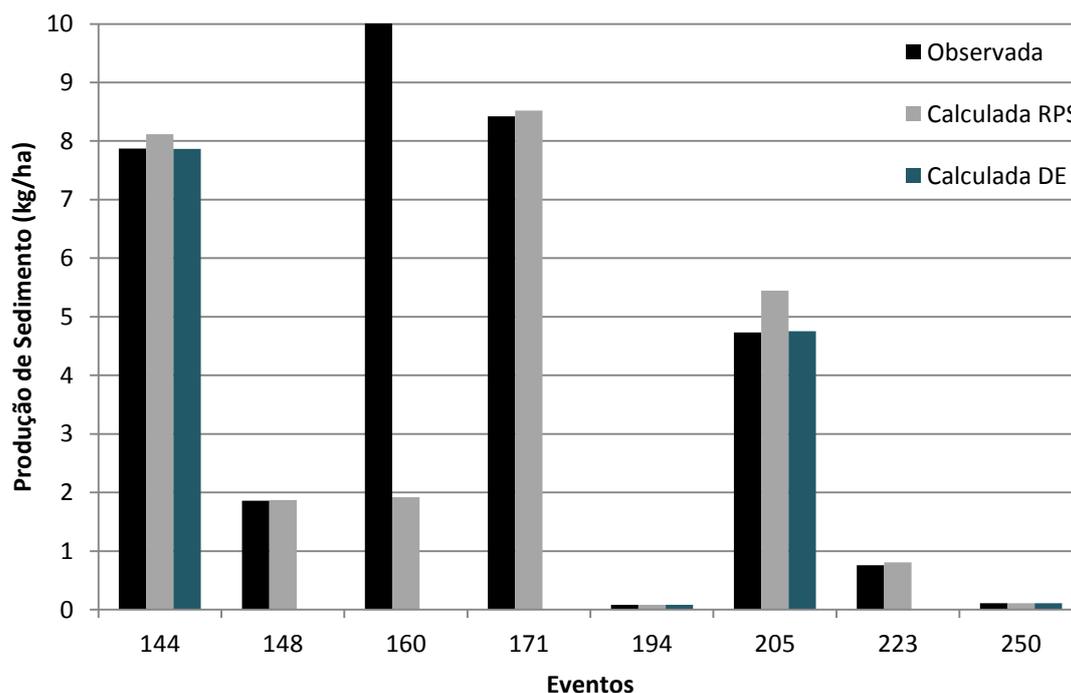


Figura 21 - Comparação entre os valores observados da produção de sedimentos menores ou iguais a 10 kg/ha com os calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 10 elementos).

Na Figura 22, dos valores simulados na calibração do modelo WESP com o algoritmo RPS, a maioria obteve a exatidão com os valores observados, poucos foram subestimados ou superestimados, mas estes mantiveram uma precisão aceitável. Apenas um evento foi superestimado ao ponto do resultado não ser considerado satisfatório. Ainda na Figura 22, observa-se que com a calibração sendo realizada com o algoritmo DE, dentre os 14 eventos, três eventos ficaram de fora da simulação, os mesmos eventos que também não foram considerados no modelo WESP com a discretização em 4 elementos. Dos eventos calibrados, todos apresentaram uma ótima precisão em seus resultados simulados, e alguns também obtiveram a exatidão nos valores simulados.

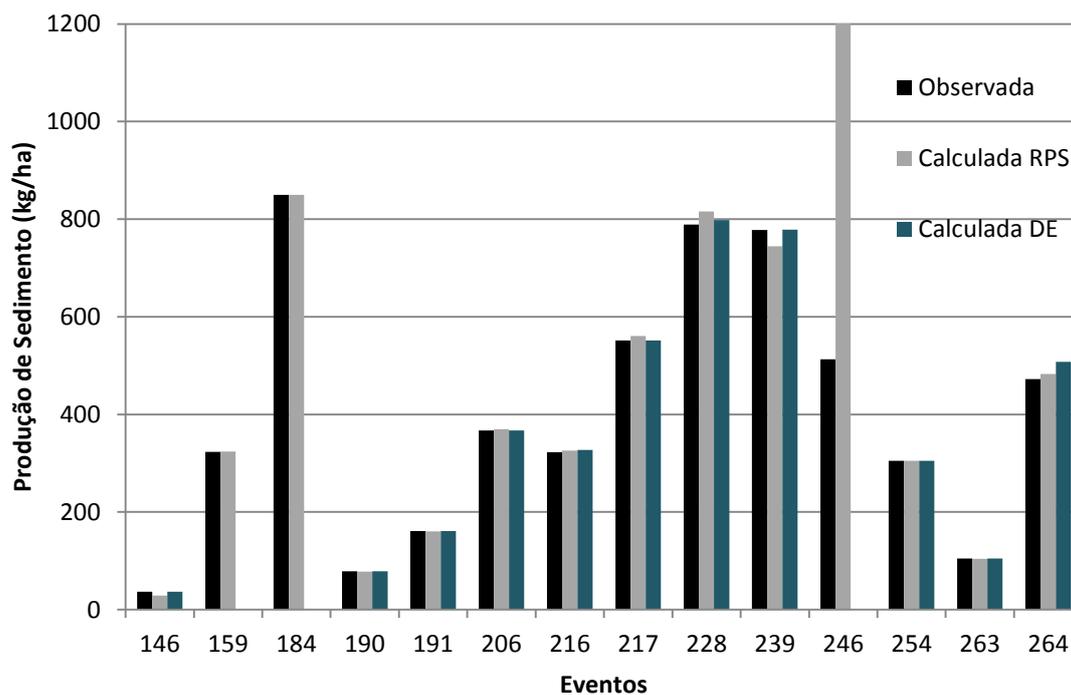


Figura 22 - Comparação entre os valores observados da produção de sedimentos entre 10 e 1000 kg/ha com os calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 10 elementos).

O gráfico da Figura 23 representa os eventos com a produção de sedimento observado maior que 1000 kg/ha. Ao ser calibrado com o algoritmo RPS, apenas um evento teve seu resultado simulado superestimado, um número bem menor do que foi encontrado na simulação com a discretização da microbacia em 4 elementos. Nenhum evento foi subestimado, que poderia levar a um resultado insatisfatório. Dos 22 eventos, 21 obtiveram resultados simulados satisfatórios, sendo precisos e até mesmo exatos aos valores simulados.

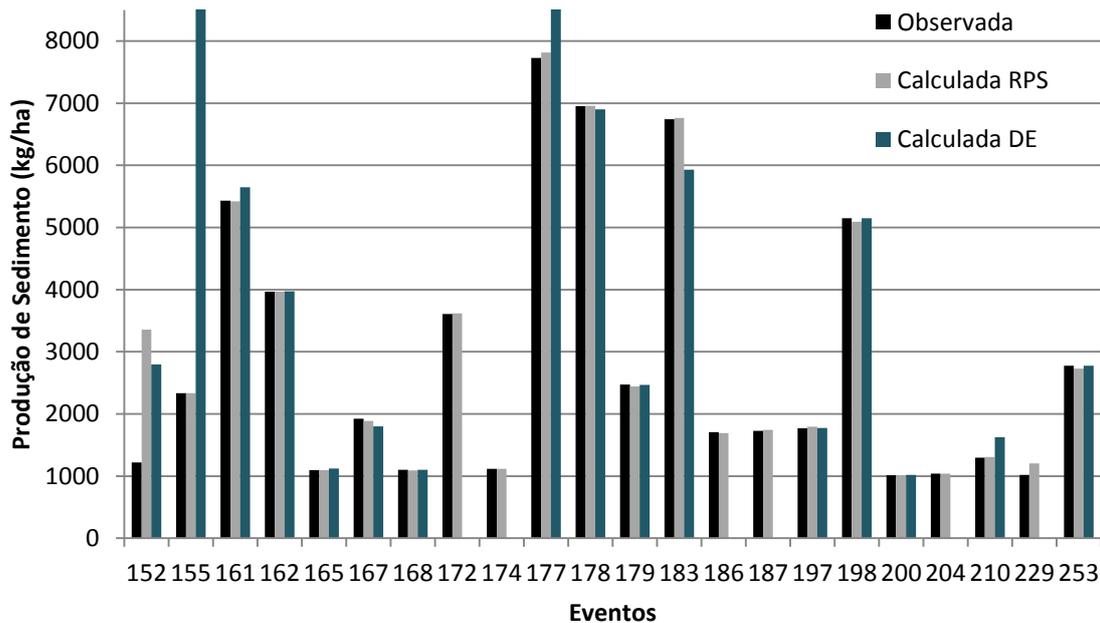


Figura 23 - Comparação entre os valores observados da produção de sedimentos maiores que 1000 kg/ha com os calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 10 elementos).

Já quando o modelo foi calibrado com o algoritmo DE, seis eventos não foram possíveis de serem utilizados, mas foram eventos diferentes: apenas os eventos 174 e 186 foram iguais, os outros foram os eventos 172, 187, 204 e 229. Entre os eventos calibrados com este algoritmo, 11 eventos apresentaram os valores simulados precisos em relação aos valores observados. Dos cinco eventos que não atingiram bons resultados, quatro foram por ter superestimados seus valores simulados e um por subestimá-lo.

Os resultados da calibração do modelo WESP utilizando a discretização mais detalha da microbacia são apresentados inicialmente com a Figura 24. Nesta figura, há oito eventos que tiveram seus valores de produção de sedimento observada menor ou igual a 10 kg/ha. Calibrando o modelo com o algoritmo RPS, a metade dos eventos teve seus valores de produção de sedimento estimados iguais aos calculados e os demais eventos tiveram seus resultados estimados subestimados. Observa-se que nos eventos 160, 194 e 250 não é possível visualizar seus valores estimados, devido ao valor calculado ter sido muito pequeno.

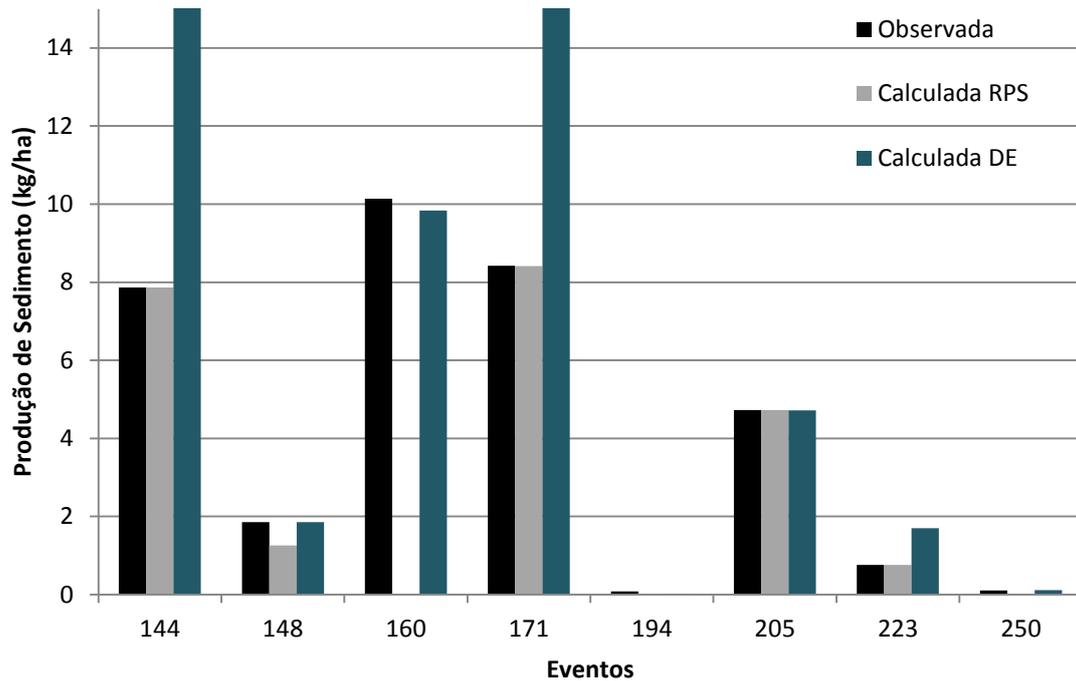


Figura 24 - Comparação entre os valores observados da produção de sedimentos menores ou iguais a 10 kg/ha com os calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 10 elementos).

Diferente do ocorrido na modelagem com as discretizações da microbacia anteriormente utilizadas, com o algoritmo DE todos os eventos foram calibrados. Para tal, tem-se apenas três eventos com os valores estimados iguais aos observados. Dois eventos foram subestimados, mas apenas um deles teve uma precisão aceitável. Os demais eventos mostrados na Figura 24 superestimaram os valores observados.

De acordo com a Figura 25, os valores encontrados na calibração com o algoritmo RPS, 11 eventos tiveram uma excelente precisão com os valores observados. Apenas três eventos foram subestimados, e não mantiveram uma precisão aceitável.

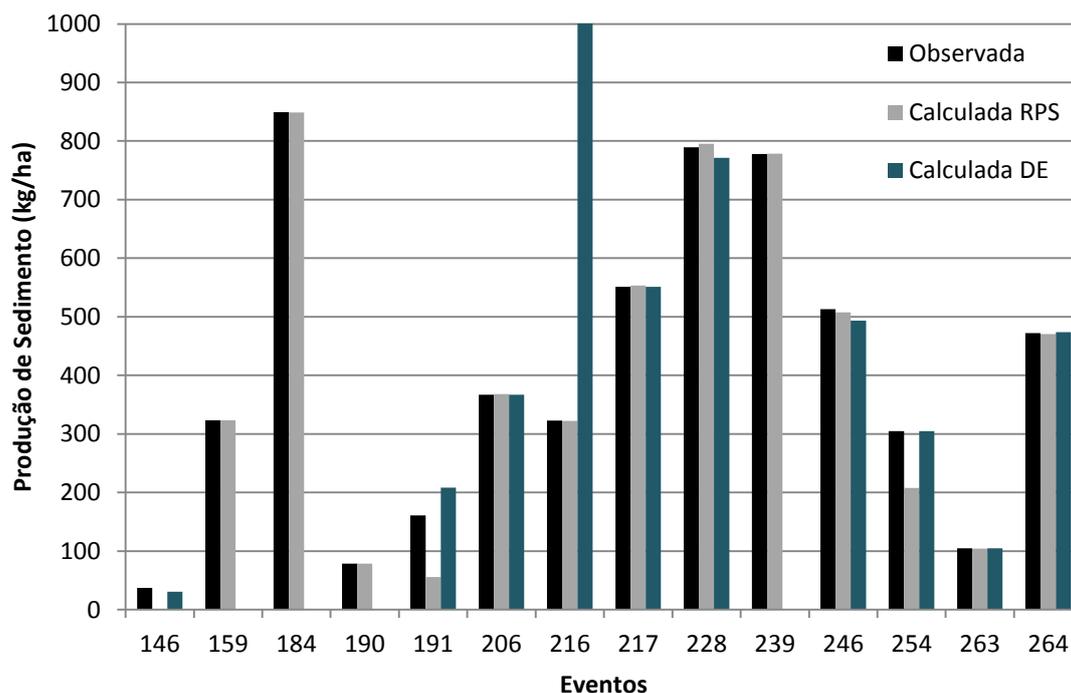


Figura 25 - Comparação entre os valores observados da produção de sedimentos entre 10 e 1000 kg/ha com os calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 10 elementos).

Ainda na Figura 25, entre os 14 eventos calibrados com o algoritmo DE, quatro eventos ficaram de fora, não sendo simulados. Dos eventos calibrados, apenas dois eventos não apresentaram bons resultados, pois tiveram sua produção de sedimento superestimada. Para os demais eventos, considera-se uma ótima precisão dos resultados simulados. Entre estes, três eventos obtiveram a exatidão em seus valores simulados.

Na Figura 26, observa-se que ao serem calibrados com o algoritmo RPS, apenas um evento teve seu resultado simulado subestimado, um número bem menor do que o encontrado na simulação com as discretizações da microbacia com 4 e 10 elementos. Nenhum evento foi superestimado, que poderia levar a um resultado insatisfatório. Dos 22 eventos, 21 obtiveram resultados simulados satisfatórios. Apesar de não serem exatos, os valores simulados tiveram uma precisão excelente com os valores observados.

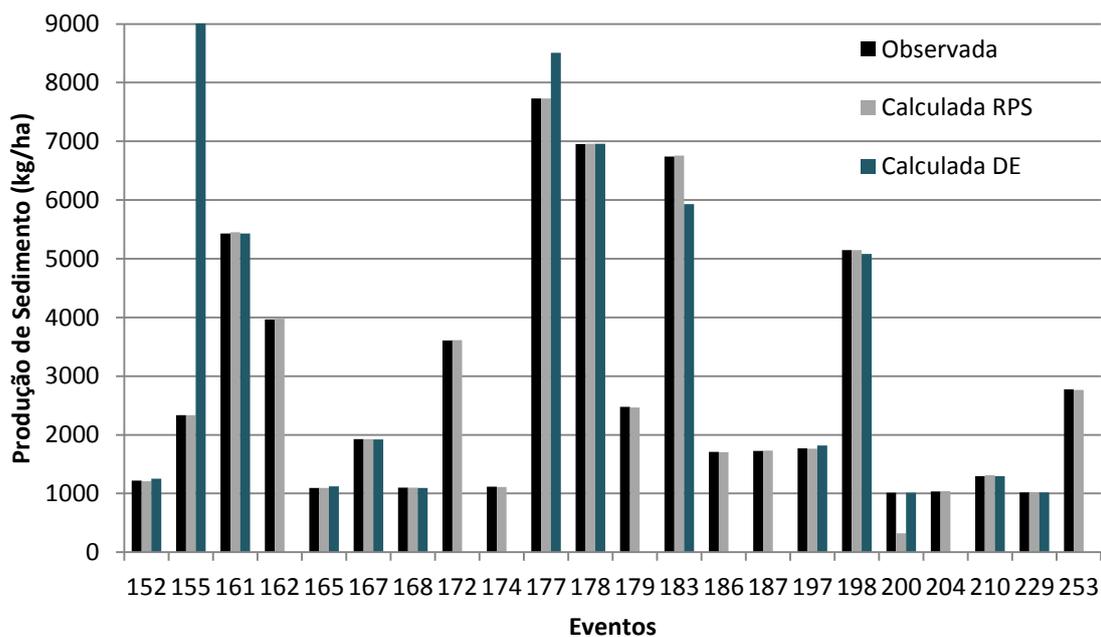


Figura 26 - Comparação entre os valores observados da produção de sedimentos maiores que 1000 kg/ha com os valores calculados com os algoritmos RPS e DE (discretização em 10 elementos).

Quando o modelo foi calibrado com o algoritmo DE, também teve eventos que não foram possíveis de serem utilizados, entretanto, numa quantidade bem menor do que ocorreu com as discretizações anteriores, contando com apenas oito eventos. Entre os eventos calibrados com este algoritmo, 11 eventos apresentaram os valores simulados precisos em relação aos valores observados. Dos três eventos que não atingiram bons resultados, dois foram por ter superestimado os valores observados e um por subestimá-lo demais.

5 CONCLUSÃO

Neste estudo, foram avaliadas duas técnicas de calibração automática, os métodos RPS e DE. O principal objetivo consistiu na calibração dos parâmetros do modelo hidrossedimentológico WESP para três diferentes configurações da microbacia³, que está localizada na Bacia Experimental de Sumé. Foram avaliadas suas capacidades em convergir na busca de três parâmetros simultaneamente, visando o melhor conjunto possível destes parâmetros que satisfaçam o modelo. As conclusões sobre o estudo foram as seguintes:

Dentre os dois algoritmos utilizados, o DE mostrou ser o mais lento na busca de parâmetros otimizados. A rotina com o DE apresentou uma maior necessidade de iterações para encerrar sua busca. Com este algoritmo o modelo WESP não rodou para alguns eventos selecionados;

Já o algoritmo RPS apresentou muito boa eficiência e eficácia para a busca dos parâmetros, tornando-se assim uma boa alternativa para o problema de otimização da calibração do modelo WESP. O método RPS gerou dados simulados mais próximos dos dados observados;

Apesar dos resultados do escoamento superficial serem iguais para todas as discretizações, nota-se uma pequena, mas perceptível, variação nos valores do potencial de capilaridade N_s do modelo, dependendo da discretização da bacia, o qual deve ser calibrado para cada evento;

As diferentes configurações da microbacia melhoram os resultados da simulação. O modelo WESP com ambas as rotinas de otimização obteve um melhor desempenho quando utilizou a discretização com 10 elementos;

A discretização da microbacia com 10 elementos apresentou seus melhores resultados quando calibrada com o algoritmo RPS, situação em que ocorreu a menor superestimação e subestimação na produção de sedimentos.

Um ponto que necessita de mais verificação está na integração do método de otimização DE com o modelo WESP. As calibrações realizadas com este algoritmo mostraram que houve ocasiões em que o modelo WESP não pôde ser executado com alguns dos eventos selecionados. Assim, novos testes de calibração devem ser realizados para verificar se haveriam ganhos significativos. Por fim, deve-se investigar a eficácia e desempenho do modelo WESP com outras técnicas de otimização, na busca de tornar o trabalho mais simples, principalmente para gestores ambientais leigos na parametrização exigida para modelagem hidrossedimentológica.

6 REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. I.; MAIA, S. M. F.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; FILHO, J. A. A. **Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE.** *Revista Ciência Agronômica*. vol.37, n.3, p.270-278, 2006.

ARAGÃO, R. **Estimativa dos Parâmetros do Modelo Distribuído WESP com os Dados da Bacia Experimental de Sumé - PB.** Campina Grande, Paraíba: 147f. 2000. (Dissertação em Engenharia Civil / UFPB)

BICALHO, C. C. **Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Descoberto.** Brasília, Distrito Federal: 142f. 2006. (Dissertação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos / FT / UnB)

BLASONE, R. -S.; MADSEN, H.; ROSBJERG, D. **Parameter estimation in distributed hydrological modelling: comparison of global and local optimisation techniques.** *Hydrology Research*. vol. 38, n.4-5, pp. 451-476, 2007.

BRAVO, J. M.; ALLASIA, D. G.; COLLISCHONN, W.; TASSI, R.; MELLER, A.; TUCCI, C. E. M. **Avaliação visual e numérica da calibração do modelo hidrológico IPH II com fins educacionais.** Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo - SP, 2007.

BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. **Verificação da eficiência e eficácia de um algoritmo evolucionário multi-objetivo na calibração automática do modelo hidrológico IPH II.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v.14, n.3, Jul/Set, 37-50, 2009.

CARMO, K. M. L. **Métodos de otimização global aplicados na busca dos parâmetros SRC.** Belém, Pará: 78f. 2004. (Dissertação em Geofísica / CG / UFPA)

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais.** São Paulo, Edgard Blucher, 1999.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. **Ajuste multi-objetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v 8, n 3, p. 27-39, 2003.

DAVI, H. H. R. C. **Um modelo para simulação hidrossedimentológica em pequena escala.** Campina Grande, Paraíba: 119p. 2004. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental / DEC / CCT / UFCG)

DONIGIAN, A. S. **Watershed model calibration and validation: The HSPF experience.** *Proceedings of the Water Environment Federation*, National TMDL Science and Policy, 30: pp. 44-73, 2002.

FRAGOSO, M. M. A. **Estudo hidrológico e de transporte de sedimentos em uma bacia do bioma cerrado: bacia do córrego Capão Comprido.** Brasília, Distrito Federal: 102p. 2008. (Dissertação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos / FT / UnB).

GALVÃO, C. O. **Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo em Microbacias.** Campina Grande, Paraíba: 185p. 1990. (Dissertação em Engenharia Civil / UFPB).

GREEN, W. H. & AMPT, G. A. **Studies on Soil Physics, 1. The Flow of Air and Water Through Soils.** Journal Agr. Sci., 4(1): 1-24. 1911.

KAMALI, M. **Calibration of Hydrologic Models Using Distributed Surrogate Model Optimization Techniques: A WATCLASS Case Study.** Ontario, Canada: 136f. 2009. (Thesis in Systems Design Engineering / University of Waterloo)

LINO, J. F. L. **Análise da dinâmica hidrossedimentológica da bacia hidrográfica do Rio Preto (SC) com o modelo SWAT.** Florianópolis, Santa Catarina: 150f. 2009. (Dissertação em Engenharia Ambiental / DESA / UFSC)

LIMA, J. E. F. W. ; SILVA, E. M. da. **Seleção de modelos para o traçado de curvas granulométricas de sedimentos em suspensão em rios.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, p. 101-107, 2007.

LOPES, N. H. Y. **Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT.** Florianópolis, Santa Catarina: 154f. 2008. (Dissertação em Engenharia Ambiental / DESA / UFSC)

Lopes, V. L. **A numerical model of watershed erosion and sediment yield.** Tucson, PhD Dissertation, University of Arizona, EUA. 1987.

LOPES, W. T. A. **Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semi-árida da Paraíba.** Campina Grande, Paraíba: 196f. 2003. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental / DEC / CCT / UFCG)

LUBITZ, E. **Avaliação da aplicação do modelo hidrológico SWAT à bacia do Ribeirão Concórdia - Lontras, SC.** Blumenau, Santa Catarina: 125f. 2009. (Dissertação em Engenharia Ambiental / FURB)

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** Piracicaba, São Paulo: p.154, 2002. (Tese em Agronomia / ESALQ / USP)

MACLEAN, A. J. **Calibration and analysis of the MESH Hydrological Model applied to Cold Regions.** Ontario, Canada: 129f. 2009. (Master in Applied Science in Civil Engineering / Civil and Environmental Engineering / University of Waterloo)

MADSEN, H.; WILSON, G.; AMMENTORP, H. C. **Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models.** *Journal of Hydrology.* vol.261, p.48-59, 2002.

MALUTTA, S. **Aplicação do modelo SWAT na bacia do rio Negrinho – SC.** Florianópolis, Santa Catarina: 97f. 2010. (Monografia em Engenharia Sanitária e Ambiental / CT / UFSC)

MEIN, R. G. & LARSON, C. L. **Modeling Infiltration During a Steady Rain.** *Water Resources Research.* 9(2): 384-394.1973.

MULETAA, M. K.; NICKLOW, J. W. **Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model.** *Journal of Hydrology.* vol.306, p.127–145, 2005.

NASCIMENTO, L. S. V.; REIS JR., D. S.; MARTINS, E. S. P. R. **Avaliação do Algoritmo Evolutivo MOPSO na Calibração Multiobjetivo do Modelo SMAP no Estado do Ceará.** *Revista Brasileira de Recursos Hídricos.* vol.14, n.1, p.85-97, 2009.

NETO, J. G. C.; SRINIVASAN, V. S.; RUFINO, I. A. A. **Simulação hidrossedimentológica, analisando dois MDES, de duas pequenas sub-bacias no cariri paraibano utilizando o modelo SWAT.** *Revista Geográfica Acadêmica.* v.5, n.1, 2011.

OLIVEIRA, G. T. S. **Estudo e aplicação da evolução diferencial.** Uberlândia, Minas Gerais: 126p. 2006. (Dissertação em Engenharia Mecânica / FEMEC / UFU)

PAIVA, F. M. L. **Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida paraibana.** Campina Grande, Paraíba: 208f. 2008. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental / CTRN / UFCG)

PAIVA, R. C. D.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. **Estimativa das vazões naturais nas sub-bacias do Vacacaí Mirim através de modelo simplificado.** Anais... I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba - PR, 2006.

PEREIRA, J. A. **Modelagem do Escoamento Superficial e da Erosão do Solo em Microbacias na Bacia Experimental de Sumé-PB.** Campina Grande, Paraíba: 165p. 1997. (Dissertação em Engenharia Civil, UFPB)

PEREIRA, J. C. D. **Aplicação do modelo hidrossedimentológico AVSWAT na bacia hidrográfica do Ribeirão da Cachoeirinha – MG.** Itajubá, Minas Gerais: 134f. 2010. (Dissertação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos / UNIFEI)

REFSGAARD, J. C. **Hydrological modelling and river basin management**. Copenhagen, Denmark: 2007. (Thesis in Science / GEUS / Faculty of Natural Science at the University of Copenhagen)

SANTOS, L. L. **Modelagem hidrossedimentológica e avaliação comparativa de três modelos em pequenas sub-bacias na região semi-árida paraibana**. Campina Grande, Paraíba: 263f. 2008. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental / DEC / CCT / UFCG)

SANTOS, C. A. G. **Application of Runoff-Erosion Model for a Semiarid Area in Brazil**. Japan. 1997. (Ph.D Thesis, Department of Civil Engineering, Ehime University)

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; SRINIVASAN, V. S. **Análise das perdas de água e solo em diferentes coberturas superficiais no semi-árido da Paraíba**. *Revista OKARA: Geografia em debate*. vol.1, n.1, p.1-152. 2007.

SANTOS, T. T. **Delimitação espacial e simulação hidrossedimentológica na bacia do rio Japaratuba Mirim em Sergipe**. São Cristóvão, Sergipe: 83f. 2010. (Dissertação em Agroecossistemas / NEREN / UFS)

SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; WATANABE, M.; SRINIVASAN, S. V. **Influência do tipo da cobertura vegetal sobre a erosão no semi-árido paraibano**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. vol.4, n.1, p.92-96, 2000.

SANTOS, L. L. **Modelos hidráulicos-hidrológicos: conceitos e aplicações**. *Revista Brasileira de Geografia Física*. Vol.2, n.3, p.01-19, 2009.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G. **Estimativa da produção de sedimentos mediante uso de um modelo hidrossedimentológico acoplado a um SIG**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.5, p.520-526, 2008.

SILVA, F. O. **Investigação dos processos hidrossedimentológicos em parcela experimental no semi-árido potiguar**. Natal, Rio Grande do Norte: 105f. 2008. (Dissertação em Engenharia Sanitária / UFRN)

SILVA, F. G. B.; MINOTTI, R. T.; NETO, F.L.; PRIMAVESI, O.; CRESTANA, S. **Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim – SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D**. *EngSanitAmbient*.v.15, n.2, abr/jun, p.141-148, 2010.

SOUSA, G. **MODFIPE - Um modelo distribuído de base física para simulação do escoamento e erosão do solo**. Campina Grande, Paraíba: 101f. 2007. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental / CTRN / UFCG)

SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C. A. G.; GALVÃO, C. O. **Erosão hídrica do solo no semi-árido brasileiro: A experiência na bacia experimental de Sumé.***Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. vol.8, n.2, abr-jun, p57-73, 2003.

SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO, C. O. **Bacia experimental de Sumé: Descrição e dados coletados.** Campina Grande, PB: Universidade Federal de Campina Grande / CNPq, 2003.

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

UZEIKA, T. **Aplicabilidade do Modelo SWAT (Soiland Water Assessment Tool) na simulação da produção de sedimentos em pequena bacia hidrográfica rural.** Porto Alegre, Rio Grande do Sul: 144p. 2009. (Dissertação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental / IPH / UFRGS)

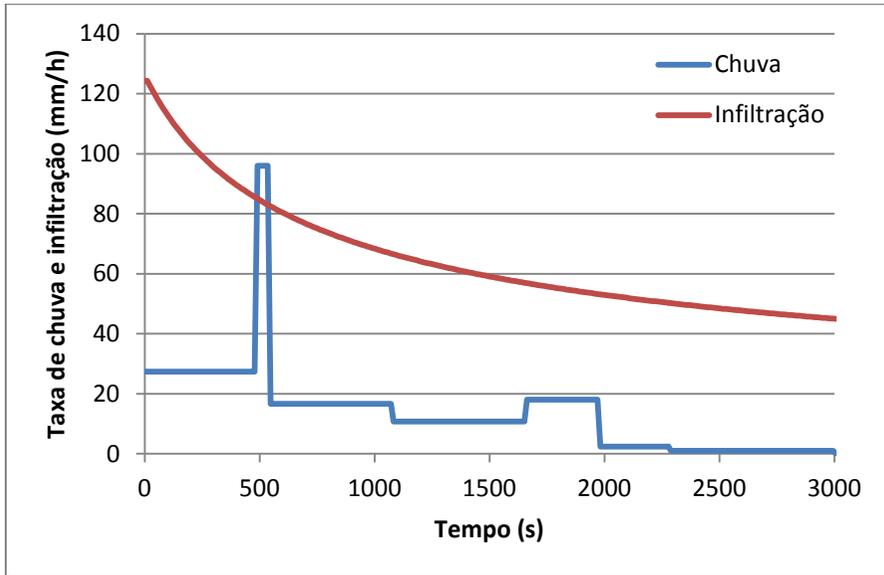
VRUGT, J. A.; BOUTEN, W.; GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S. **Toward improved identifiability of hydrologic model parameters: The information content of experimental data.** *Water Resources Research*, vol.38, n.12, 1312, 2002.

XAVIER, F. V. **Contribuições metodológicas ao estudo da produção e distribuição espacial de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Manso, utilizando o modelo AVSWAT.** Cuiabá, Mato Grosso: 167p. 2009. (Dissertação / Instituto de Ciências Exatas e da Terra / Universidade Federal de Mato Grosso)

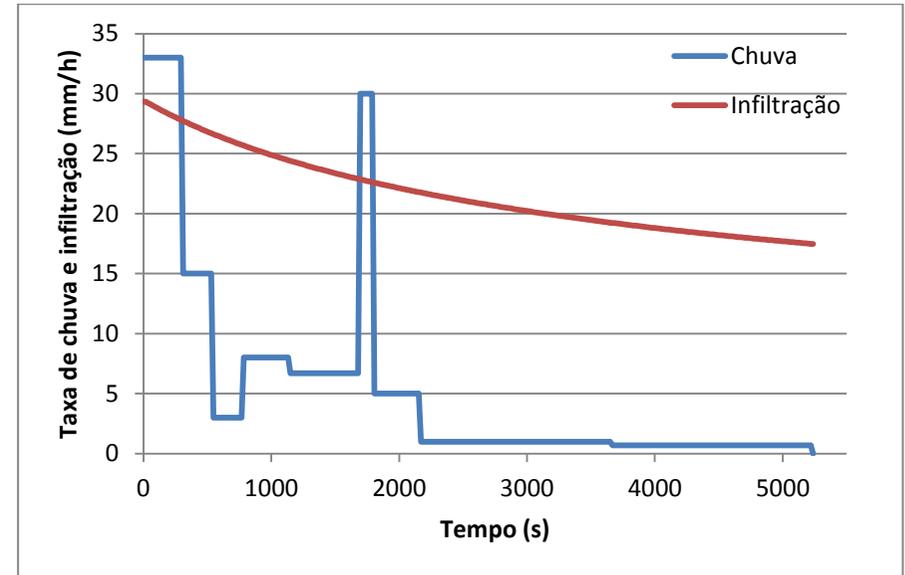
ZHANG, X.; SRINIVASAN, R.; ZHAO, K.; LIEW, M. V. **Evaluation of global optimization algorithms for parameter calibration of a computationally intensive hydrologic model.***Hydrological Processes*. 23 (3), 430-441, 2008.

YANG, J.; REICHERT, P.; ABBASPOUR, K. C.; YANG, H. **Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference.***Journal of Hydrology*.vol.340, p.167-182, 2007.

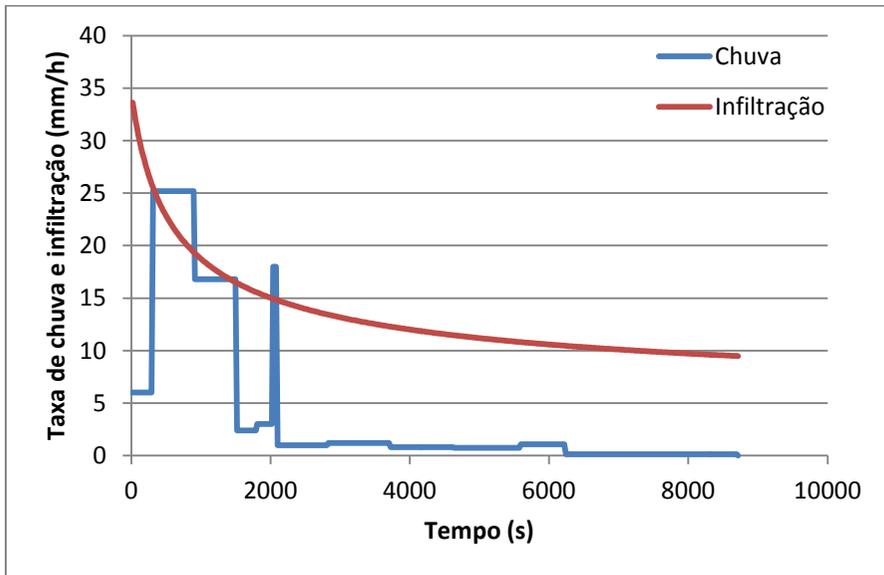
ANEXO A



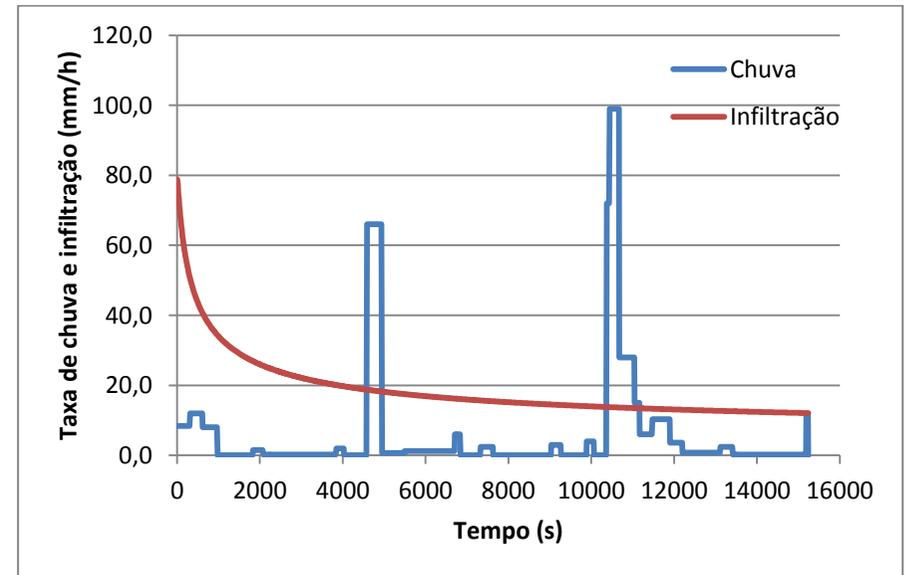
A1 – Hietograma do evento 144.



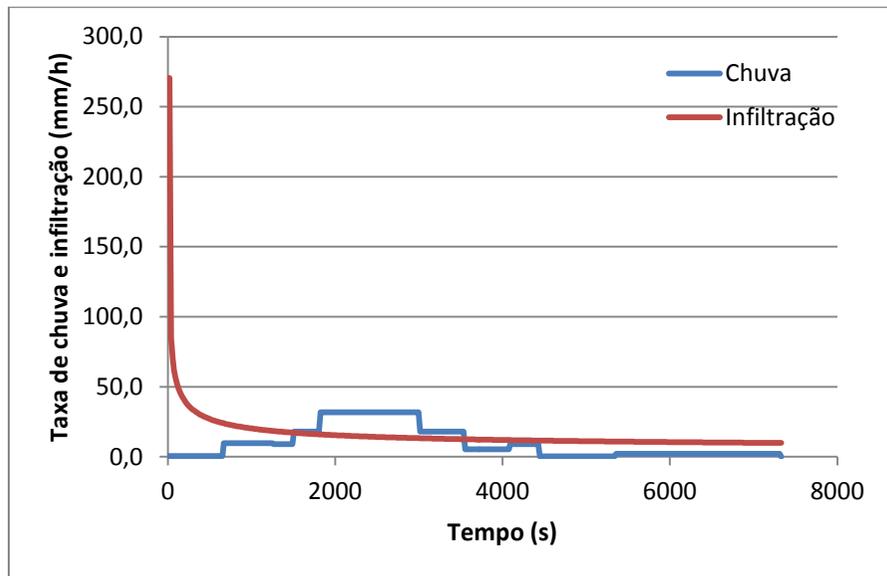
A3 – Hietograma do evento 148



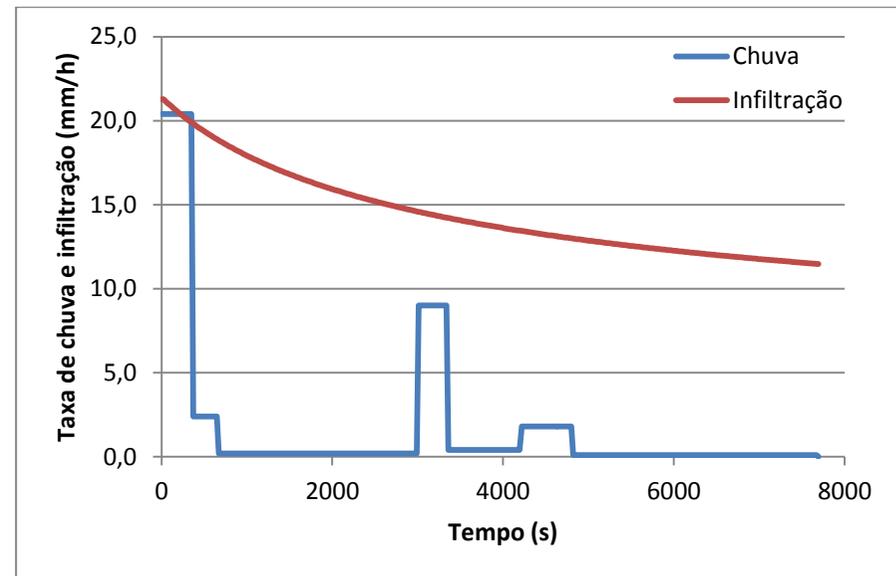
A2 – Hietograma do evento 146



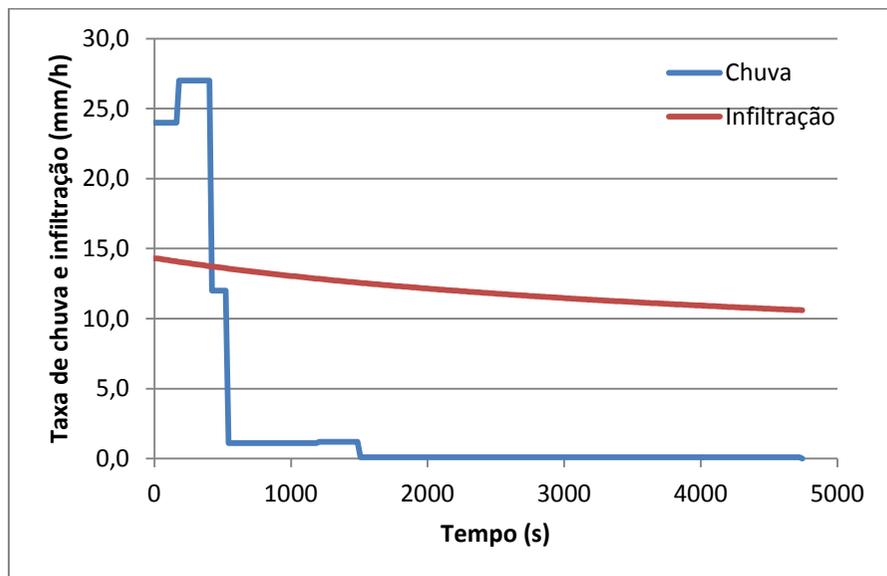
A4 – Hietograma do evento 152



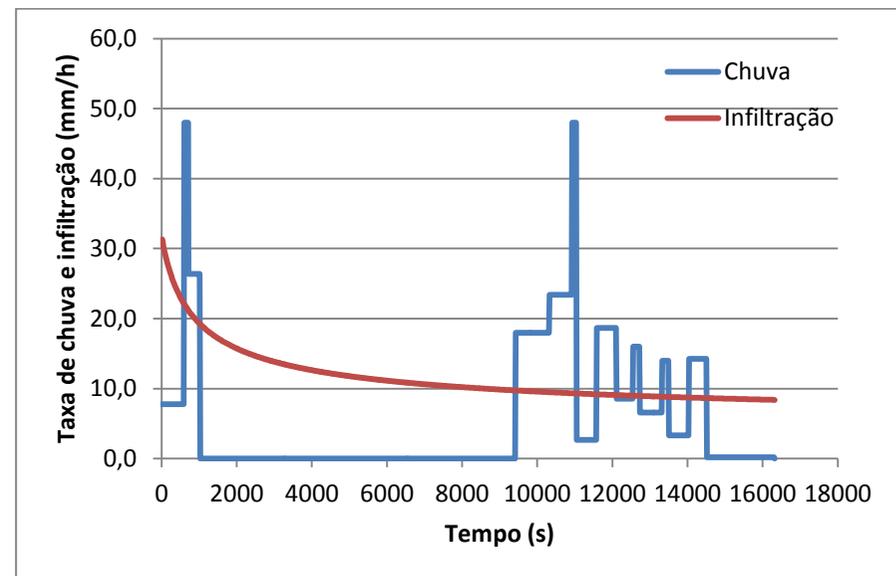
A5 – Hietograma do evento 155



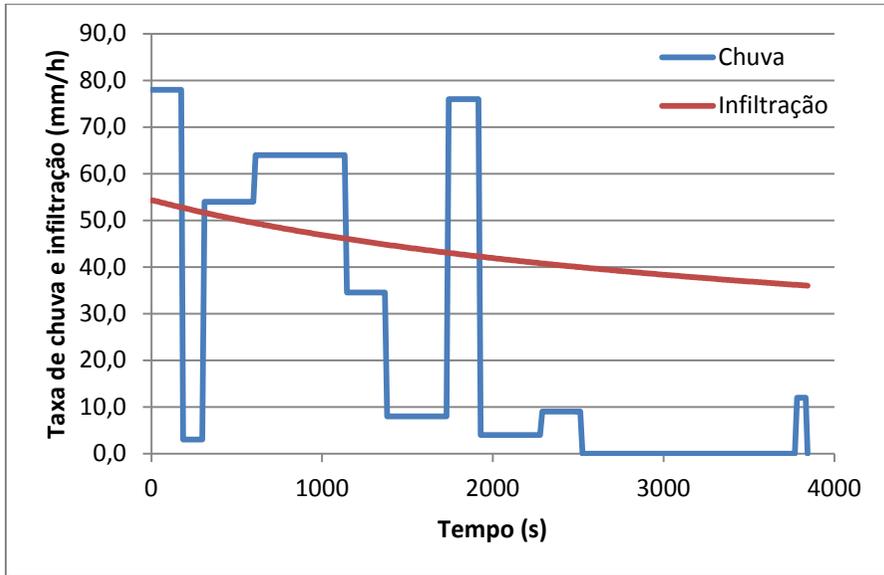
A7 – Hietograma do evento 160



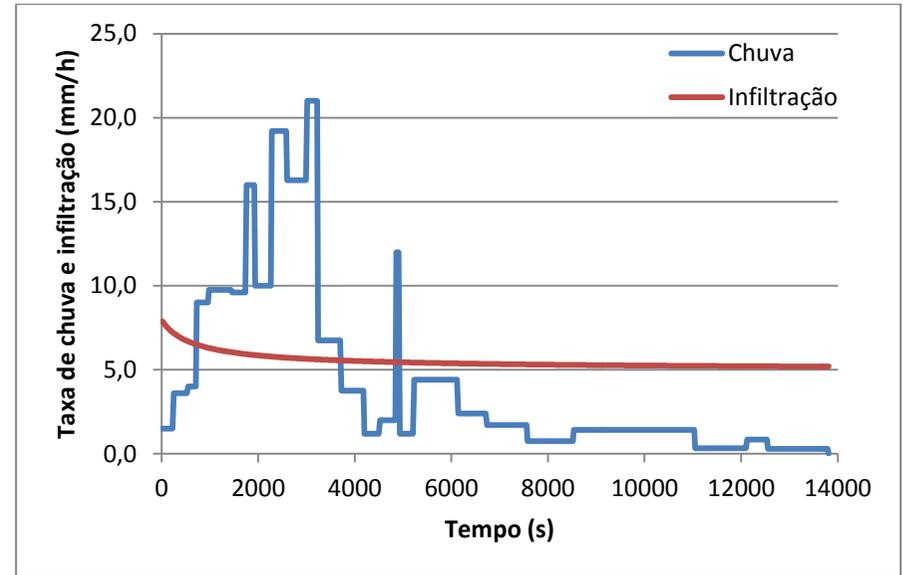
A6 – Hietograma do evento 159



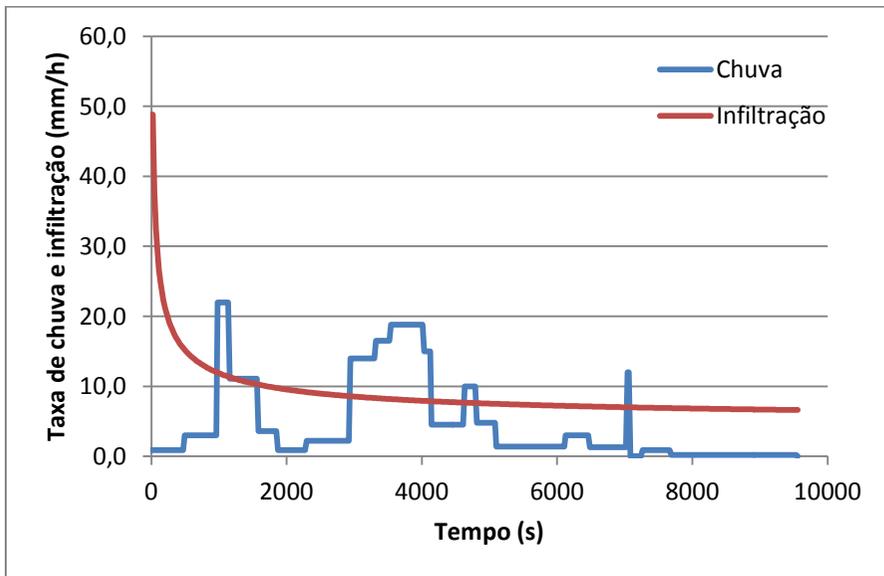
A8 – Hietograma do evento 161



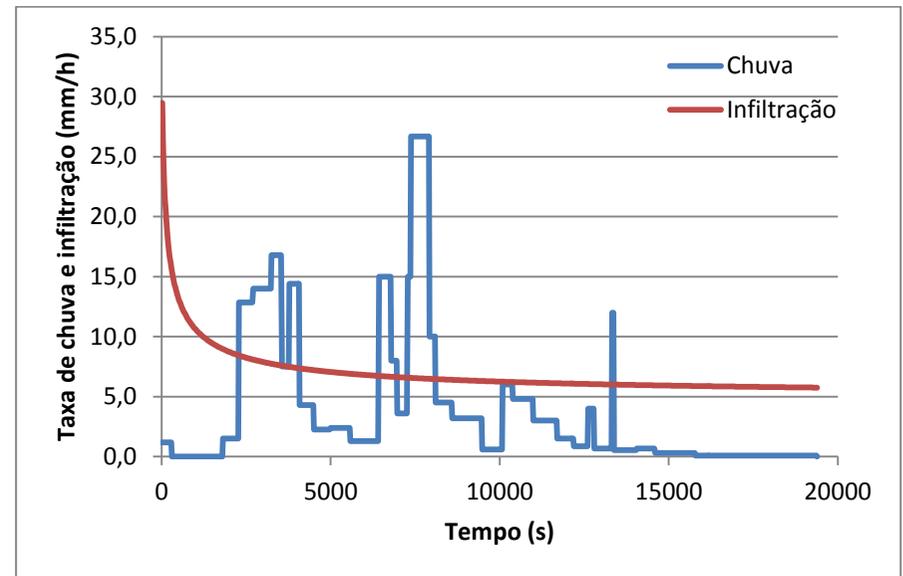
A9 – Hietograma do evento 162



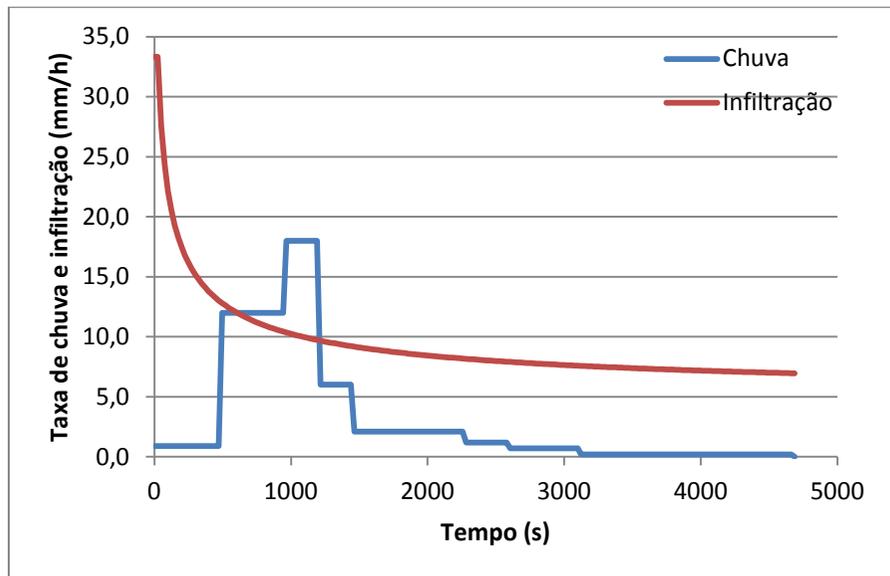
A11 – Hietograma do evento 167



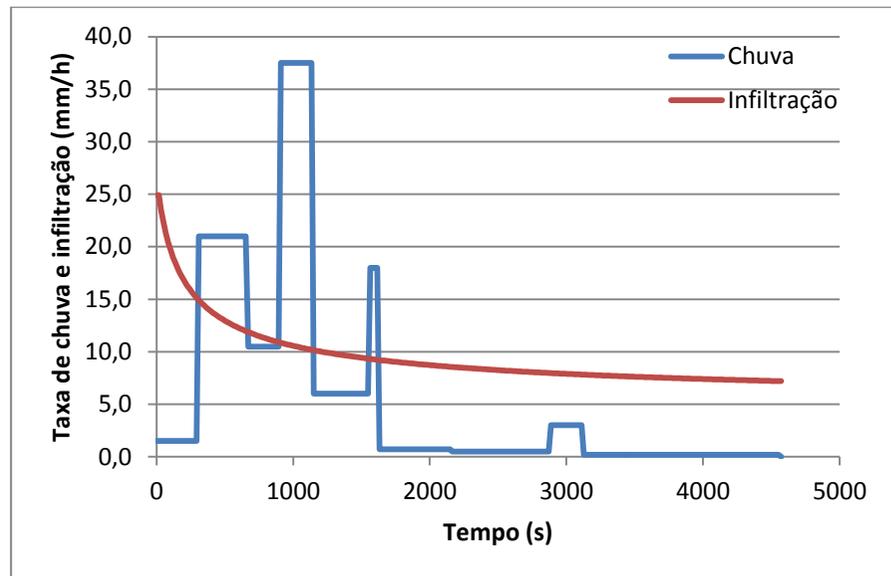
A10 – Hietograma do evento 165



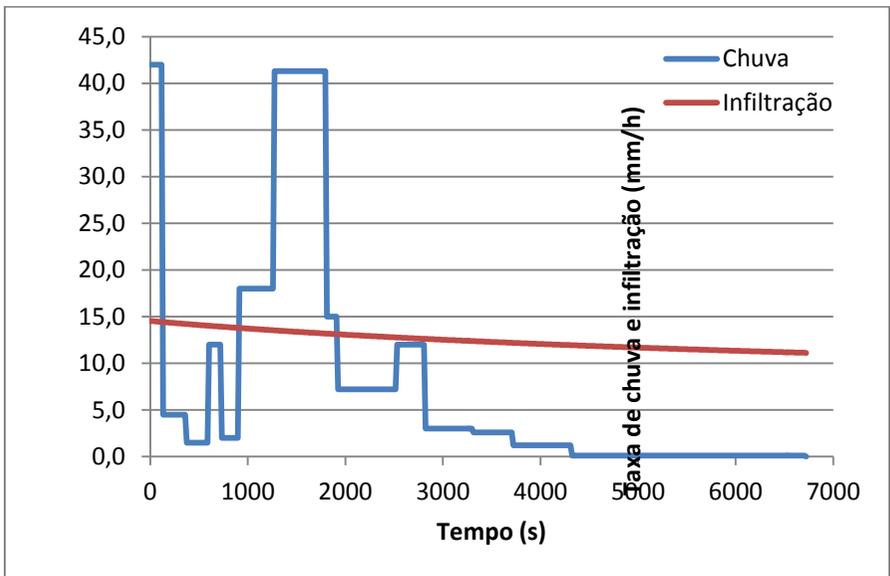
A12 – Hietograma do evento 168



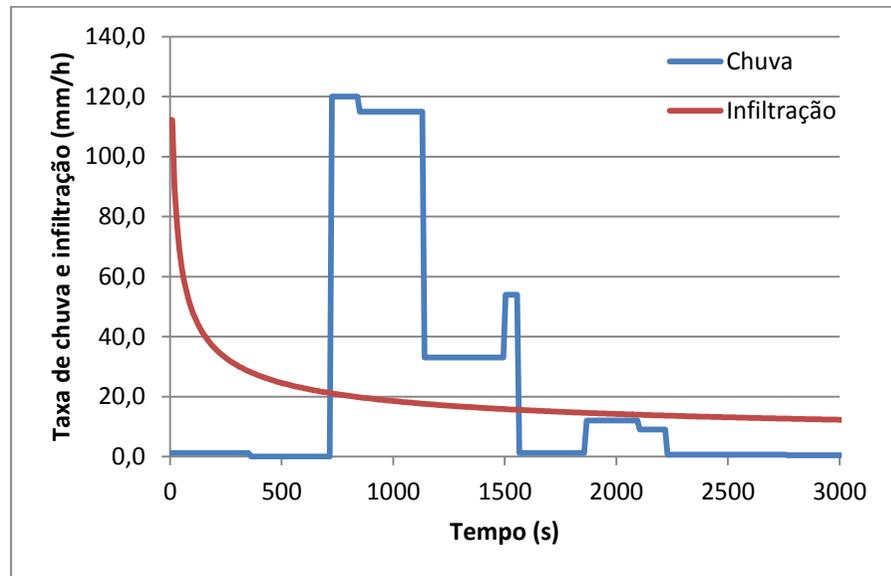
A13 – Hietograma do evento 171



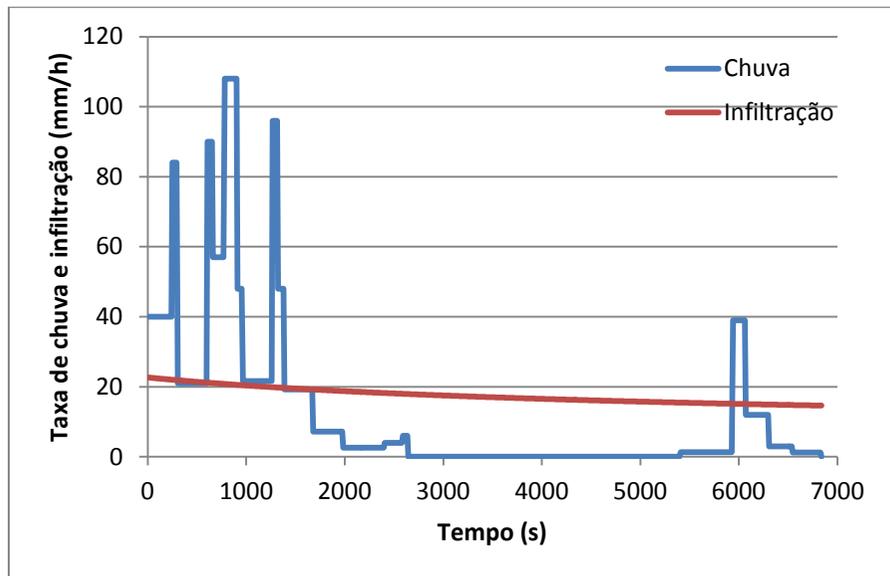
A15 – Hietograma do evento 174



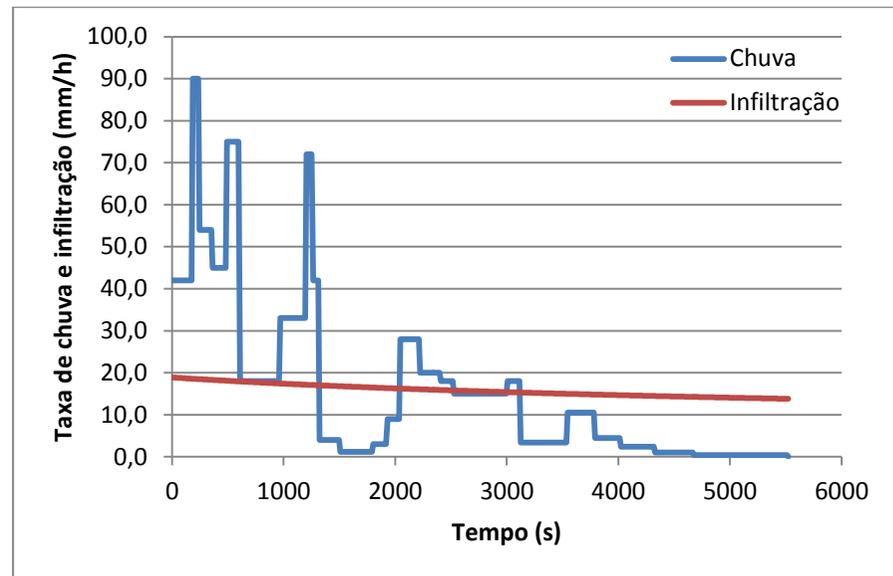
A14 – Hietograma do evento 172



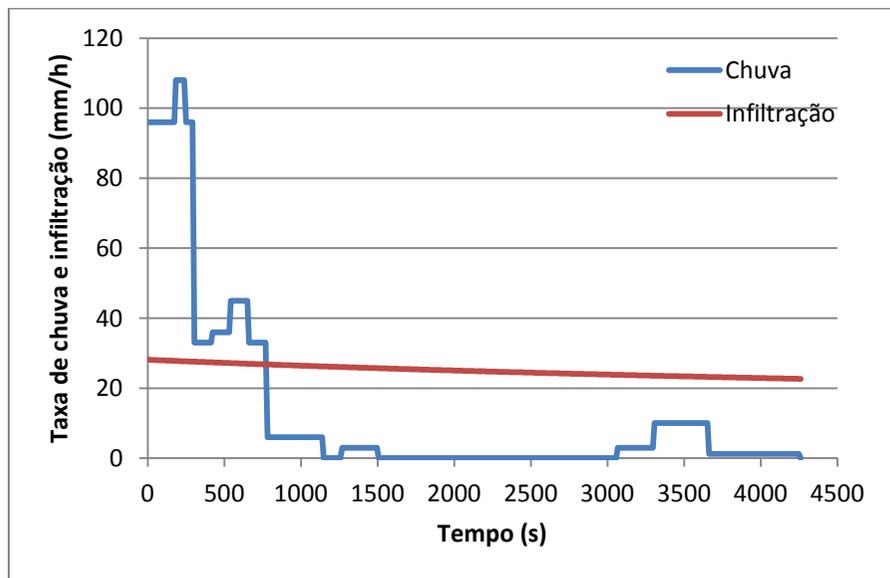
A16 – Hietograma do evento 177



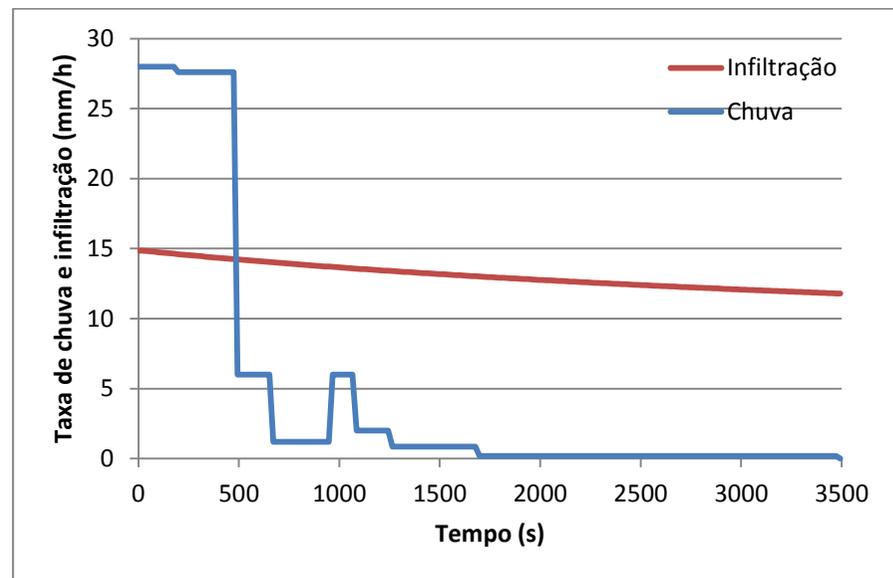
A17 – Hietograma do evento 178



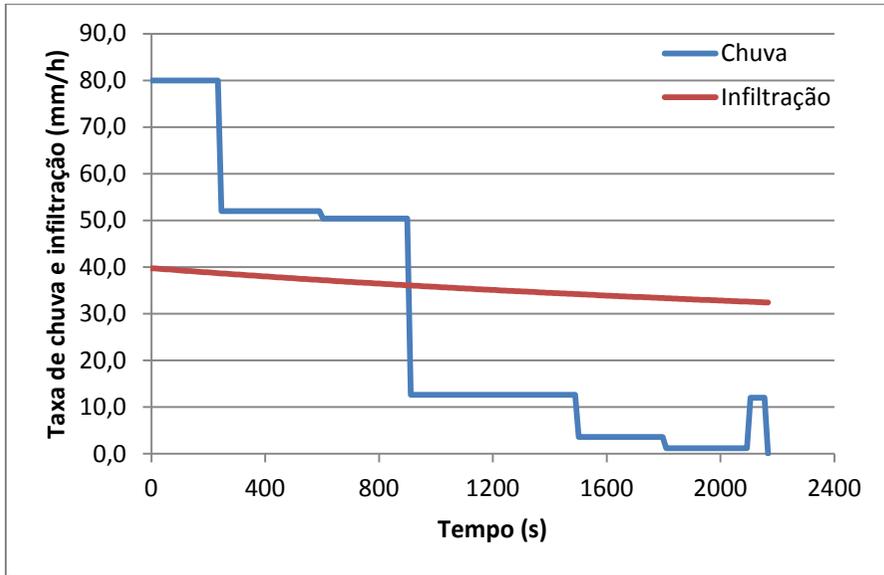
A19 – Hietograma do evento 183



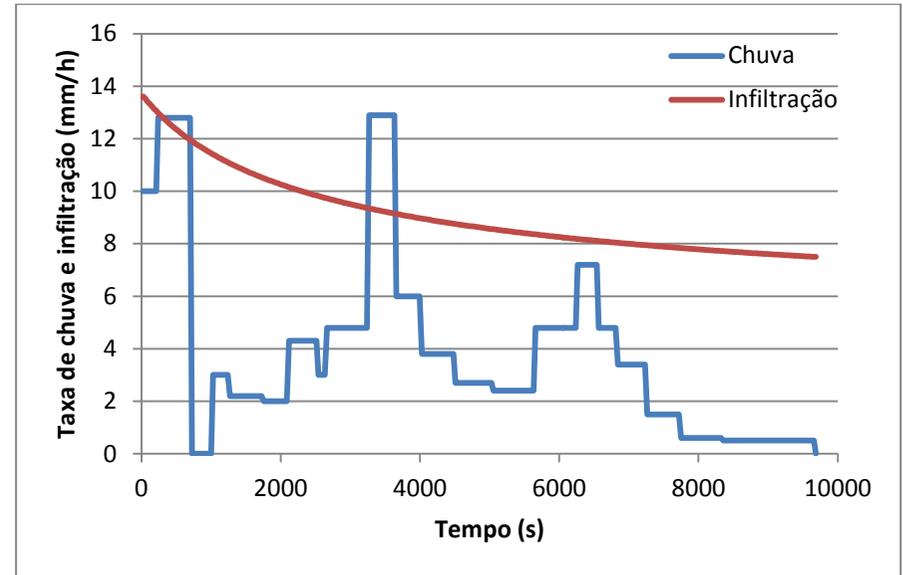
A18 – Hietograma do evento 179



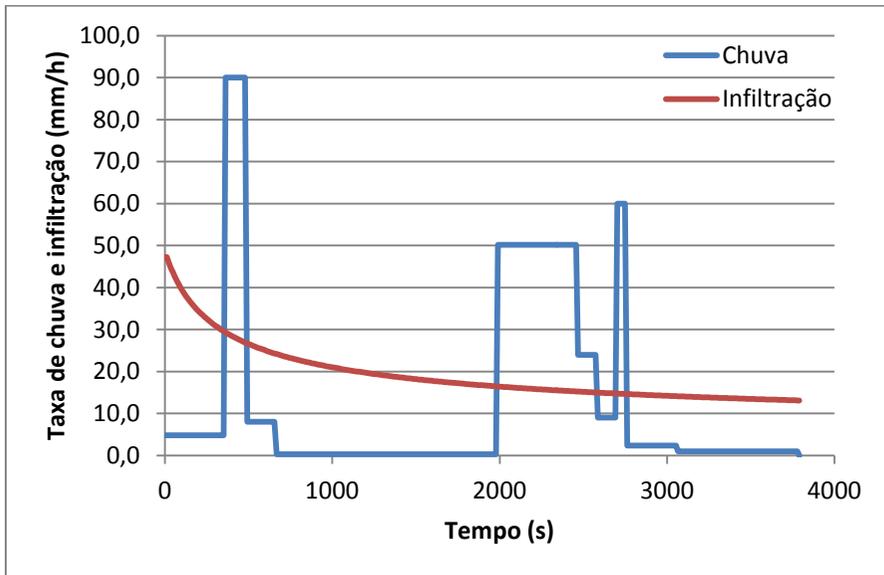
A20 – Hietograma do evento 184



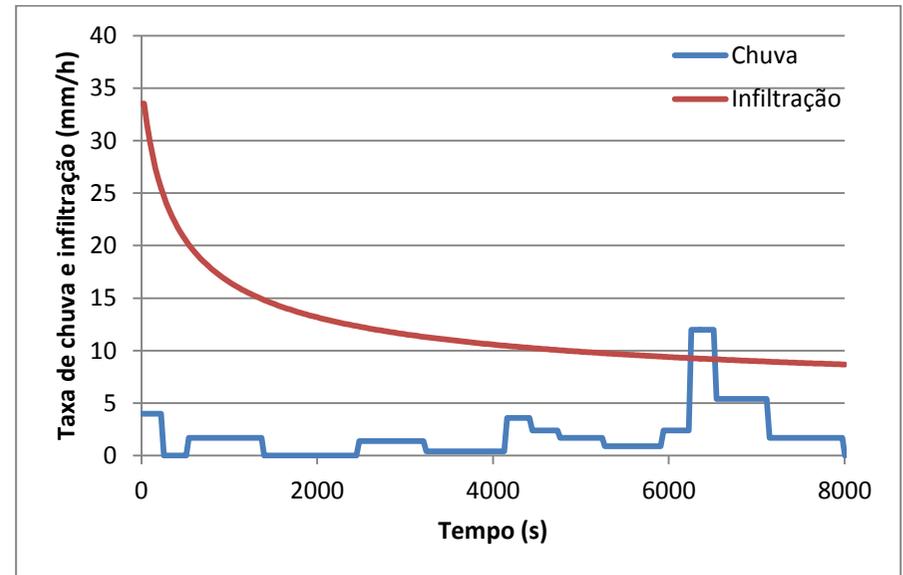
A21 – Hietograma do evento 186



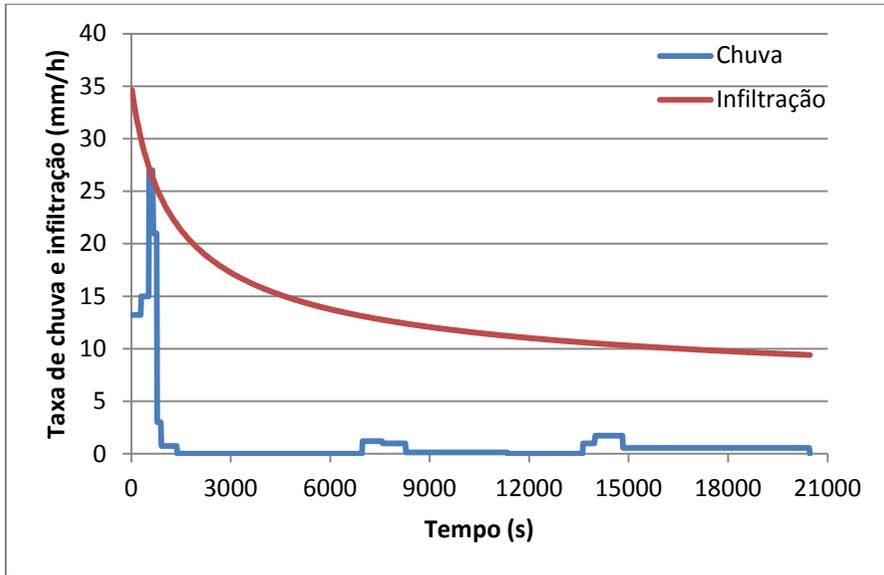
A23 – Hietograma do evento 190



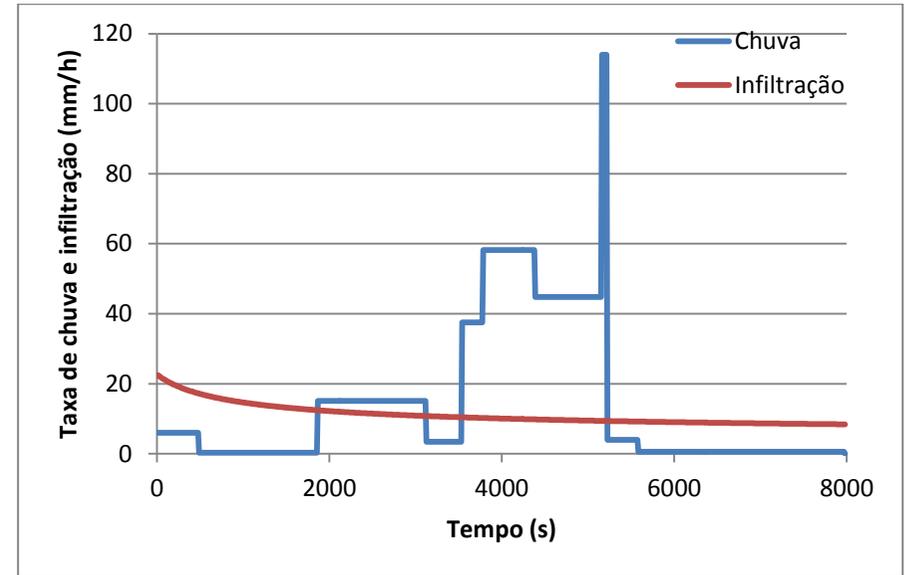
A22 – Hietograma do evento 187



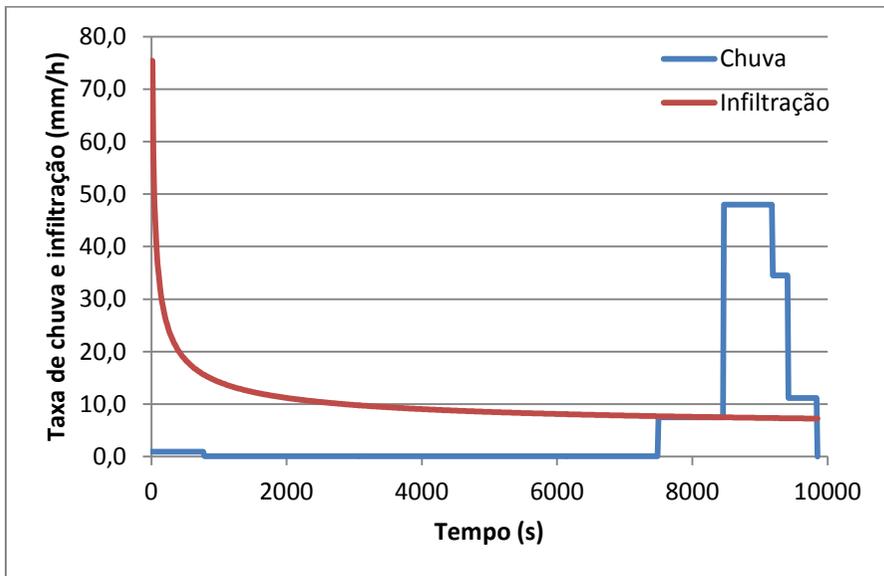
A24 – Hietograma do evento 191



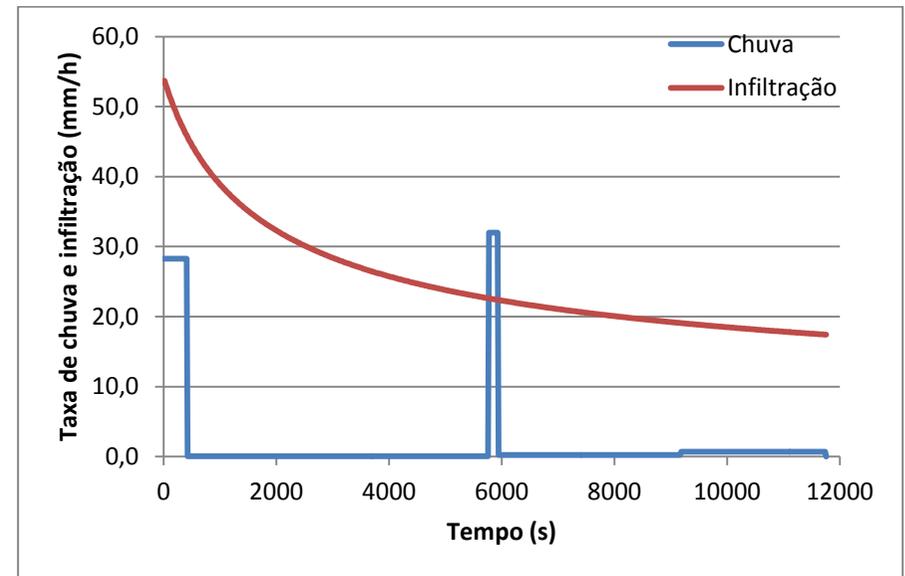
A25 – Hietograma do evento 194



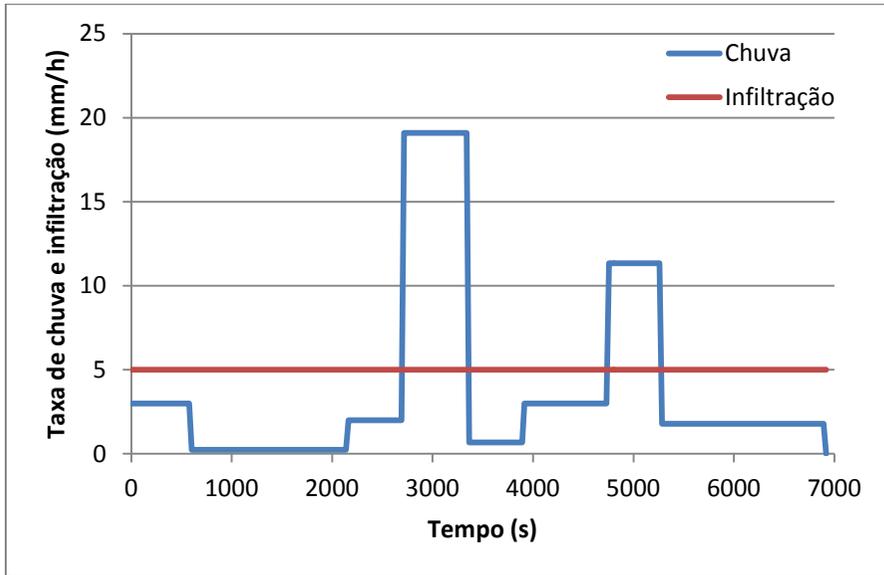
A27 – Hietograma do evento 198



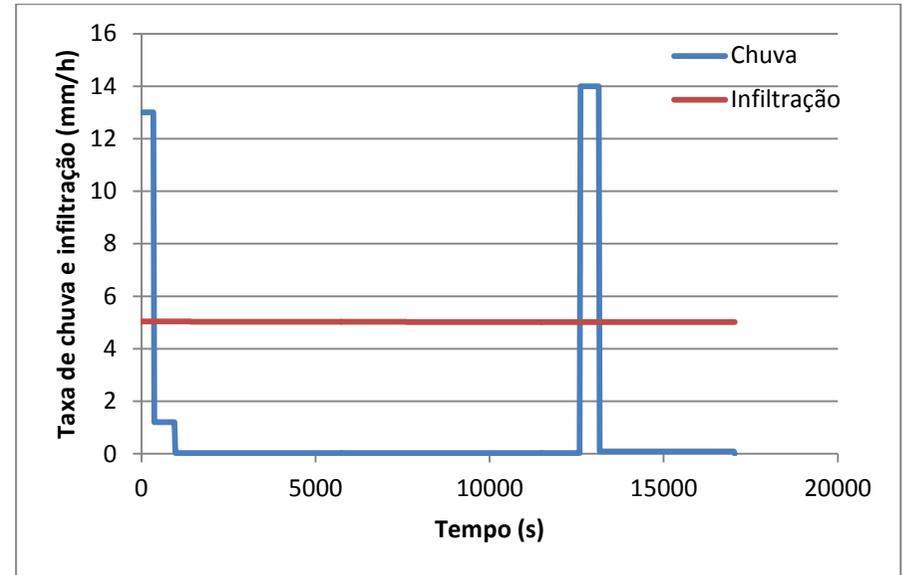
A26 – Hietograma do evento 197



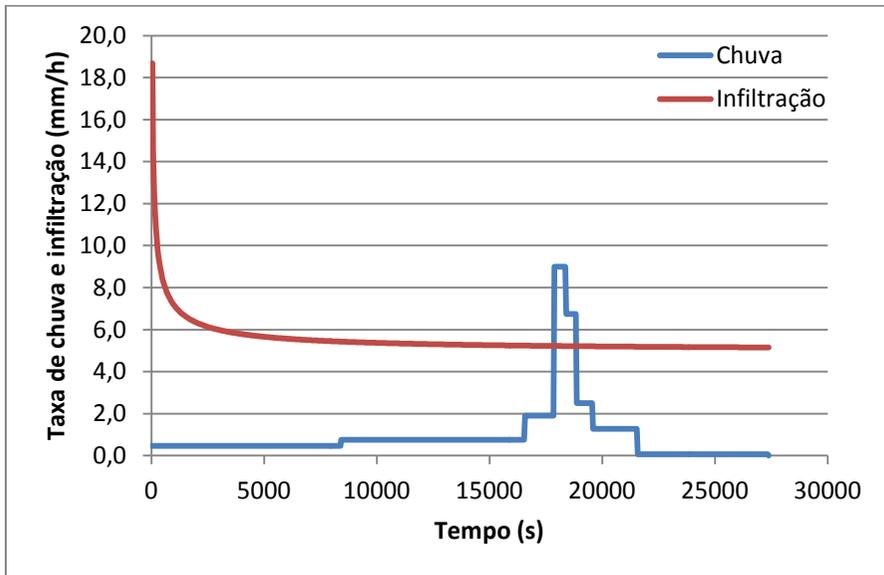
A28 – Hietograma do evento 200



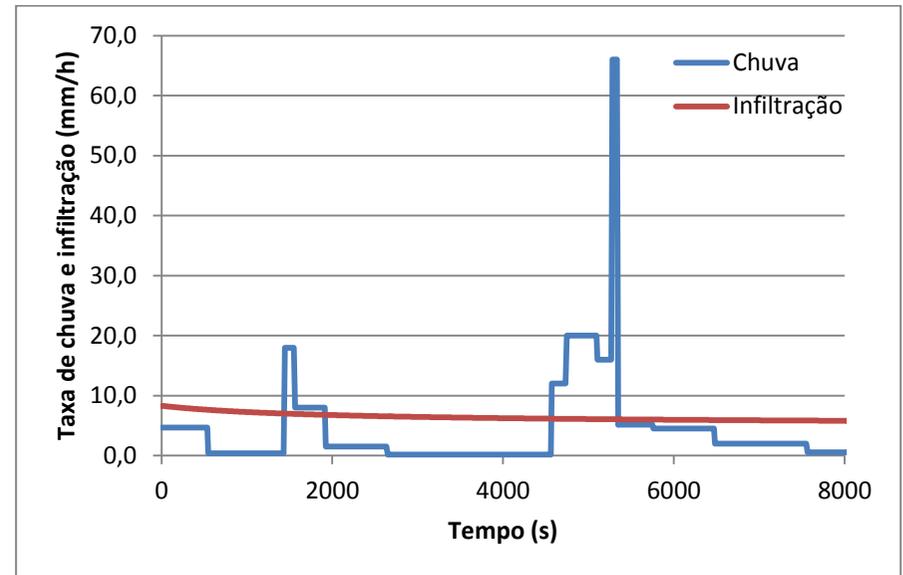
A29 – Hietograma do evento 204



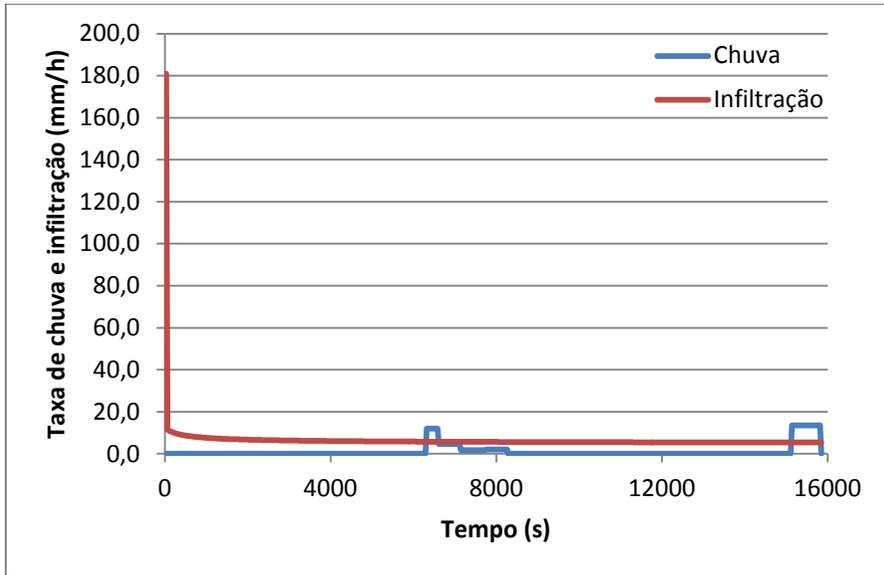
A31 – Hietograma do evento 206



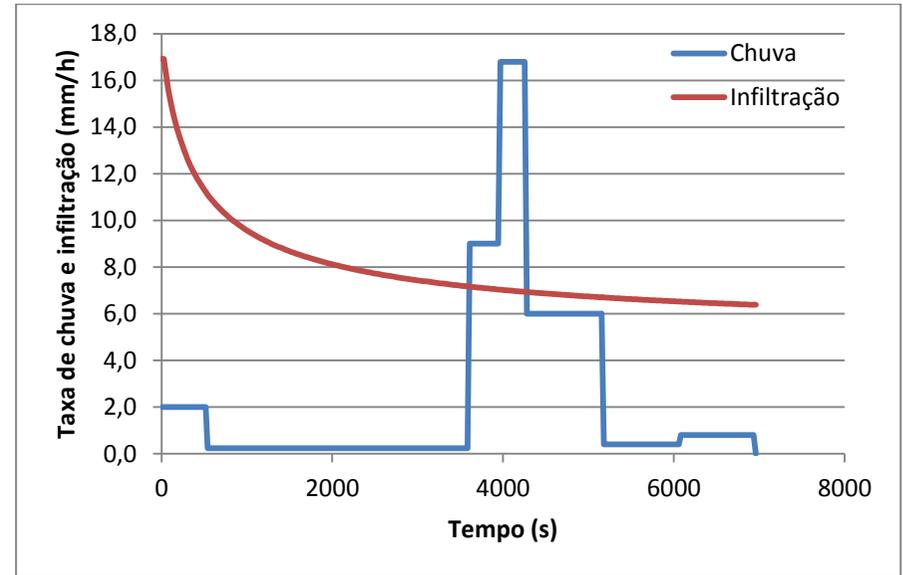
A30 – Hietograma do evento 205



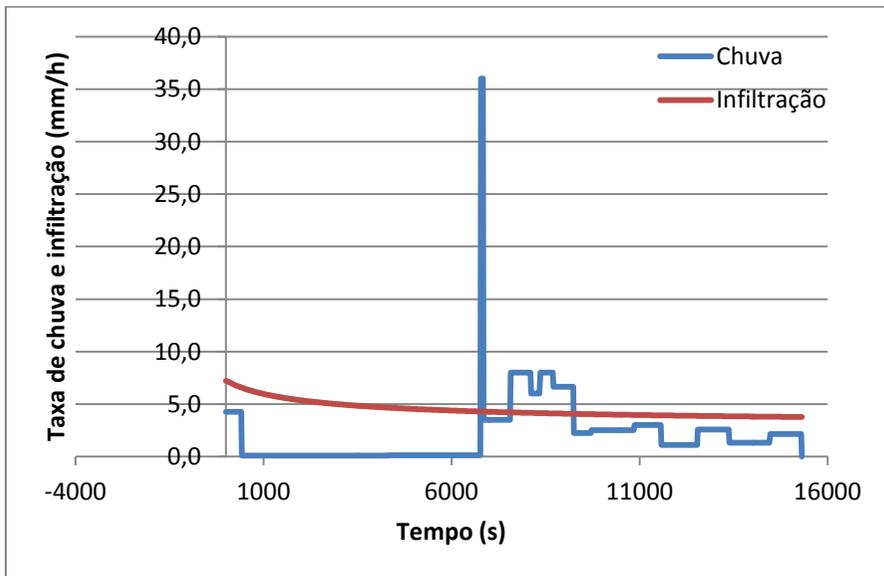
A32 – Hietograma do evento 210



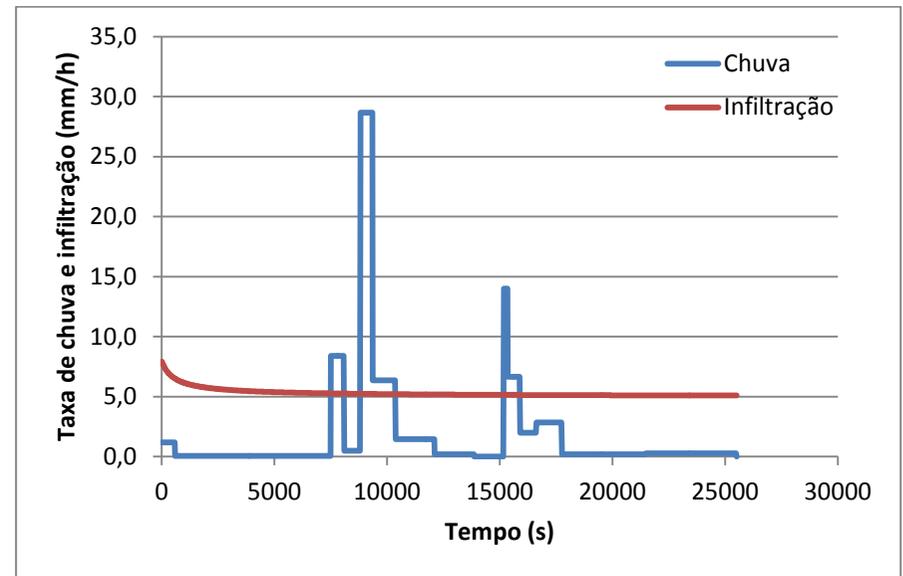
A33 – Hietograma do evento 216



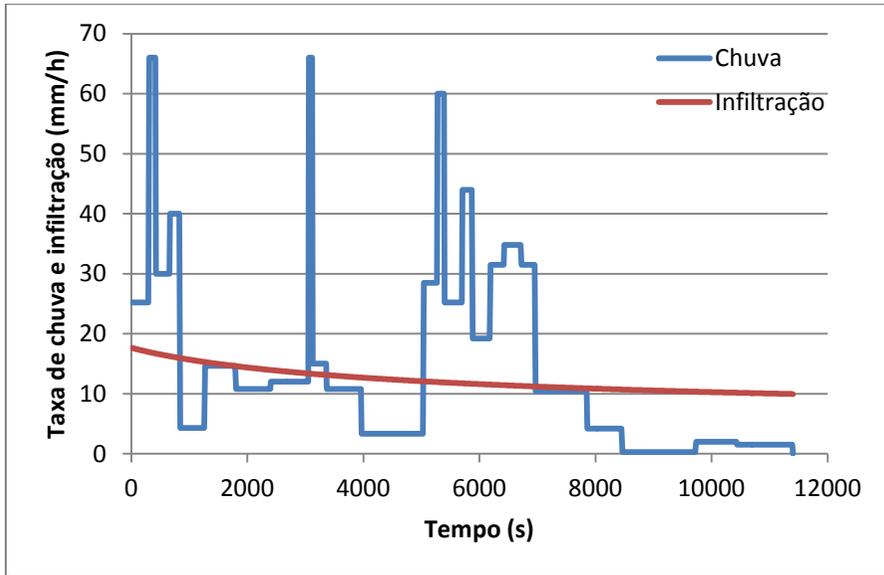
A35 – Hietograma do evento 223



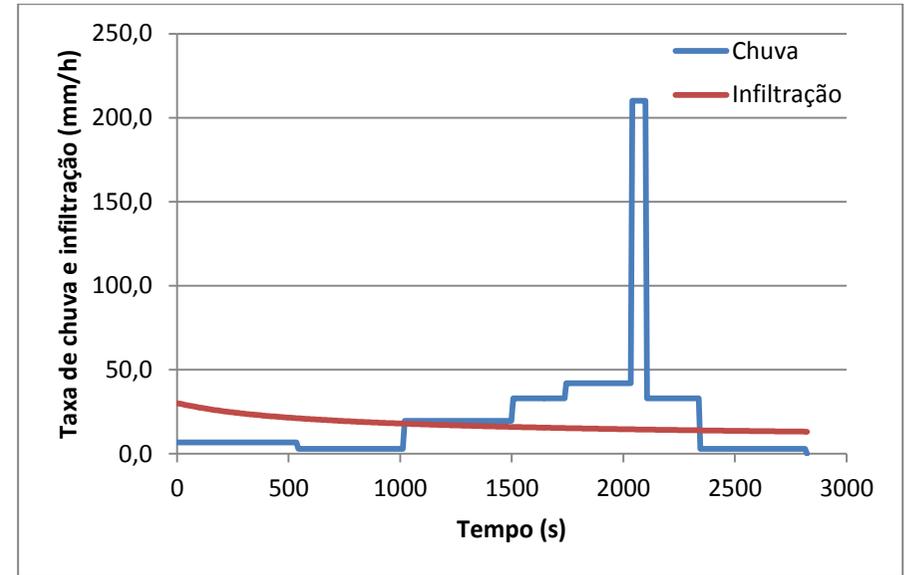
A34 – Hietograma do evento 217



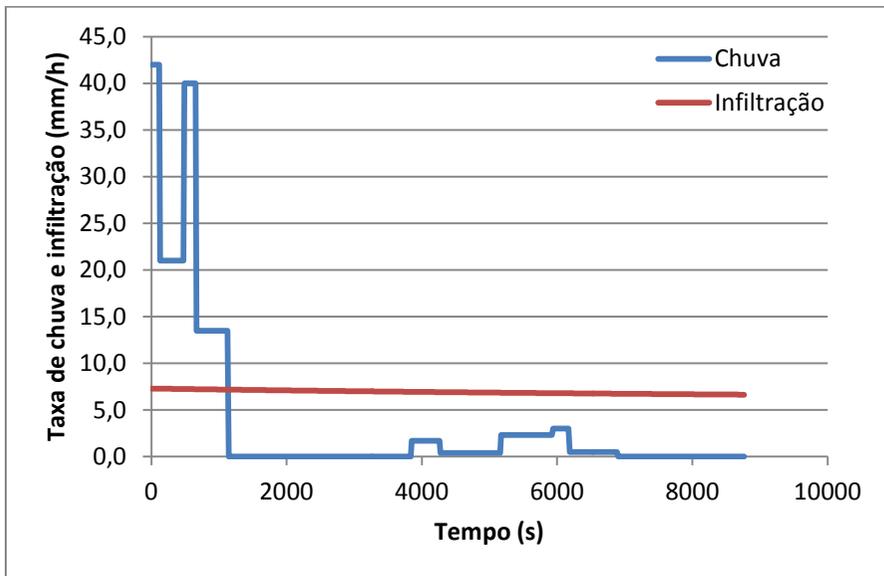
A36 – Hietograma do evento 228



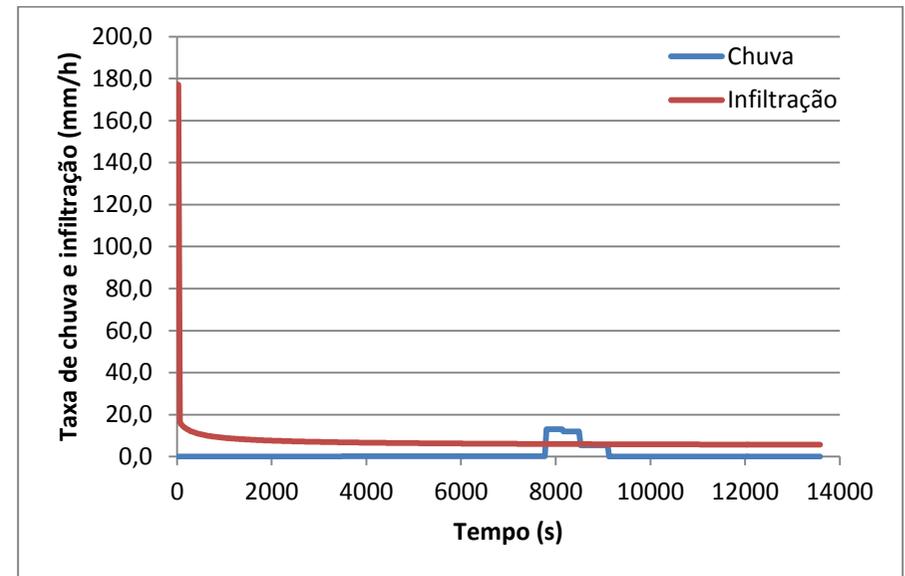
A37 – Hietograma do evento 229



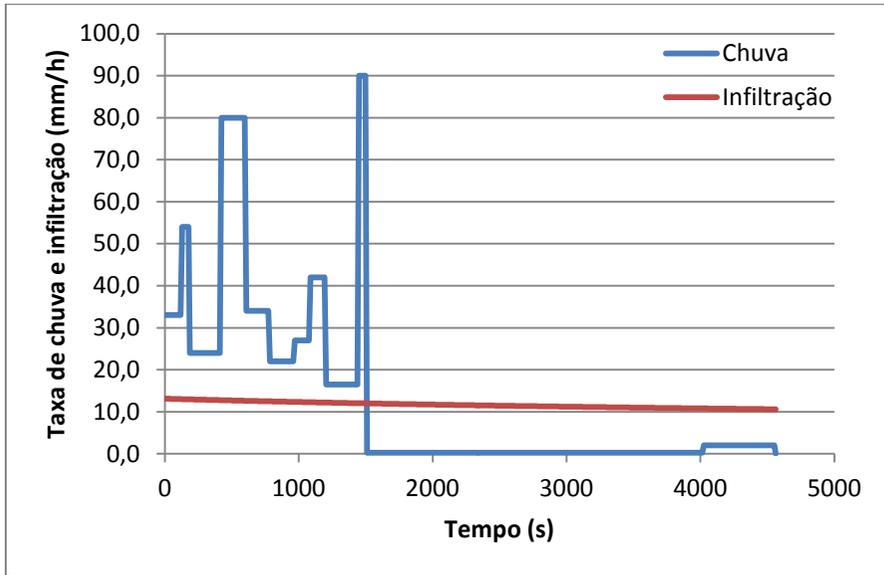
A39 – Hietograma do evento 246



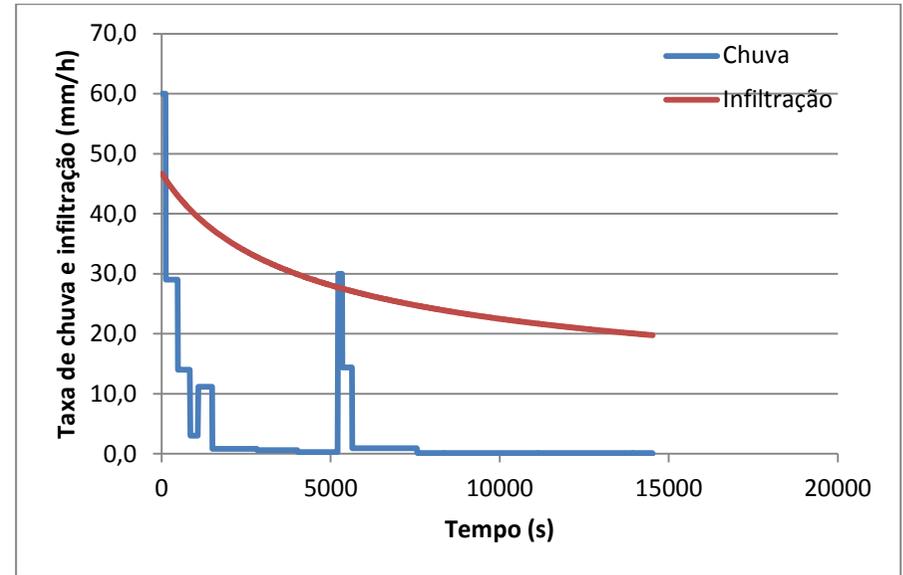
A38 – Hietograma do evento 239



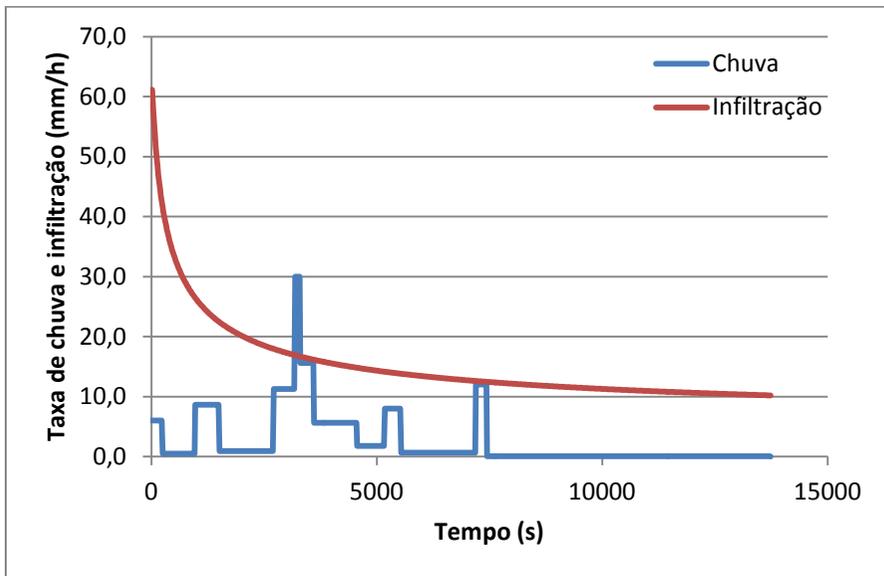
A40 – Hietograma do evento 250



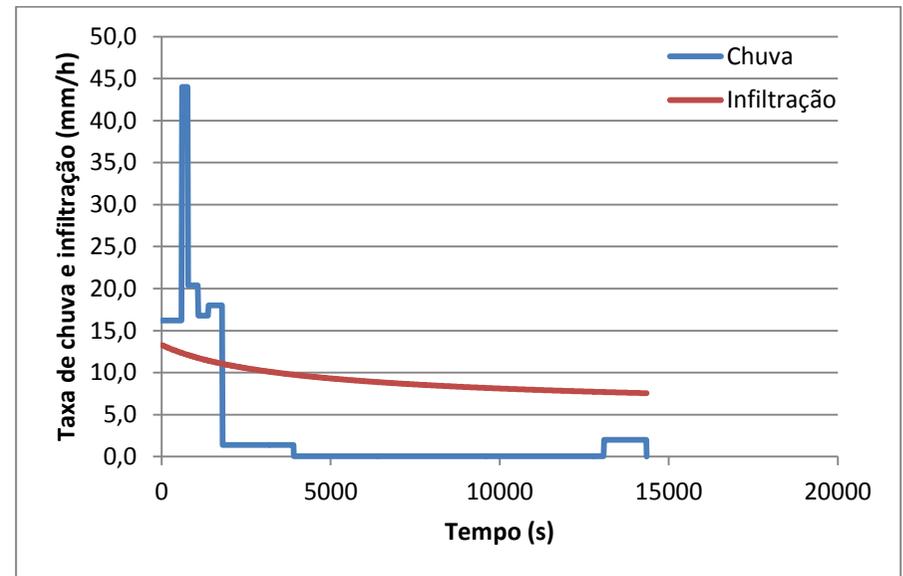
A41 – Hietograma do evento 253



A43 – Hietograma do evento 263



A42 – Hietograma do evento 254



A44 – Hietograma do evento 264

Tabela B1. Valores dos parâmetros a , K_r e K_l otimizados com o algoritmo RPS para a microbaciad discretizada em 4 elementos, onde $I_{m\acute{a}x}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas.

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{m\acute{a}x}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_l \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
144	7/2/1987	50	96	11,39	7,87	0,19	0,0022	1,2158	6,8458	7,90	0,19
146	12/2/1987	145	25,2	20,80	36,9	0,06	0,0465	1,0480	9,0639	36,96	0,06
148	2/3/1987	87	33	18,25	1,86	0,06	0,0022	2,0871	6,4244	1,85	0,06
152	15/3/1987	250	99	15,24	1218,88	12,97	0,0003	1,1443	3,4575	1672,46	13,00
155	2/5/1987	122	31,7	18,60	2335,62	2,31	0,0334	1,6690	8,4420	2335,60	2,31
159	29/6/1987	79	27	23,10	323,43	1,37	0,0041	2,2490	2,4570	324,16	1,37
160	4/7/1987	128	20,4	23,18	10,14	0,01	0,1000	2,3431	0,3958	5,76	0,01
161	9/7/1987	272	48	16,37	5430,19	9,79	0,0161	1,2485	9,8720	5434,46	9,79
162	20/1/1988	64	78	12,44	3965,12	5,71	0,0104	1,5669	6,6207	3960,68	5,71
165	23/2/1988	159	22	22,28	1093,25	1,58	0,0238	2,8953	6,9068	1094,06	1,58
167	25/2/1988	230	21	22,83	1924,58	6,45	0,0062	2,2596	2,3915	1929,33	6,45
168	2/3/1988	323	26,67	20,22	1099,05	4,64	0,0029	2,0928	3,7370	1106,69	4,64
171	12/3/1988	78	18	24,80	8,42	0,12	0,0041	2,1821	8,0566	8,41	0,12
172	14/3/1988	112	42	16,32	3606,79	5,67	0,0025	2,5383	5,9219	3596,76	5,67
174	19/3/1988	76	37,5	17,19	1115,53	1,69	0,0176	1,3538	7,3274	1111,25	1,69
177	24/3/1988	58	120	10,37	7728,92	13,52	0,0005	1,0988	0,1793	18152,96	13,52
178	5/4/1988	114	108	10,84	6952,69	10,6	0,0003	1,1443	3,4575	6854,08	10,60
179	8/4/1988	71	108	10,84	2474,33	7,23	0,0007	1,0011	0,7482	4362,65	7,23
183	19/4/1988	92	90	11,70	6739,52	9,63	0,0017	2,7611	3,2209	6753,70	9,63
184	20/4/1988	58	28	19,74	849,51	1,81	0,0105	2,1383	8,8896	847,46	1,81
186	30/4/1988	36	80	12,31	1706,52	5,36	0,0037	1,1176	9,3328	1794,24	5,36
187	6/5/1988	63	90	11,70	1727,83	7,82	0,0003	1,1443	3,4575	2627,89	7,82

Tabela B1. Valores dos parâmetros a , K_R e K_I otimizados com o algoritmo RPS para a microbaciad discretizada em 4 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt é o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas (continuação).

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_I \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
190	13/7/1988	161	12,9	30,27	78,33	0,45	0,0073	1,8915	2,9729	77,51	0,45
191	16/7/1988	133	12	31,77	160,7	0,22	0,0328	1,1617	7,6492	160,40	0,22
194	13/1/1989	341	27	21,10	0,08	0,01	0,0017	2,3929	2,3705	0,08	0,01
197	1/3/1989	164	48	15,37	1766,35	6,75	0,0005	1,0988	0,1793	1871,86	6,75
198	22/3/1989	133	114	10,60	5146,97	20,6	0,0007	1,0011	0,7482	10826,22	20,60
200	27/3/1989	196	32	18,52	1014,43	0,44	0,0954	1,4214	7,6344	1014,10	0,44
204	2/4/1989	115	19,09	24,02	1036,24	5,38	0,0009	2,2496	5,5606	1035,55	5,38
205	5/4/1989	456	9	39,75	4,73	0,31	0,0004	1,0991	3,5853	4,87	0,31
206	6/4/1989	284	14	28,74	366,7	3,31	0,0003	1,1443	3,4575	366,59	3,19
210	21/4/1989	137	66	13,37	1296,56	3,75	0,0017	2,0314	2,8913	1301,42	3,75
216	11/5/1989	264	13,5	29,40	322,45	0,58	0,0195	2,6795	4,9431	322,49	0,58
217	12/5/1989	255	36	17,52	551,38	2,96	0,0057	2,4494	2,3524	547,13	2,96
223	3/7/1989	116	16,8	25,78	0,76	0,07	0,0009	2,2496	5,5606	0,78	0,07
228	8/7/1989	425	28,67	26,43	789,09	5,26	0,0008	1,0563	8,0993	761,97	5,26
229	20/9/1989	190	66	13,37	1016,71	16,14	0,0005	1,0988	0,1793	3463,85	16,14
239	10/2/1990	146	42	16,32	777,61	5,09	0,0004	1,0991	2,2017	1112,53	5,09
246	18/5/1990	47	210	8,23	512,77	8,56	0,0005	1,0988	0,1793	9907,82	8,56
250	6/7/1990	226	13	30,12	0,11	0,01	0,0041	1,0314	6,1828	0,11	0,01
253	19/10/1990	76	90	11,70	2776,25	10,16	0,0003	1,1443	3,4575	4659,19	10,16
254	22/1/1991	212	30	19,10	304,58	0,42	0,0325	2,9336	2,1900	305,08	0,42
263	18/5/1991	242	60	14,93	104,62	0,56	0,0080	2,7953	6,3637	103,60	0,56
264	19/5/1991	239	44	15,98	472,19	4,06	0,0003	1,1443	3,4575	469,73	4,06

Tabela B2. Valores dos parâmetros a , K_R e K_f otimizados com o algoritmo RPS para a microbacia discretizada em 10 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas.

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_f \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
144	7/2/1987	50	96	10,09	7,87	0,19	0,0025	2,3582	1,3582	8,12	0,19
146	12/2/1987	145	25,2	18,42	36,9	0,06	0,1000	2,3431	0,3958	28,68	0,06
148	2/3/1987	87	33	16,16	1,86	0,06	0,0053	1,2204	2,6451	1,87	0,06
152	15/3/1987	250	99	15,96	1218,88	12,97	0,0004	1,0991	3,5853	3356,23	12,97
155	2/5/1987	122	31,7	16,48	2335,62	2,31	0,0264	2,4968	0,4764	2335,77	2,31
159	29/6/1987	79	27	17,80	323,43	1,37	0,0056	1,6453	8,3907	323,97	1,37
160	4/7/1987	128	20,4	20,53	10,14	0,01	0,1000	2,3431	0,3958	1,92	0,01
161	9/7/1987	272	48	16,62	5430,19	9,79	0,0129	2,5877	2,1981	5421,72	9,76
162	20/1/1988	64	78	11,02	3965,12	5,71	0,0127	1,5631	6,6044	3967,15	5,71
165	23/2/1988	159	22	19,74	1093,25	1,58	0,0208	1,0223	1,8543	1093,01	1,58
167	25/2/1988	230	21	20,22	1924,58	6,45	0,0065	2,1835	5,8202	1888,63	6,45
168	2/3/1988	323	26,67	19,91	1099,05	4,64	0,0054	1,3859	4,9508	1092,33	4,64
171	12/3/1988	78	18	21,97	8,42	0,12	0,0070	1,0962	4,0932	8,52	0,12
172	14/3/1988	112	42	14,46	3606,79	5,67	0,0115	1,6930	1,5036	3614,94	5,67
174	19/3/1988	76	37,5	15,23	1115,53	1,69	0,0149	2,6300	7,5725	1116,83	1,69
177	24/3/1988	58	120	9,19	7728,92	13,52	0,0017	1,2463	7,2302	7815,39	13,52
178	5/4/1988	114	108	9,60	6952,69	10,6	0,0065	2,0661	6,3677	6958,89	10,60
179	8/4/1988	71	108	9,60	2474,33	7,23	0,0003	1,9204	5,9218	2441,14	7,23
183	19/4/1988	92	90	10,37	6739,52	9,63	0,0129	1,5958	0,8059	6760,43	9,63
184	20/4/1988	58	28	17,49	849,51	1,81	0,0109	1,4155	9,9640	849,95	1,81
186	30/4/1988	36	80	10,90	1706,52	5,36	0,0033	2,9562	7,9563	1693,51	5,36
187	6/5/1988	63	90	10,37	1727,83	7,82	0,0019	1,6828	4,1821	1740,83	7,82

Tabela B2. Valores dos parâmetros a , K_R e K_f otimizados com o algoritmo RPS para a microbacia discretizada em 10 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt é o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas (continuação).

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_f \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
190	13/7/1988	161	12,9	26,82	78,33	0,45	0,0075	1,1037	6,4364	78,16	0,45
191	16/7/1988	133	12	28,14	160,7	0,22	0,0436	1,3840	6,0828	160,42	0,22
194	13/1/1989	341	27	20,80	0,08	0,01	0,0105	2,3996	4,9399	0,08	0,01
197	1/3/1989	164	48	13,62	1766,35	6,75	0,0028	1,7607	3,4085	1792,36	6,75
198	22/3/1989	133	114	9,39	5146,97	20,6	0,0011	1,2848	3,0465	5092,41	20,60
200	27/3/1989	196	32	16,40	1014,43	0,44	0,0990	1,6894	6,1315	1014,91	0,44
204	2/4/1989	115	19,09	21,28	1036,24	5,38	0,0042	1,2094	7,2671	1036,33	5,38
205	5/4/1989	456	9	35,21	4,73	0,31	0,0008	1,9290	6,1397	5,45	0,31
206	6/4/1989	284	14	25,45	366,7	3,31	0,0025	1,3343	6,3463	369,63	3,20
210	21/4/1989	137	66	11,84	1296,56	3,75	0,0065	2,9167	5,3804	1308,13	3,75
216	11/5/1989	264	13,5	26,04	322,45	0,58	0,0163	2,8376	4,3699	325,75	0,58
217	12/5/1989	255	36	15,52	551,38	2,96	0,0061	2,2726	9,2042	560,60	2,96
223	3/7/1989	116	16,8	22,84	0,76	0,07	0,0014	1,5619	3,2709	0,81	0,07
228	8/7/1989	425	28,67	26,29	789,09	5,26	0,0017	2,6534	4,2753	815,65	5,25
229	20/9/1989	190	66	11,84	1016,71	16,14	0,0003	1,1443	3,4575	1204,82	16,14
239	10/2/1990	146	42	14,46	777,61	5,09	0,0017	1,2463	7,2302	744,44	5,09
246	18/5/1990	47	210	7,29	512,77	8,56	0,0005	1,0988	0,1793	2791,30	8,56
250	6/7/1990	226	13	26,68	0,11	0,01	0,0053	2,2801	3,7978	0,11	0,01
253	19/10/1990	76	90	10,37	2776,25	10,16	0,0021	1,4856	5,0532	2728,69	10,16
254	22/1/1991	212	30	16,91	304,58	0,42	0,0371	1,0117	4,3255	304,61	0,42
263	18/5/1991	242	60	15,34	104,62	0,56	0,0088	1,0701	4,3222	104,35	0,56
264	19/5/1991	239	44	15,16	472,19	4,06	0,0016	2,0321	9,6463	483,05	4,06

Tabela B3. Valores dos parâmetros a , K_R e K_f otimizados com o algoritmo RPS para a microbacia discretizada em 23 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt é o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas.

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_f \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
144	7/2/1987	50	96	14,26	7,87	0,19	0,0191	2,8387	2,8959	7,87	0,19
146	12/2/1987	145	25,2	26,03	36,9	0,06	0,1000	2,3431	0,3958	0,40	0,06
148	2/3/1987	87	33	22,85	1,86	0,06	0,1000	2,3431	0,3958	1,26	0,06
152	15/3/1987	250	99	15,07	1218,88	12,97	0,0014	1,5619	3,2709	1208,42	12,95
155	2/5/1987	122	31,7	23,28	2335,62	2,31	0,0592	2,2412	4,0979	2336,73	2,31
159	29/6/1987	79	27	25,16	323,43	1,37	0,0127	2,3509	4,5009	323,27	1,37
160	4/7/1987	128	20,4	29,02	10,14	0,01	0,1000	2,3431	0,3958	0,00	0,01
161	9/7/1987	272	48	19,24	5430,19	9,79	0,0294	1,0065	4,0293	5449,84	9,79
162	20/1/1988	64	78	15,57	3965,12	5,71	0,0260	2,5392	3,1449	3974,58	5,71
165	23/2/1988	159	22	27,89	1093,25	1,58	0,0505	2,3824	9,0037	1093,17	1,58
167	25/2/1988	230	21	28,58	1924,58	6,45	0,0163	2,8376	4,3699	1925,73	6,45
168	2/3/1988	323	26,67	25,31	1099,05	4,64	0,0130	2,3620	5,3413	1099,16	4,64
171	12/3/1988	78	18	31,05	8,42	0,12	0,0880	2,5570	8,7841	8,41	0,12
172	14/3/1988	112	42	20,44	3606,79	5,67	0,0256	1,0695	7,5251	3611,50	5,67
174	19/3/1988	76	37,5	21,52	1115,53	1,69	0,0316	2,9449	4,3984	1112,27	1,69
177	24/3/1988	58	120	12,98	7728,92	13,52	0,0129	2,0566	3,5212	7729,16	13,52
178	5/4/1988	114	108	13,59	6952,69	10,6	0,0203	2,8502	3,9508	6957,55	10,60
179	8/4/1988	71	108	13,57	2474,33	7,23	0,0089	2,4486	9,2708	2463,32	7,23
183	19/4/1988	92	90	14,65	6739,52	9,63	0,0273	1,4805	6,3042	6757,69	9,63
184	20/4/1988	58	28	24,72	849,51	1,81	0,0227	1,9258	2,3287	848,79	1,81
186	30/4/1988	36	80	15,40	1706,52	5,36	0,0114	1,9601	1,6097	1704,15	5,36
187	6/5/1988	63	90	14,65	1727,83	7,82	0,0068	2,7938	4,1448	1731,31	7,82

Tabela B3. Valores dos parâmetros a , K_r e K_f otimizados com o algoritmo RPS para a microbaciad discretizada em 23 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt é o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas (continuação).

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_r (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_f \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
190	13/7/1988	161	12,9	37,90	78,33	0,45	0,0290	2,2957	9,2178	78,27	0,45
191	16/7/1988	133	12	39,78	160,7	0,22	0,1000	2,3431	0,3958	55,51	0,22
194	13/1/1989	341	27	25,16	0,08	0,01	0,1000	2,3431	0,3958	0,003	0,01
197	1/3/1989	164	48	19,24	1766,35	6,75	0,0087	1,3805	5,6616	1761,57	6,75
198	22/3/1989	133	114	13,26	5146,97	20,6	0,0061	2,9714	5,7204	5145,13	20,60
200	27/3/1989	196	32	23,18	1014,43	0,44	0,1000	2,3431	0,3958	323,10	0,44
204	2/4/1989	115	19,09	30,07	1036,24	5,38	0,0103	1,5420	0,6730	1040,15	5,38
205	5/4/1989	456	9	49,76	4,73	0,31	0,0063	2,0757	0,7569	4,73	0,31
206	6/4/1989	284	14	35,97	366,7	3,31	0,0069	2,7678	4,0577	367,84	2,97
210	21/4/1989	137	66	16,73	1296,56	3,75	0,0170	1,3250	6,7184	1311,88	3,75
216	11/5/1989	264	13,5	36,80	322,45	0,58	0,0427	1,6809	5,5304	322,39	0,58
217	12/5/1989	255	36	21,93	551,38	2,96	0,0185	1,8729	2,6309	553,05	2,96
223	3/7/1989	116	16,8	32,28	0,76	0,07	0,0371	1,6902	3,5424	0,76	0,07
228	8/7/1989	425	28,67	26,43	789,09	5,26	0,0076	1,9780	1,9387	795,36	5,24
229	20/9/1989	190	66	16,73	1016,71	16,14	0,0022	1,2158	6,8458	1011,42	16,14
239	10/2/1990	146	42	20,44	777,61	5,09	0,0058	2,3185	2,4447	778,49	5,09
246	18/5/1990	47	210	14,30	512,77	8,56	0,0003	1,1443	3,4575	507,24	8,57
250	6/7/1990	226	13	37,71	0,11	0,01	0,1000	2,3431	0,3958	0,01	0,01
253	19/10/1990	76	90	14,65	2776,25	10,16	0,0088	1,0701	2,0183	2766,15	10,16
254	22/1/1991	212	30	27,91	304,58	0,42	0,1000	2,3431	0,3958	207,43	0,42
263	18/5/1991	242	60	17,44	104,62	0,56	0,0309	2,8313	2,9935	104,35	0,56
264	19/5/1991	239	44	20,01	472,19	4,06	0,0053	1,2204	2,6451	470,41	4,06

Tabela B4. Valores dos parâmetros a , K_R e K_I otimizados com o algoritmo DE para a microbaciad discretizada em 4 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas.

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_I \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
144	7/2/1987	50	96	6,39	7,87	0,19	0,0024	2,0187	5,6905	8,31	0,18
146	12/2/1987	145	25,2	18,80	36,9	0,06	0,0155	2,2752	6,9556	36,88	0,15
155	2/5/1987	122	31,7	15,60	2335,62	2,31	0,0317	2,9766	0,3167	2284,82	2,30
161	9/7/1987	272	48	16,37	5430,19	9,79	0,0150	1,7221	5,4442	4665,22	9,79
162	20/1/1988	64	78	12,44	3965,12	5,71	0,0098	1,6906	3,6584	3923,99	5,71
165	23/2/1988	159	22	21,28	1093,25	1,58	0,0001	1,0001	0,1115	7246,94	13,97
167	25/2/1988	230	21	22,83	1924,58	6,45	0,0067	1,9430	6,1896	2074,49	6,45
168	2/3/1988	323	26,67	20,22	1099,05	4,64	0,0033	1,9139	6,1406	1087,63	4,64
172	14/3/1988	112	42	16,32	3606,79	5,67	0,0079	1,7543	5,1564	3603,77	5,67
178	5/4/1988	114	108	10,84	6952,69	10,6	0,0018	1,0686	3,4124	6748,40	10,60
183	19/4/1988	92	90	11,70	6739,52	9,63	0,0097	1,6473	4,0330	6709,59	9,63
187	6/5/1988	63	90	11,70	1727,83	7,82	0,0001	1,0003	0,1106	2204,01	7,82
190	13/7/1988	161	12,9	21,27	78,33	0,45	0,0022	1,3099	5,1850	78,30	1,35
191	16/7/1988	133	12	17,77	160,7	0,22	0,0014	1,6218	6,0362	162,93	1,92
194	13/1/1989	341	27	21,10	0,08	0,01	0,0017	1,0489	3,3970	0,08	9,99
197	1/3/1989	164	48	15,37	1766,35	6,75	0,0004	1,0315	2,7446	1753,18	6,75
198	22/3/1989	133	114	10,60	5146,97	20,6	0,0001	1,0000	0,1052	20136,13	20,60
200	27/3/1989	196	32	18,52	1014,43	0,44	0,0954	1,6426	7,8849	1014,43	0,44
204	2/4/1989	115	19,09	15,02	1036,24	5,38	0,0001	1,0000	0,1522	2597,20	16,47
205	5/4/1989	456	9	39,75	4,73	0,31	0,0003	1,4591	0,4536	4,85	0,31

Tabela B4. Valores dos parâmetros a , K_R e K_I otimizados com o algoritmo DE para a microbaciad discretizada em 4 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt é o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas (continuação).

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_I \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
206	6/4/1989	284	14	28,74	366,7	3,31	0,0007	1,0479	2,1673	359,53	3,19
210	21/4/1989	137	66	13,37	1296,56	3,75	0,0040	1,7508	1,2041	1219,55	3,75
216	11/5/1989	264	13,5	29,40	322,45	0,58	0,0198	1,9446	6,2177	318,99	0,58
217	12/5/1989	255	36	17,52	551,38	2,96	0,0094	1,5465	5,0079	551,03	2,96
228	8/7/1989	425	28,67	26,43	789,09	5,26	0,0008	1,1206	4,9395	785,54	5,26
229	20/9/1989	190	66	13,37	1016,71	16,14	0,0001	1,0001	0,1085	2978,68	16,14
239	10/2/1990	146	42	16,32	777,61	5,09	0,0001	1,0002	0,1068	972,33	5,09
250	6/7/1990	226	13	30,12	0,11	0,01	0,0003	1,4009	7,7325	0,11	0,08
254	22/1/1991	212	30	19,10	304,58	0,42	0,0322	1,5865	3,1995	303,66	0,42
263	18/5/1991	242	60	14,93	104,62	0,56	0,0081	1,8943	4,7797	104,56	0,56

Tabela B5. Valores dos parâmetros a , K_R e K_f otimizados com o algoritmo DE para a microbaciad discretizada em 10 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas.

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{N}^{1,5}\cdot\text{s}$)	K_R ($\text{kg}\cdot\text{m}/\text{N}^{1,5}\cdot\text{s}$)	$K_f \times 10^8$ ($\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^4$)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
144	7/2/1987	50	96	6,09	7,87	0,19	0,0028	2,1532	7,9588	7,87	0,18
146	12/2/1987	145	25,2	18,42	36,9	0,06	0,1287	2,1200	5,1017	36,90	0,06
152	15/3/1987	250	99	15,96	1218,88	12,97	0,0001	1,0005	0,1010	2793,37	12,97
155	2/5/1987	122	31,7	16,48	2335,62	2,31	0,0001	1,0000	0,2160	12507,53	23,85
161	9/7/1987	272	48	16,62	5430,19	9,79	0,0131	2,1239	1,3769	5648,11	9,79
162	20/1/1988	64	78	8,02	3965,12	5,71	0,0129	1,4309	7,4532	3969,64	5,68
165	23/2/1988	159	22	19,74	1093,25	1,58	0,0208	1,3481	0,6578	1121,05	1,58
167	25/2/1988	230	21	20,22	1924,58	6,45	0,0066	2,3442	5,1329	1797,08	6,45
168	2/3/1988	323	26,67	19,91	1099,05	4,64	0,0053	1,6275	5,8913	1099,07	4,64
177	24/3/1988	58	120	7,19	7728,92	13,52	0,0019	1,2743	2,8260	8509,19	13,52
178	5/4/1988	114	108	9,60	6952,69	10,6	0,0083	1,4887	3,4393	6899,45	10,60
179	8/4/1988	71	108	8,60	2474,33	7,23	0,0018	1,5160	2,4339	2465,61	7,21
183	19/4/1988	92	90	10,37	6739,52	9,63	0,0128	1,6598	2,7929	5929,44	9,63
190	13/7/1988	161	12,9	20,82	78,33	0,45	0,0001	1,0413	2,6346	78,32	2,89
191	16/7/1988	133	12	17,14	160,7	0,22	0,0422	1,4926	3,9957	160,70	0,22
194	13/1/1989	341	27	20,80	0,08	0,01	0,0049	1,5897	7,8534	0,08	0,01
197	1/3/1989	164	48	13,62	1766,35	6,75	0,0020	2,3046	5,9522	1773,88	6,75
198	22/3/1989	133	114	9,39	5146,97	20,6	0,0009	1,3254	8,1418	5146,55	20,60
200	27/3/1989	196	32	16,40	1014,43	0,44	0,0989	2,1717	3,8737	1015,97	0,44
205	5/4/1989	456	9	35,21	4,73	0,31	0,0007	1,2188	1,0708	4,75	0,31

Tabela B5. Valores dos parâmetros a , K_R e K_f otimizados com o algoritmo DE para a microbacia discretizada em 10 elementos, onde $I_{máx}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas (continuação).

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{máx}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_f \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
206	6/4/1989	284	14	25,45	366,7	3,31	0,0024	1,6551	6,4230	366,78	3,20
210	21/4/1989	137	66	11,84	1296,56	3,75	0,0072	1,9076	2,6878	1621,82	3,75
216	11/5/1989	264	13,5	26,04	322,45	0,58	0,0162	2,3069	7,8327	326,90	0,58
217	12/5/1989	255	36	15,52	551,38	2,96	0,0061	1,9069	3,4218	551,38	2,96
228	8/7/1989	425	28,67	26,29	789,09	5,26	0,0021	1,9873	6,3974	798,14	5,26
239	10/2/1990	146	42	14,46	777,61	5,09	0,0015	1,5711	1,1820	778,38	5,09
250	6/7/1990	226	13	26,68	0,11	0,01	0,0052	1,9615	6,5663	0,11	0,01
253	19/10/1990	76	90	9,37	2776,25	10,16	0,0023	1,4420	3,5314	2776,24	10,14
254	22/1/1991	212	30	16,91	304,58	0,42	0,0370	1,5427	5,9440	304,84	0,42
263	18/5/1991	242	60	15,34	104,62	0,56	0,0085	1,4224	1,3580	104,72	0,56

Tabela B6. Valores dos parâmetros a , K_R e K_f otimizados com o algoritmo DE para a microbaciad discretizada em 23 elementos, onde $I_{m\acute{a}x}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas.

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{m\acute{a}x}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_f \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
144	7/2/1987	50	96	14,26	7,87	0,19	0,0001	1,0000	1,8979	128,92	2,08
146	12/2/1987	145	25,2	26,03	36,9	0,06	0,0166	2,6084	6,4176	30,78	0,67
148	2/3/1987	87	33	22,85	1,86	0,06	0,0003	1,9301	4,7876	1,86	0,62
152	15/3/1987	250	99	15,07	1218,88	12,97	0,0011	1,8833	2,8532	1250,31	12,97
155	2/5/1987	122	31,7	23,28	2335,62	2,31	0,0001	1,0000	0,1304	239108,77	27,25
160	4/7/1987	128	20,4	29,02	10,14	0,01	0,1453	2,0067	2,9925	9,84	0,09
161	9/7/1987	272	48	19,24	5430,19	9,79	0,0293	1,2860	6,2218	5427,53	9,79
165	23/2/1988	159	22	27,89	1093,25	1,58	0,0001	1,0000	0,5194	281745,31	18,55
167	25/2/1988	230	21	28,58	1924,58	6,45	0,0164	1,2731	6,8665	1921,95	6,45
168	2/3/1988	323	26,67	25,31	1099,05	4,64	0,0131	1,4158	7,0726	1095,40	4,64
171	12/3/1988	78	18	31,05	8,42	0,12	0,0001	1,0000	5,0146	48,02	1,35
177	24/3/1988	58	120	12,98	7728,92	13,52	0,0001	1,0000	0,1154	46119847,32	159,72
178	5/4/1988	114	108	13,59	6952,69	10,6	0,0209	2,0026	3,4839	6955,27	10,60
183	19/4/1988	92	90	14,65	6739,52	9,63	0,0001	1,0000	0,1011	5216337,51	113,79
191	16/7/1988	133	12	39,78	160,7	0,22	0,0001	1,0000	6,8738	208,43	2,27
194	13/1/1989	341	27	25,16	0,08	0,01	0,9000	2,5058	5,2837	0,02	0,01
197	1/3/1989	164	48	19,24	1766,35	6,75	0,0085	2,0521	3,5220	1817,41	6,75
198	22/3/1989	133	114	13,26	5146,97	20,6	0,0065	2,2650	5,0401	5079,92	20,60
200	27/3/1989	196	32	23,18	1014,43	0,44	0,3137	2,8242	6,6005	1014,36	4,40
205	5/4/1989	456	9	49,76	4,73	0,31	0,0063	2,0354	6,4042	4,71	0,31

Tabela B6. Valores dos parâmetros a , K_R e K_f otimizados com o algoritmo DE para a microbacia discretizada em 23 elementos, onde $I_{m\acute{a}x}$ é a intensidade máxima de chuva, Δt o intervalo de tempo, E_o e Q_o são respectivamente a erosão e vazão observadas, e E_c e Q_c são respectivamente a erosão e vazão calculadas.(continuação).

Evento	Data doEvento	Duração (min)	$i_{m\acute{a}x}$ (mm/h)	Δt (s)	E_o (kg/ha)	Q_o (mm)	a (kg·m ² /N ^{1,5} ·s)	K_R (kg·m/N ^{1,5} ·s)	$K_f \times 10^8$ (kg·s/m ⁴)	E_c (kg/ha)	Q_c (mm)
206	6/4/1989	284	14	35,97	366,7	3,31	0,0069	1,6470	7,8684	366,70	2,97
210	21/4/1989	137	66	16,73	1296,56	3,75	0,0167	1,8929	5,9240	1296,54	3,75
216	11/5/1989	264	13,5	36,80	322,45	0,58	0,0001	1,0000	0,1522	11741,81	3,74
217	12/5/1989	255	36	21,93	551,38	2,96	0,0185	2,5120	7,5209	551,38	2,96
223	3/7/1989	116	16,8	32,28	0,76	0,07	0,0001	1,0002	4,9002	1,70	0,69
228	8/7/1989	425	28,67	26,43	789,09	5,26	0,0077	1,9795	4,1668	771,60	5,24
229	20/9/1989	190	66	16,73	1016,71	16,14	0,0021	1,8591	5,2719	1017,14	16,14
246	18/5/1990	47	210	14,30	512,77	8,56	0,0003	1,1579	1,1698	493,12	7,88
250	6/7/1990	226	13	37,71	0,11	0,01	0,0056	2,7025	2,9763	0,11	0,07
254	22/1/1991	212	30	27,91	304,58	0,42	0,0258	2,5551	6,8464	304,62	1,05
263	18/5/1991	242	60	17,44	104,62	0,56	0,0310	2,2748	8,3164	104,62	0,56