

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ZONA RIPÁRIA DE CERRADO: PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS**

BRUNO ESTEVES TÁVORA

ORIENTADOR: SERGIO KOIDE

**TESE DE DOUTORADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

BRASÍLIA/DF: SETEMBRO – 2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ZONA RIPÁRIA DE CERRADO: PROCESSOS
HIDROSEDIMENTOLÓGICOS**

BRUNO ESTEVES TÁVORA

**TESE SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS DA FACULDADE
DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DOUTOR EM CIÊNCIAS**

APROVADA POR:

**SERGIO KOIDE, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**RICARDO TEZINI MINOTI, DSc (UNB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**LUIZ RAFAEL PALMIER, PhD (UFMG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**KLEBBER TEODOMIRO MARTINS FORMIGA, DSc (UFG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

FICHA CATALOGRÁFICA

TÁVORA, BRUNO ESTEVES

Zona Ripária de Cerrado: Processos Hidrossedimentológicos [Distrito Federal] 2017. xvii, 130p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2017).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Zonas Ripárias

2.Modelagem Hidrossedimentológica

3.Área de Preservação Permanente

4.Qualidade de água

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

TÁVORA, B.E. (2017). Zona Ripária de Cerrado: Processos Hidrossedimentológicos. Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.TD-019/2017, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruno Esteves Távora.

TÍTULO: Zona Ripária de Cerrado: Processos Hidrossedimentológicos.

GRAU: Doutor ANO: 2017

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Bruno Esteves Távora
Quadra 205, lote 09, apto 801 “B”, Águas Claras.
71.925-000 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Marla, e aos meus filhos, Luca e Lis, pela compreensão e apoio;

Aos meus pais;

Aos servidores Antônio Jorge Lunardi, Luiz Beltrão, Otávio Gurgel e Cinara Rocha, por viabilizarem meu afastamento para desenvolvimento das atividades de doutoramento;

Aos amigos de PTARH Sara Ferrigo, Andreia de Almeida e Caroline Neves;

Aos técnicos Irioman Junior e Mercilena Primo, pelo apoio;

Ao Ministério Público do Distrito Federal e Território;

Aos professores Carlos Lima, Dirceu Reis e Rogério Uagoda;

Ao Prof^o Sergio Koide, pela orientação;

Aos Prof^o José Mauro da Silva Diogo e Reginaldo Pereira, pelo apoio institucional da Fazenda Água Limpa – UnB;

Aos servidores e funcionários da Fazenda Água Limpa – UnB;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo financiamento no âmbito do edital MTCI/CNPq/Universal 14/2104.

RESUMO

ZONAS RIPÁRIAS DE CERRADO: PROCESSOS HIDROSSEDIMENTOLÓGICOS

As formações florestais justafluviais são reconhecidamente capazes de promover atenuação no aporte de massa e energia nos corpos hídricos. Essa fitofisionomia, que preenche a zona ripária, tem importante papel no controle de poluição, com consequente manutenção da qualidade das águas. Esse fenômeno de atenuação encontra-se intimamente relacionado aos processos de escoamento que sofrem redução de velocidade ou passam a ocorrer de forma subsuperficial quando o escoamento adentra as áreas florestadas. Na presente tese foi empregada uma análise de cenários progressivos de proteção justafluvial em uma bacia experimental representativa do Cerrado brasileiro confrontando-os com a ausência dessa proteção impositiva. Experimentos de campo conduzidos no presente trabalho indicam, ainda, um papel relevante na interceptação da chuva por essa fitofisionomia florestal. As observações sugerem que 75,3% da precipitação atingem o solo na forma de precipitação interna livre, enquanto 24,7% são interceptados pelo dossel das árvores. Acerca do comportamento hidrossedimentológico da bacia estudada, os resultados indicam as estradas não pavimentadas como principal fonte de sedimentos em áreas preservadas. Isso porque ocorre uma descontinuidade da cobertura vegetal quando essas estradas interseccionam os cursos d'água. Em um cenário de uso rural, faixas de proteção de apenas 5 metros já trouxeram bons resultados em termos de atenuação de aporte de sedimentos para eventos de menor monta. Para eventos de máximas, todavia, a atenuação do aporte de sedimentos só se faz perceptível com faixas de proteção justafluvial bem mais elevadas. Embora em menor frequência, são esses eventos mais extremos responsáveis pela maior porção do sedimento transportado na bacia. Nesse sentido, as simulações de cenários de proteção da floresta ripária sugerem que para uma atenuação da descarga sólida da ordem de 90%, seriam necessários 23m de proteção lateral. Tendo em vista que o modelo de atenuação utilizado não foi especialmente desenvolvido para as condições do Cerrado brasileiro faz-se necessário o levantamento de funções mais regionais de atenuação para incorporação ao modelo hidrossedimentológico.

ABSTRACT

RIPARIAN ZONES OF CERRADO: HYDRO-SEDIMENTOLOGY PROCESSES

The riverside forest formations are recognized for promoting attenuation of mass and energy contributions to water bodies. This vegetation that fills the riparian zone plays a key role in the control of pollution, with consequent maintenance of water quality. This phenomenon of attenuation is closely related to water flow processes. As the water enters the forested areas the runoff experiences reduction of speed or change on water partition with subsurface flow. The present thesis was aimed on scenarios analysis of fluvial protection in an experimental basin representative of the Brazilian Cerrado. Field experiments that have been conducted in the present work also indicated a relevant role in the interception of this forest phytophysiology. The observations suggest that 75.3% of the precipitation reaches the ground as throughfall while 24.7% is intercepted by the canopy. Regarding the hydrosedimentological behavior the results have indicated that the unpaved roads are the main sediment source in preserved basins. In a rural use scenario, protection width of only 5 meters led to good results in terms of attenuation of sediment input for small events. For the more extreme events however, the attenuation of the sediment inputs only becomes noticeable with greater lateral forest protection. Although less frequent, these events are more like to be responsible for the larger portion of the sediment transported in the basin. In this sense, simulations of protection scenarios of the riparian forest suggest that for a solid discharge attenuation of around 90%, it would be necessary a 23m lateral protection. Since the attenuation model used was not specially developed for the conditions of the Brazilian Cerrado, it is necessary to survey more regional attenuation functions for incorporation into the hydrosedimentological model.

Sumário

| | |
|--|-----|
| CESSÃO DE DIREITOS | iii |
| AGRADECIMENTOS | iv |
| RESUMO | v |
| ABSTRACT | vi |
| 1- INTRODUÇÃO | 14 |
| 2- OBJETIVOS..... | 17 |
| 2.1- GERAL..... | 17 |
| 2.2- ESPECÍFICOS | 17 |
| 3- FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 18 |
| 3.1- PROTEÇÃO DAS ZONAS RIPÁRIAS: ASPECTOS JURÍDICOS..... | 18 |
| 3.2- AS ZONAS RIPÁRIAS E OS SERVIÇOS AMBIENTAIS..... | 21 |
| 3.3- PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM ÁREAS FLORESTADAS | 23 |
| 3.4- MODELAGEM DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS E POLUIÇÃO DIFUSA | 30 |
| 3.5- CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS | 33 |
| 3.6- O MODELO SWAT..... | 34 |
| 4- METODOLOGIA | 38 |
| 4.1- ÁREA DE ESTUDO | 40 |
| 4.2- MONITORAMENTO E COLETA DE DADOS..... | 43 |
| 4.2.1- Monitoramento da bacia..... | 43 |
| 4.2.2- Variabilidade espacial na produção de sedimentos..... | 50 |
| 4.2.3- Monitoramento de vertente | 51 |
| 4.1- MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA..... | 62 |
| 4.2- SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE PROTEÇÃO | 65 |
| 5- RESULTADOS | 68 |
| 5.1- CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA | 68 |
| 5.2- LEVANDAMENTO DA CURVA-CHAVE DA SEÇÃO FLUVIOMÉTRICA..... | 69 |
| 5.3- LEVANTAMENTO DA CURVA-CHAVE DE DESCARGA SÓLIDA | 71 |
| 5.4- VARIABILIDADE ESPACIAL NA GERAÇÃO DE SEDIMENTOS | 74 |
| 5.5- ESTUDO DE INTERCEPTAÇÃO | 77 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 5.5.1- | Levantamento preliminar | 77 |
| 5.5.2- | Estudo baseado em evento | 83 |
| 5.6- | MONITORAMENTO DA VERTENTE..... | 94 |
| 5.7- | MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA..... | 97 |
| 5.7.1- | Caracterização das Unidades de Resposta Hidrológicas..... | 97 |
| 5.7.2- | Calibração do modelo..... | 100 |
| 5.7.3- | Simulação de cenários de proteção | 109 |
| 6- | CONCLUSÕES..... | 114 |
| 7- | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 116 |
| | APÊNDICES..... | 121 |
| | A – ALGORITMO PARA LEITURA DE SAÍDA DO MODELO SWAT | 121 |
| | B – ALGORITMO PARA GRAVAÇÃO DOS ARQUIVOS DE ENTRADA E EXECUÇÃO DO MODELO SWAT | 122 |
| | C – ALGORITMO PARA CALIBRAÇÃO DE SEDIMENTOS DO MODELO SWAT | 126 |
| | D - ALGORITMO PARA GERAÇÃO DE CENÁRIOS INCREMENTAIS PARA GERAÇÃO DE CENÁRIOS INCREMENTAIS DE PROTEÇÃO POR APP PARA O MODELO SWAT | 130 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.1 - Principais características dos modelos contínuos discutidos por Borah & Bera (2003). | 32 |
| Tabela 5.1 - Resumo estatístico do ajuste dos modelos de regressão para sólido em suspensão. 73 | |
| Tabela 5.2 - Resumo estatístico das observações de precipitação interna no cerrado..... | 78 |
| Tabela 5.3 - Ajuste dos modelos do CV em função da chuva acumulada em 24h | 79 |
| Tabela 5.4 - Resumo do ajuste do modelo para a precipitação interna na área de cerrado. 82 | |
| Tabela 5.5 - Resumo do ajuste do modelo para a precipitação interna na área de mata | 82 |
| Tabela 5.6 - Resumo dos eventos de precipitação e do coeficiente de precipitação interna livre (ρ) obtido pelo método IS. | 86 |
| Tabela 5.7 - Resumo dos eventos de precipitação e dos parâmetros do modelo de Gash ajustados pelo método IS e PSO + imagem hemisférica..... | 89 |
| Tabela 5.8 - Resumo estatístico do teste t pareado para diferenças nas médias dos parâmetros | 92 |
| Tabela 5.9 - Ranking de sensibilidade dos parâmetros do modelo para geração de escoamento | 101 |
| Tabela 5.10 - Parâmetros ótimos para o modelo SWAT..... | 103 |
| Tabela 5.11 - Ranking de sensibilidade dos parâmetros do modelo para geração de sedimentos..... | 106 |
| Tabela 5.12 - Parâmetros ótimos para o modelo de sedimentos | 108 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Exemplo de ajuste gráfico usado para determinar a precipitação interna e a capacidade de armazenamento. Adaptada de Link et al. (2004)..... | 25 |
| Figura 3.2 - Representação do mecanismo de escoamento pela área variável de afluência. Adaptada de Hibbert & Troendle (1988). | 28 |
| Figura 3.3 - Representação dos mecanismos de escoamento superficial. Adaptada de Mendiondo & Tucci (1997)..... | 28 |
| Figura 3.4 - Rotina simplificada do modelo SWAT para balanço hídrico na HRU/Sub-bacia. Adaptada de (Neitsch et al., 2011)..... | 35 |
| Figura 3.5 - Exemplo de arquivos de entrada do modelo SWAT. a) Arquivo com parâmetros de processos de fluxo subterrâneo; b) arquivo com parâmetros de processos relacionados às características do solo. | 36 |
| Figura 4.1 - Representação das etapas metodológicas | 39 |
| Figura 4.2 - Carta-imagem da bacia experimental | 42 |
| Figura 4.3 - Seção hidrométrica do córrego Capetinga. a) visão da seção; b) nivelamento de régua; c) instalação da PCD; d) PCD finalizada; e e) régua linimétrica. | 44 |
| Figura 4.4 - Equipamentos empregados nas medições de vazão. a) radar de medição de cota; b) medição a vau com ADC; c) e d) medição acústica com Qliner. | 46 |
| Figura 4.5 - Monitoramento de qualidade. a) amostragem na vertical central; b) amostras coletadas; c) corpo hídrico durante evento; d) amostrador automático; e e) local de instalação da sonda multiparamétrica. | 48 |
| Figura 4.6 - Equipamentos utilizados na determinação dos sólidos em suspensão. a) turbidímetro de bancada; b) amostras secas para determinação da massa; c) amostras brutas; e d) sistema de filtragem. | 49 |
| Figura 4.7 - Análise de padrão espacial na geração de SS..... | 50 |
| Figura 4.8 - Arranjo experimental para medição da precipitação interna. | 52 |
| Figura 4.9 - Croqui do arranjo experimental. | 53 |
| Figura 4.10 - Visão geral dos equipamentos utilizados. a) pluviógrafos de báscula instalados na área; b) detalhe da lente 180°; c) arranjo do conjunto câmera, lente e tripé; d) imagem registrada em processamento. | 55 |
| Figura 4.11 - Método da eletrorresistividade. a) Arranjo dos eletrodos (quadripolo); b) linhas equipotenciais geradas. Fonte: Adaptada de Segundo Reynolds (1997)..... | 56 |
| Figura 4.12 - Croqui do esquema de monitoramento da vertente. | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.13 - Parcelas tipo Wischmeier. a) cerrado sentido restrito; b) solo exposto; c) gramínea; e d) mata de galeria. | 59 |
| Figura 4.14 - Coletores de escoamento superficial. a) instalação na mata de galeria; b) instalação no cerrado sentido restrito; c) detalhe de projeto e instalação; e d) fase de instalação. | 61 |
| Figura 4.15 - Representação do algoritmo de controle e calibração desenvolvido. | 64 |
| Figura 4.16 - Uso do solo atual e cenário de uso proposto. | 65 |
| Figura 4.17 - Representação do algoritmo de avaliação do controle incremental da faixa protegida. | 66 |
| Figura 5.1 - Variáveis climáticas da área de estudo. | 69 |
| Figura 5.2 - Levantamento do perfil da seção fluviométrica e características hidráulicas da seção. | 70 |
| Figura 5.3 - Curva-chave da seção fluviométrica. | 70 |
| Figura 5.4 - Exemplo de série de precipitação x vazão da bacia experimental do córrego Capetinga. | 71 |
| Figura 5.5 - Resumo estatístico das amostras de sólidos em suspensão. a) boxplot indicando as faixas de amostragem captadas pelo amostrador automático e USD 49; e b) barra de indicação de média e intervalo de confiança do erro relativo dos dois métodos amostrais. | 72 |
| Figura 5.6 - Relação de variáveis físico-química e hidráulica com a concentração de sólidos em suspensão. a) curva de turbidez x sólidos em suspensão; e b) curva de cota x sólidos em suspensão. | 73 |
| Figura 5.7 - Exemplo de uma série de precipitação x descarga sólida da bacia experimental do córrego Capetinga. | 74 |
| Figura 5.8 - Distribuição espacial das chuvas utilizadas na análise de correlação com pico de turbidez. | 75 |
| Figura 5.9 - Matriz resumo das interações dos pluviógrafos e turbidez máxima. Correlação cruzada, histograma e teste de significância. | 76 |
| Figura 5.10 - Comportamento do coeficiente de variação da precipitação interna em função da precipitação total. a) cerrado; e b) mata de galeria. | 79 |
| Figura 5.11 - Número de coletores de precipitação interna necessários para obtenção de médias com 1%, 5% e 10% de erro. a) cerrado; e b) mata de galeria. | 80 |
| Figura 5.12 - Resultado da regressão quantílica. a) diagrama de caixa dos dados de precipitação interna para o cerrado; b) regressão quantílica para a região de cerrado; c) | |

| | |
|--|-----|
| diagrama de caixa dos dados de precipitação interna para a mata de galeria; e d) regressão quantílica para a região da mata | 82 |
| Figura 5.13 - Eventos de precipitação e posicionamento dos pluviógrafos na etapa dois do estudo de interceptação. | 84 |
| Figura 5.14 - Exemplo de ajuste de dados experimentais pelo método SI..... | 85 |
| Figura 5.15 - Imagem hemisférica do dossel dos quadrantes área experimental, nos quadrantes 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d)..... | 87 |
| Figura 5.16 - Diagrama de caixa do índice de Nash modelados por meio de parametrização com os métodos IS e PSO + imagem hemisférica. | 88 |
| Figura 5.17 - Diagrama de caixa dos parâmetros do modelo de Gash. Resultados da parametrização pelos métodos IS e PSO + imagem hemisférica..... | 90 |
| Figura 5.18 - Resultado da simulação de throughfall da parametrização baseada no PSO/imagem hemisférica. a) evento 1; b) evento 2; c) evento 10; e d) evento 21 | 93 |
| Figura 5.19 - Interceptação acumulada ao longo do período estudado | 94 |
| Figura 5.20 - Série temporal de tomografias elétricas da vertente..... | 95 |
| Figura 5.21 - Contaminação do coletor por contribuição externa..... | 96 |
| Figura 5.22 - Resultado das primeiras amostras das calhas coletoras..... | 97 |
| Figura 5.23 - Camadas de entrada do modelo SWAT. a) Mapa de tipos de uso; b) Mapa de solos; c) Mapa de declividades; e d) Unidades de Respostas Hidrológicas..... | 98 |
| Figura 5.24 - Resumo das HRUs equivalentes da Bacia Experimental Córrego Capetinga. | 99 |
| Figura 5.25 - Resultado da simulação com parametrização de Ferrigo (2014). a) hidrogramas; e b) curva de permanência das vazões. | 100 |
| Figura 5.26 - Resultado da amostragem por hipercubo latino: efeito individualizado da função objetivo em resposta às alterações dos parâmetros. | 101 |
| Figura 5.27 - Regiões ótimas dos parâmetros do modelo SWAT..... | 102 |
| Figura 5.28 - Resultado da calibração de vazão utilizando o método PSO. | 103 |
| Figura 5.29 - Verificação do modelo pós-calibração. | 104 |
| Figura 5.30 - Gráfico de barras da distribuição dos parâmetros ótimos ($NSE > 0,5$)..... | 105 |
| Figura 5.31 - Resultado da calibração de sedimentos utilizando PSO..... | 108 |
| Figura 5.32 - Comparativo entre os valores K da base Statsgo com o valor K calibrado. | 109 |
| Figura 5.33 - Efeito marginal do incremento da APP sobre a concentração média de sólidos em suspensão ao longo do período simulado. | 110 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.34 - Efeito marginal do incremento da APP sobre a concentração máxima de sólidos em suspensão ao longo do período simulado..... | 110 |
| Figura 5.35 - Atenuação das descargas sólidas com incremento da proteção..... | 111 |
| Figura 5.36 - Resultado das simulações de alguns cenários de proteção justafluvial..... | 112 |
| Figura 5.37 - Frequência dos dias com turbidez média inferior a 40 NTU..... | 113 |

Listas de Abreviações, Nomenclatura e Símbolos

| | |
|----------------|--|
| P_n | - Precipitação Interna (L); |
| P_G | - Precipitação Total (L); |
| P'_G | - Lâmina de saturação do dossel (L) |
| ρ | - Coeficiente Free throughfall (adimensional); |
| \overline{E} | - Evaporação média (L) |
| \overline{R} | - Precipitação média (L) |
| S | - Armazenamento (L) |
| $f(t)$ | - Capacidade de infiltração no instante t (L.T-1); |
| f_c | - Capacidade mínima de infiltração (L.T-1); |
| f_0 | - Capacidade mínima de infiltração no instante 0 (L.T-1); |
| t | - Tempo (T); |
| e | - Número de Euler (adimensional); |
| k | - Constante (adimensional). |
| E | - Escoamento (L); |
| R | - Precipitação (L); |
| $(1-h)$ | - Área efetiva de produção de escoamento (L ²) |
| $f(ip)$ | - Função da capacidade de infiltração (LT ⁻¹) |
| Y_i^{obs} | - Valor observado da variável (dimensão da variável); |
| Y_i^{sim} | - Valor simulado da variável (dimensão da variável); |
| $Y_i^{médio}$ | - Valor médio da variável observada (dimensão da variável); |
| Q | - Vazão da seção de escoamento (L ³ T ⁻¹); |
| k | - Parâmetro da curva chave relacionado à geometria da seção (adimensional); |
| h | - Cota linimétrica (L); |
| h_0 | - Cota linimétrica de vazão nula (L); |
| n | - Parâmetro da curva chave relacionado à geometria da seção (adimensional); |
| S | - Área da seção de escoamento (L ²); |
| P_m | - Perímetro molhado da seção de escoamento (L); |
| R_h | - Raio hidráulico da seção de escoamento (L); |
| n | - Número de pluviômetros (adimensional); |
| t | - Valor crítico da distribuição t-student (adimensional); |
| CV | - Coeficiente de variação (adimensional); |
| D | - Erro percentual (adimensional); |
| Δ | - Variação da resistividade (adimensional); |
| Ω | - Resistividade (ohms.L); |
| V | - Diferença de potencial (V); |
| I | - Corrente elétrica (A); |
| P | - Probabilidade da estatística ser igualada/superada sendo a hipótese nula verdadeira; |
| R | - Coeficiente de correlação Spearman (adimensional); |
| R^2 | - Coeficiente de determinação (adimensional); |
| σ | - Desvio padrão (dimensão da variável); |
| g_1 | - Coeficiente de assimetria de Pearson (adimensional); |
| $trap_{ef}$ | - Fração de sedimento removida (adimensional); |

| | |
|-----------------------|---|
| $width_{filterstrip}$ | - Largura da faixa vegetada (L); |
| q_{max} | - Vazão de pico (L^3T^{-1}); |
| Q_{sub} | - Escoamento superficial ; |
| Sed | - Produção de sedimento (M); |
| A_{HRU} | - Área da HRU (L^2); |
| ANSWERS | - Areal Non point Source Watershed Environment Response Simulation; |
| APP | - Área de preservação permanente; |
| CN | - Curva número; |
| CNPq | - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico; |
| DEM | - Modelo digital de elevação; |
| DESVPAD | - Desvio Padrão; |
| ET | - Evapotranspiração; |
| FAL | - Fazenda Água Limpa; |
| HRU | - Unidade de Resposta Hidrológica; |
| HSPF | - Hydrological Simulation Program Fortran; |
| K_{usle} | - Erodibilidade do solo; |
| LS_{usle} | - Fator de declividade e de comprimento de rampa; |
| MCTI | - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações; |
| MUSLE | - Equação Universal de Perda de Solos Modificada; |
| NSE | - Índice de Eficiência de Nash; |
| PBIAS | - Percentual de viés; |
| RMSE | - Erro médio quadrático; |
| RSR | - |
| RUSLE | - Equação Universal de Perda de Solos Revisada; |
| SCS | - Soil Censervation Service; |
| SWAT | - Soil and Water Assessment Tool; |
| UC | - Unidade de Conservação; |
| UnB | - Universidade de Brasília; |
| USEPA | - United States Environmental Protection Agency; |
| USLE | - Equação Universal de Perda de Solos; |

1- INTRODUÇÃO

A preocupação com a preservação dos mananciais há muito integra o ordenamento jurídico brasileiro. Se inicialmente o Código de Águas, instituído pelo Decreto nº 24.646, de 10 julho de 1934, tratou de forma tímida a questão da preservação dos recursos hídricos, as leis que o sucederam muito avançaram sobre esse aspecto. Em especial, o Código Florestal de 1965, e suas alterações, visaram proteger, não apenas as florestas e demais formações vegetais, mas, por corolário, os recursos hídricos. A função ambiental de preservar esses recursos figura entre os objetivos das Áreas de Preservação Permanente - APP, espaço especialmente protegido previsto no ordenamento legal pátrio.

Com a promulgação da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, extinguiram-se diplomas anteriores que tratavam da proteção da vegetação nativa. Embora o novo regramento tenha mantido a previsão e os objetivos das APPs, promoveu alterações nas regras de proteção, abrindo espaço para o reconhecimento de situações consolidadas tanto no meio rural como no meio urbano, sem abordar as particularidades regionais. Dito de outra forma, a revisão mais recente da lei florestal brasileira não avançou na regionalização dos parâmetros de proteção das formações florestais ribeirinhas.

As zonas ripárias, caracterizadas pela fitofisionomia marginal diretamente influenciada pelo corpo hídrico, podem exceder o espaço legalmente definido da APP, perdendo essa proteção impositiva. A importância da região ripária no controle de processos hidrossedimentológicos justifica o aprofundamento na discussão dos padrões de proteção, em especial a faixa a ser legalmente protegida.

As formações florestais justafluviais são reconhecidamente capazes de promover atenuação no aporte de massa e energia nos corpos hídricos. Devido ao controle de poluição, com conseqüente manutenção da qualidade das águas, são conhecidas como faixas tampão (*buffer strips*), em uma alusão às soluções químicas capazes de manter seu pH mesmo com adição de certas quantidades de ácidos ou bases. A forma como esse controle na qualidade das águas é exercido encontra-se intimamente relacionada aos processos de escoamento que sofrem redução de velocidade ou mesmo passam a ocorrer de forma subsuperficial quando o escoamento adentra as áreas florestadas.

A disponibilidade hídrica em seus aspectos de quantidade, bem como de qualidade, é sempre uma temática contemporânea. Na atualidade brasileira, o Distrito Federal vem passando por um processo de crise hídrica necessitando, inclusive, de adoção de medidas de racionamento. Como visto anteriormente, as florestas justafluviais podem contribuir para a melhoria da disponibilidade hídrica, seja pela redução do assoreamento em reservatórios, seja viabilizando captações de melhor qualidade.

Com o presente estudo pretende-se analisar a dinâmica hidrológica em zonas ripárias de cerrado, avaliando sua importância na manutenção dos processos hidrossedimentológicos, com a definição do incremento marginal desse serviço ambiental. O monitoramento hidrossedimentológico em bacia experimental foi empregado para obtenção direta de dados que subsidiam a compreensão desses processos de fluxo de água e sedimento através da formação florestal ripária.

De posse de um conjunto de dados capaz de caracterizar o comportamento hidrossedimentológico da bacia, foram utilizados modelos numéricos computacionais adequados ao tratamento dos principais mecanismos de escoamento e de transporte de poluição difusa.

A modelagem hidrológica tem sido classicamente aplicada para previsões, compreensão de comportamentos passados, preenchimento de falhas em séries históricas e análise de cenários. Essa última constitui uma ferramenta à qual gestores recorrem para o processo decisório. A análise de cenários permite inferir o comportamento da bacia hidrográfica para inúmeros panoramas de uso, ocupação e práticas conservacionistas sem necessidade de intervenções físicas no ambiente. A reprodutibilidade e a possibilidade de se executarem milhares de simulações no ambiente computacional são fatores atrativos para o uso de modelos hidrossedimentológicos na identificação do papel das áreas de preservação permanente.

O processo de modelagem adotado compreendeu as fases de seleção dos modelos compatíveis com os objetivos pretendidos; calibração com dados observados em campo; verificação dos modelos; e simulação de cenários distintos de proteção da floresta ripária. Foram simulados cenários incrementais de área de preservação permanente ao longo dos rios avaliando-se a resposta hidrossedimentológica desses cenários.

A hipótese testada é a de que as rijas faixas de proteção estabelecidas no ordenamento jurídico brasileiro, a despeito da grande diversidade de biomas e conflitos de uso, podem não ser apropriadas à realidade do Cerrado. A maior exposição do solo no Cerrado, em comparação com biomas florestais, é um aceno para um tratamento mais cuidadoso em relação aos processos hidrossedimentológicos nesse bioma.

Preservar os recursos hídricos e assegurar o bem-estar das populações humanas figuram entre os objetivos das áreas de preservação. Nesse sentido, espera-se que sua manutenção se traduza em um comportamento hidrossedimentológico que não comprometa os usos pretendidos para o corpo hídrico, em especial o uso prioritário de abastecimento, notadamente influenciado pela carga sólida suspensa.

A presente Tese se debruça na apresentação do problema no capítulo inaugural. Os objetivos propostos pela pesquisa encontram-se no Capítulo 2, que é lastreado por uma fundamentação teórica presente no Capítulo 3. A proposta metodológica empregada para atingir os objetivos propostos encontra-se no Capítulo 4. Os resultados obtidos ao longo do trabalho de doutoramento, a análise e a discussão desses resultados encontram-se no Capítulo 5. Esse capítulo, por seu turno, é subdividido nos temas: caracterização climatológica, levantamento da curva-chave da seção fluviométrica, levantamento da curva-chave de descarga sólida, variabilidade espacial na geração de sedimentos, estudo de interceptação, monitoramento da vertente e, modelagem hidrossedimentológica. Por fim, no Capítulo 6 é apresentada uma reflexão final sobre os resultados encontrados.

2- OBJETIVOS

2.1- GERAL

Avaliar o comportamento de processos hidrossedimentológicos em uma bacia hidrográfica preservada do bioma Cerrado, com ênfase na proteção proporcionada pelas florestas ripárias na manutenção do regime sedimentológico.

2.2- ESPECÍFICOS

- Identificar, experimentalmente, o papel da fitofisionomia de mata ripária no processo de interceptação;
- Identificar, experimentalmente, os mecanismos predominantes de fluxo de água na zona estudada;
- Mensurar o aporte de sedimento no corpo hídrico em condições naturais de cobertura vegetal;
- Estimar o benefício marginal associado ao serviço ambiental prestado pela fitofisionomia justafluvial por meio de simulação de cenários de uso, ocupação e proteção;
- Desenvolver um algoritmo de calibração de vazões, do modelo Swat, em ambiente de programação R;
- Desenvolver um algoritmo de calibração de sedimentos, do modelo Swat, em ambiente de programação R.

3- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1- PROTEÇÃO DAS ZONAS RIPÁRIAS: ASPECTOS JURÍDICOS

A história da legislação florestal no Brasil inicia-se ainda em sua fase colonial. Com a chegada dos primeiros portugueses, a lei da Coroa era empregada em sua colônia. Segundo Resende (2006), a aplicação dos diplomas jurídicos da metrópole era usada para coibir práticas sociais, todavia com objetivos de cunho econômico de proteção de um bem. As Ordenações Filipinas de 1603 consistiam em uma compilação de todas as leis de Portugal em uma espécie de código que passou a vigorar não só naquele Reino, mas também em suas colônias (WAINER, 1993). A preocupação com os recursos hídricos já se fazia presente nesses diplomas de 1603. O texto era taxativo ao proibir o lançamento em rios de substâncias que pudessem matar peixes. Nas palavras de Almeida (1870) rezava o Título LXXXVIII do Livro V das Ordenações Filipinas:

E pessoa-alguma não lance nos rios e lagoas, em qualquer tempo do anno trovisco, barbasco, cocca, cal, nem outro algum material, com que se o peixe mate.

Com relação aos recursos florestais, o Regimento do Pau-Brasil de 1605 pode ser considerado o primeiro ato jurídico de proteção florestal no Brasil. Esse ato limitava a exploração da árvore homônima, além de exigir expressa autorização real para o seu corte (WAINER, 1993). Posteriormente, segundo Magalhães (2002), em 1797 todas as matas e arvoredos situados no litoral ou na margem dos rios que desembocassem no mar ou que permitissem a passagem de jangadas transportadoras de madeira foram declarados propriedade da Coroa. Tais instruções constam na Carta Régia de 13 de março de 1797.

Não obstante, não havia, no ordenamento do período colonial, um vínculo claro entre proteção das florestas e seus benefícios aos recursos hídricos tal qual rezam os dispositivos legais contemporâneos. Os bens ambientais eram tratados de forma segregada com claros objetivos de proteção de recursos econômicos que estes representavam, como as normas que tratavam da exploração do pau-brasil, ou de proteção dos peixes, trazidas no dispositivo antipoluição das Ordenações Filipinas.

Com a evolução da legislação florestal, houve uma mudança de eixo nos objetivos dos regulamentos, abandonando-se a visão exclusivamente protecionista do bem econômico ao incorporar outros fitos. A ampliação das finalidades das normas jurídicas florestais ocorreu na fase republicana do Brasil e passou a abarcar outro bem até então menos valorizado: os recursos hídricos.

A proteção das águas figurava como uma das finalidades das “florestas protetoras” previstas no Decreto nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934, que instituiu o primeiro Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 1935). Esse diploma do governo de Getúlio Vargas reconhece as florestas como bem de interesse comum, formulando em palavras o papel conservacionista das florestas justafluviais em relação ao seu curso d’água. Surge, nesse momento, a primeira norma jurídica brasileira que não só reconhece, mas também vincula, a proteção das florestas à manutenção das águas. Todavia, o dispositivo legal deixou de avançar no estabelecimento de parâmetros mínimos acerca de faixas de proteção das florestas às margens dos rios.

A promulgação de faixas marginais de proteção das formações florestais surge com o advento do Novo Código Florestal, instituído pela Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965. Preceitua o artigo inaugural da lei que as florestas existentes no território nacional e as demais formas de vegetação, reconhecidas de utilidade às terras que revestem, são bens de interesse comum a todos os habitantes do país (BRASIL, 1965a). Em outras palavras, o texto normativo reconhece a função social das formações florestais.

No cumprimento dessa função social, o diploma legal em exposição impunha a preservação permanente das florestas e demais formações vegetais situadas ao longo de rios e de outros cursos d’água em faixa marginal, de forma escalonada, iniciando-se em 5 metros para rios com até 10 metros de largura, até 100 metros para rios com mais de 200 metros de largura. Havia no Código de 1965 uma clara vinculação entre a preservação das florestas ripárias e o próprio rio que elas suportavam. Passou assim o ordenamento jurídico a proteger não apenas as florestas e demais formações vegetais, mas, por extensão, os recursos hídricos.

Segundo Ribeiro (2011) projeto de lei que deu origem ao Novo Código Florestal de 1965 foi fruto do grupo de trabalho, formado por engenheiros e juristas, criado pelo

Memorando Presidencial G.P./M.A. nº 42, de 5 de abril de 1961. O estabelecimento das faixas marginais de proteção, tal qual disposto naquele primeiro diploma, teve por base o levantamento do estado da arte disponível naquele momento, com sugestão de valores mínimos a serem observados.

A exposição de motivos que acompanhou a Lei nº 4771, de 1965, corrobora com os apontamentos de Ribeiro (2011). Dessarte, a fixação dessas faixas de proteção das florestas não se deu de forma arbitrária, ainda assim não foi lastreada por critérios técnicos mais regionais, conforme se verifica no documento expositivo que acompanhou aquele projeto de lei (BRASIL, 1965b):

Entretanto, os limites mínimos de preservação permanente fixados na norma legal não excluirão medidas mais drásticas quando o Poder Público Federal ou o Estadual considerarem insuficientes, na região, os preceitos comuns. O Anteprojeto obriga a elasticidade exigida pelo progresso da ciência, de modo a que a técnica não seja tolhida pela rigidez da Lei.

A função protetora dos recursos hídricos proporcionada pelas formações florestais é ratificada em outro diploma legal brasileiro. Trata-se especificamente do artigo 47 da Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Não foi outra a intenção do legislador em, não só reconhecer essa importância, mas também exigir uma compensação financeira pelos serviços prestados por esses espaços especialmente protegidos. Dispõe o citado artigo que:

Art. 47. O órgão ou empresa, público ou privado, responsável pelo abastecimento de água ou que faça uso de recursos hídricos, beneficiário da proteção proporcionada por uma unidade de conservação, deve contribuir financeiramente para a proteção e implementação da unidade, de acordo com o disposto em regulamentação específica.

Mais recentemente a promulgação da Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, extinguiu do mundo jurídico anteriores diplomas legais que tratavam da proteção florestal, em

especial o Código Florestal de 1965. Embora esse novo diploma tenha mantido a previsão e os objetivos das APPs, promoveu alteração na forma de contabilização desse espaço. Cite-se, como exemplo, a alteração na definição do início do cômputo da área justafluvial protegida, que passou do nível mais alto do rio para a borda da calha do leito regular. Os impactos dessas modificações são de difícil mensuração, pois que exigem uma abordagem com simulação dos complexos serviços ambientais prestados pelas formas vegetais ripárias. Indo além, o novo diploma não avançou em um dos pontos mais importantes: a necessidade de regionalização das faixas de proteção até então estabelecidas como mandamento comum.

Uma abordagem para a regionalização é a identificação, para os diversos biomas, daquelas faixas marginais de proteção necessárias ao cumprimento dos objetivos preceituados de preservação dos recursos hídricos, da paisagem, da estabilidade geológica e da biodiversidade; facilitação do fluxo gênico de fauna e flora, proteção do solo; e assecuração do bem-estar das populações humanas.

3.2- AS ZONAS RIPÁRIAS E OS SERVIÇOS AMBIENTAIS

O ecossistema ripário é resultado de interações de natureza hidrológica, geomorfológica, ecológica e física. Essas zonas, que incluem principalmente as margens e as cabeceiras de drenagem dos cursos d'água, desempenham um dos mais importantes serviços ambientais, que consiste na manutenção dos recursos hídricos, em termos de qualidade e vazão (LIMA & ZAKIA, 2006).

Em especial, diversos autores apontam para a importância das zonas ripárias na manutenção da qualidade das águas dos corpos hídricos. A esse efeito tem-se atribuído o título de tamponamento, pois que as zonas ripárias amenizam os resultados deletérios da introdução de massa e energia pelos fluxos adjacentes. Attanasio *et al.* (2012) ressaltaram a influência da zona ripária no escoamento direto na microbacia, no aumento da capacidade de armazenamento de água e na manutenção da qualidade da água através da filtragem superficial de sedimentos e retenção subsuperficial de nutrientes. Nesses termos percebe-se que o estudo das zonas ripárias deve, necessariamente, iniciar-se com o entendimento da dinâmica dos fluxos de massa na bacia. Compartilham desse entendimento Baker *et al.*

(2001), por entenderem que os padrões espaciais do transporte hidrológico superficial e subsuperficial são elementos chave para compreensão do significado ecológico dos processos existentes nas zonas ripárias.

A importância do tamponamento da vegetação ripária na manutenção da qualidade das águas pelas diferentes vias foi, por sua vez, destacada em estudos como o de Osborne & Kovacic (1993), que observaram uma significativa remoção de nitrogênio transportado subsuperficialmente por zona ripária florestada e a atenuação do aporte de sedimentos transportados pelo escoamento superficial, e o de Newbold *et al.* (2010), que igualmente atestaram a efetividade desse tamponamento na remoção de sólidos em suspensão - SS.

McKergow *et al.* (2006a) e McKergow *et al.* (2006b) estudaram os processos hidrológicos e de qualidade da água em zonas ripárias com duas coberturas, uma composta por gramíneas e outra florestada. Os autores verificaram que ambas as áreas foram capazes de reduzir o aporte de sedimentos e nutrientes advindos do escoamento superficial. Adicionalmente, verificaram que o escoamento subsuperficial, nas condições estudadas, foi o processo dominante para o transporte de nutrientes.

O reconhecimento das zonas ripárias na manutenção da qualidade das águas tem levado ao estabelecimento de regras de proteção para esses ambientes ribeirinhos. Todavia, Gough (1988) *apud* Osborne & Kovacic (1993) apontou que os esforços dos gestores para o estabelecimento de normas genéricas para fixação de larguras de proteção para zonas ripárias são inadequados, pois se baseiam em uma simplificação de processos físicos complexos. Esse modelo descrito por Gough é atualmente o adotado no Brasil com estabelecimento de Áreas de Preservação Permanente - APP que variam de 30 a 500m, horizontalmente, a partir do leito regular do corpo hídrico.

Attanasio *et al.* (2012), ao estudarem a microbacia do ribeirão São João, em Mineiros do Tietê – SP, concluíram que apenas 27,6% da zona ripária da bacia estudada compreendem a APP, apontando para a vulnerabilidade da maior parte dessa zona. Os autores defendem a aplicação de instrumentos de manejo integrado da microbacia com priorização da alocação da reserva legal nas áreas ripárias não coincidentes com APP.

No centro-oeste brasileiro, Silva Júnior (2001), ao estudar a estrutura das comunidades de matas de galeria representativa do Cerrado, igualmente concluiu pela efetividade parcial de proteção legal dessas regiões. O autor verificou que regime similar de umidade de solo resulta em características similares de composição florística. A comunidade com característica úmida, no caso estudado, alcançou até 80 metros de distância horizontal em relação à margem do córrego, enquanto a proteção legal dessas áreas é de apenas 30 metros.

3.3- PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM ÁREAS FLORESTADAS

O fluxo nos rios é uma das diversas manifestações do ciclo hidrológico. Esse escoamento é o resultado integrado dos inúmeros processos de montante em resposta a um evento de precipitação. Nesses termos, se trata não de um evento localizado, mas sim de um fenômeno cuja escala é a bacia hidrográfica (BRUTSAERT, 2010).

O início desse fenômeno de transformação da precipitação em escoamento se dá com a interceptação da chuva pela fitofisionomia local. Em áreas florestadas os processos de interceptação não podem ser negligenciados, visto que, segundo Brutsaert (2010), essas perdas podem representar de 10% até 40% da precipitação total.

A interceptação pode ser definida como a porção da precipitação que umedece e é temporariamente armazenada sobre a vegetação. Segundo Véliz-Chávez *et al.* (2014), a relação entre precipitação e interceptação pode ser descrita por meio de três processos na qual a água interage com a vegetação até atingir o solo. O primeiro deles ocorre quando a água passa através dos vazios entre as folhas e galhos. Tal porção da precipitação é conhecida com *free throughfall*, designada no presente trabalho por precipitação interna livre. O segundo processo ocorre quando parte da precipitação flui pelos galhos concentrando-se para posteriormente escoar pelo tronco das árvores. Esse escoamento é conhecido como *stemflow*. O terceiro e último processo ocorre quando a chuva atinge as folhas das árvores antes de gotejar, sendo designado por *dripping*. Após atingir o solo, seguindo os três processos descritos, é que se tem a precipitação efetiva. Alguns autores, a exemplo de Helvey & Patric (1966), designam por *throughfall* a combinação dos processos de *dripping* e de *free throughfall*. Essa combinação de processos será designada no presente trabalho por precipitação interna.

A diferença entre a chuva total e a precipitação efetiva é o montante interceptado pela fitofisionomia que possui uma capacidade de armazenamento. Ainda segundo Véliz-Chávez *et al.* (2014), essa capacidade de armazenamento apresenta variabilidade temporal e espacial dentro de uma fitofisionomia, sendo ainda influenciada pela intensidade e duração do evento de precipitação.

Grande parte dos estudos acerca da interceptação é dirigida às áreas florestadas, onde essa componente do ciclo hidrológico se expressa mais intensamente. Contudo, tanto o tipo de vegetação, como as características da precipitação, desempenham um papel nesse fenômeno (BRUTSAERT, 2010). Alguns trabalhos foram dedicados ao Cerrado brasileiro, abrangendo algumas fitofisionomias. Silva Júnior (2008) promoveu levantamento experimental em área de mata ciliar de Cerrado no estado do Tocantins. Utilizando-se de coletores fixos, o autor observou valores de precipitação interna de 0,94 vezes a precipitação incidente. A adoção de coletores aleatoriamente realocados gerou, segundo o autor, medições de precipitação interna de 0,93 vezes a precipitação em campo aberto. Abrangendo as fitofisionomias de mata ciliar, cerradão e cerrado *strictu sensu*, Carvalho *et al.* (2013) encontraram valores de precipitação interna de, respectivamente, 71,7%; 72,2%; 71,6% em relação à precipitação. Segundo os autores, não houve diferenças estatisticamente significativas entre as três fisionomias avaliadas.

Link *et al.* (2004) propuseram um método gráfico de caracterização da capacidade de armazenamento e da precipitação interna livre com base em dados de medição da precipitação total e da precipitação interna. Segundo os autores, quando um evento de precipitação se inicia, ocorre predominantemente o processo de precipitação interna livre. Dessa forma, a precipitação efetiva (P_n) cresce linearmente com a precipitação total (P_G) a uma taxa constante e menor que 1 até que o dossel se torne saturado. Uma vez atingida a precipitação acumulada necessária para saturação da vegetação (P'_G), ocorre um ponto de inflexão na curva acumulada de P_G versus P_n . A partir desse ponto, P_n cresce na medida em que a água goteja a partir das folhas, conforme se observa na Figura 3.1.

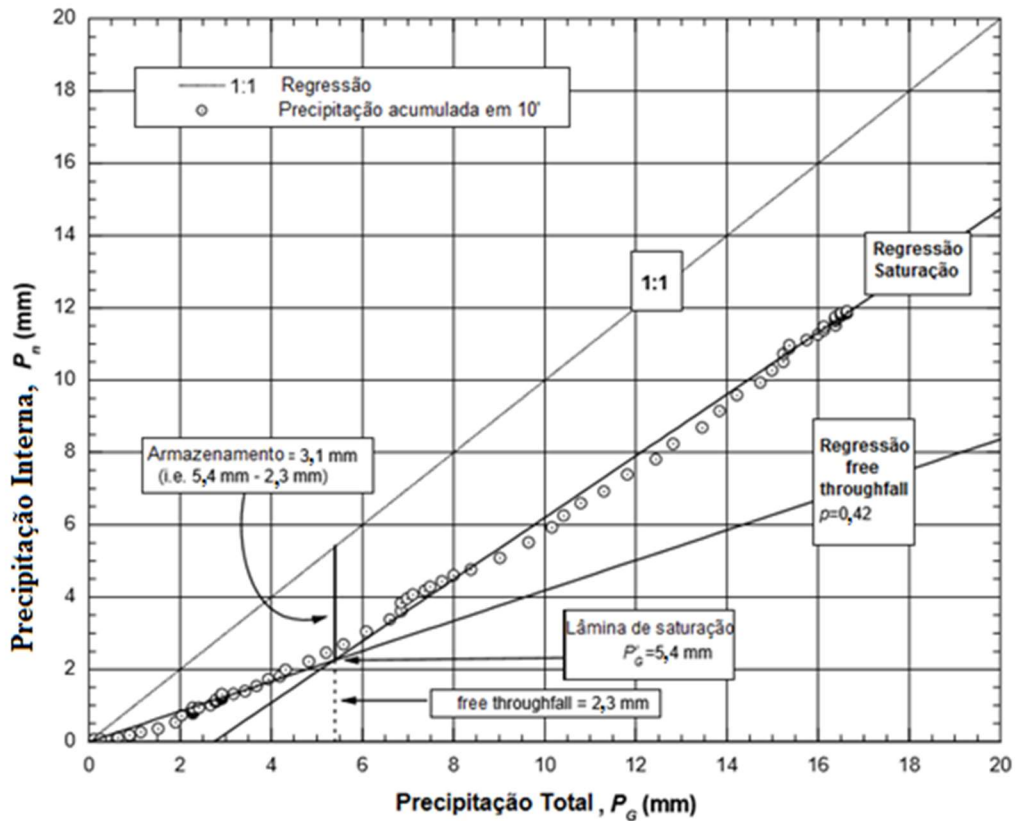


Figura 3.1 - Exemplo de ajuste gráfico usado para determinar a precipitação interna e a capacidade de armazenamento. Adaptada de Link *et al.* (2004)

Após a saturação do dossel, a inclinação da curva $P_n = f(P_G)$ será igual à unidade caso não ocorra evaporação durante o evento de precipitação. Inclinações menores que 1 indicam ocorrência de processo evaporativo durante o evento de chuva. Para o caso em que a taxa de interceptação supere as perdas por evaporação, a inclinação da reta será maior que a unidade (LINK *et al.*, 2004).

A abordagem desenvolvida por Link *et al.* (2004) advém do modelo analítico descrito por Gash (1979), que divide o equacionamento da interceptação em dois momentos. O primeiro refere-se ao período que antecede a saturação do dossel, no qual a precipitação interna (P_n) se relaciona com a precipitação total (P_G) através do coeficiente angular associado à precipitação interna livre (ρ) nos seguintes termos:

$$P_n = \rho P_G \quad (1)$$

Em um segundo momento, após a saturação do dossel, ocorrem os processos de *dripping*, evaporação e precipitação interna livre. Nesse segundo caso, a precipitação efetiva pode ser determinada pelo seguinte equacionamento:

$$P_n = \rho P'_G + \left(1 - \frac{\bar{E}}{R}\right) (P_G - P'_G) \quad (2)$$

Onde: P_n é a precipitação interna; ρ é o coeficiente de precipitação interna livre; P'_G é a lâmina de saturação do dossel; $\frac{\bar{E}}{R}$ é a razão entre a taxa de evaporação e a taxa de precipitação; e, por fim, P_G representa a precipitação.

No método baseado no evento a inclinação da linha pré-saturação provém uma estimativa de ρ , enquanto a declividade da linha pós-saturação gera uma estimativa de $\frac{\bar{E}}{R}$. O valor de P_G no ponto de intersecção das duas retas proporciona o valor de P'_G e, por último, a diferença entre P_G e P_n no ponto de intersecção deriva-se o valor do armazenamento (S) (PYPKER *et al.*, 2005).

Autores como Chen *et al.* (2013) e Zimmermann *et al.* (2009) utilizaram-se da medição direta do coeficiente de precipitação interna livre ρ monitorando a estrutura do dossel das árvores, seja com utilização de analisadores a laser, seja com aplicação de fotografias hemisféricas. O coeficiente ρ do modelo de Gash (1979) reflete justamente a fração de vazios no dossel florestal, ou seja, os espaços livres entre o conjunto de folhas por onde a precipitação atinge livremente o solo.

Superada a etapa inicial de interceptação, a precipitação efetiva resultante inicia outros processos de interação com a superfície da bacia para, enfim, ocorrer a geração do escoamento. Comentou Beven (2006) que esse processo de transformação da precipitação em escoamento nos rios foi, inicialmente, abordado pelo trabalho de Horton (1933), que considerou a elevação na vazão dos rios diante de um evento de precipitação como resultante do escoamento superficial advindo do excesso de precipitação frente à capacidade de infiltração dos solos que compõem a bacia hidrográfica. Esse mecanismo ficou conhecido como *escoamento superficial por excedente de infiltração*. O equacionamento proposto por Horton (1933) pode ser expresso da seguinte forma:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

onde: $f(t)$ - capacidade de infiltração no instante t ($L.T^{-1}$); f_c - capacidade mínima de infiltração ($L.T^{-1}$); f_0 - capacidade mínima de infiltração no instante 0 ($L.T^{-1}$); t - tempo (T); e - número de Euler (adimensional); e k - constante (adimensional).

Posteriormente, Betson (1964) desenvolveu um modelo com base na teoria de Horton, introduzindo o processo de interceptação e outro designado pelo autor como *área parcial de escoamento superficial*. O autor observou que a aplicação do modelo de Horton não explicava corretamente o escoamento das bacias hidrográficas por ele estudadas. Isso porque a contribuição do escoamento, segundo Betson (1964), frequentemente advém de parte da área da bacia e não de toda a bacia como defendido por Horton (1933). Nesses termos o modelo proposto por Betson pode ser descrito pela seguinte equação:

$$R - \frac{E}{(1-h)} = \frac{f(ip)}{(1-h)} \quad (4)$$

onde: “R” é a precipitação (L); “E” representa o escoamento (L), $f(ip)$ é uma função que rege a capacidade de infiltração; e $(1 - h)$ representa a área efetiva de produção de escoamento da bacia.

Esse conceito de área parcial de afluência proposto por Beston foi aprimorado por Dunne & Black (1970). Os autores observaram, a partir de dados de uma bacia experimental intensamente monitorada, que durante um evento de precipitação ocorre a elevação do nível freático do aquífero nas regiões mais próximas aos cursos d’água e conseqüente interceptação desse nível freático com a superfície do solo, gerando um escoamento superficial com velocidades bastante superiores às do movimento subsuperficial das águas. Adicionalmente, a precipitação direta sobre essas áreas saturadas contribui para a geração do escoamento na calha dos rios. Concluindo o conceito, os autores defenderam que essas áreas saturadas, designadas por áreas parciais de contribuição, podem expandir ou contrair sazonalmente ou mesmo durante um evento de precipitação, sendo esse mecanismo designado por *área variável de afluência*, representado pela Figura 3.2.

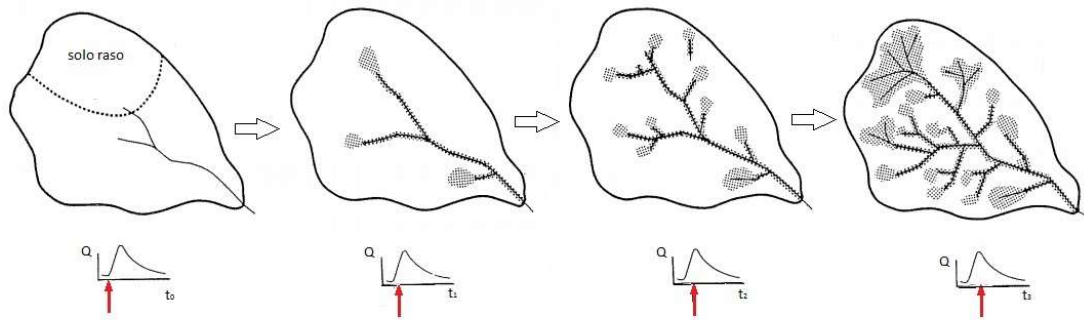


Figura 3.2 - Representação do mecanismo de escoamento pela área variável de afluência. Adaptada de Hibbert & Troendle (1988).

Para melhor entendimento acerca da evolução do pensamento dos processos de escoamento recomenda-se a leitura do trabalho de Mendiondo & Tucci (1997). A Figura 3.3 reproduz esquematicamente os processos de escoamento superficial anteriormente enumerados.

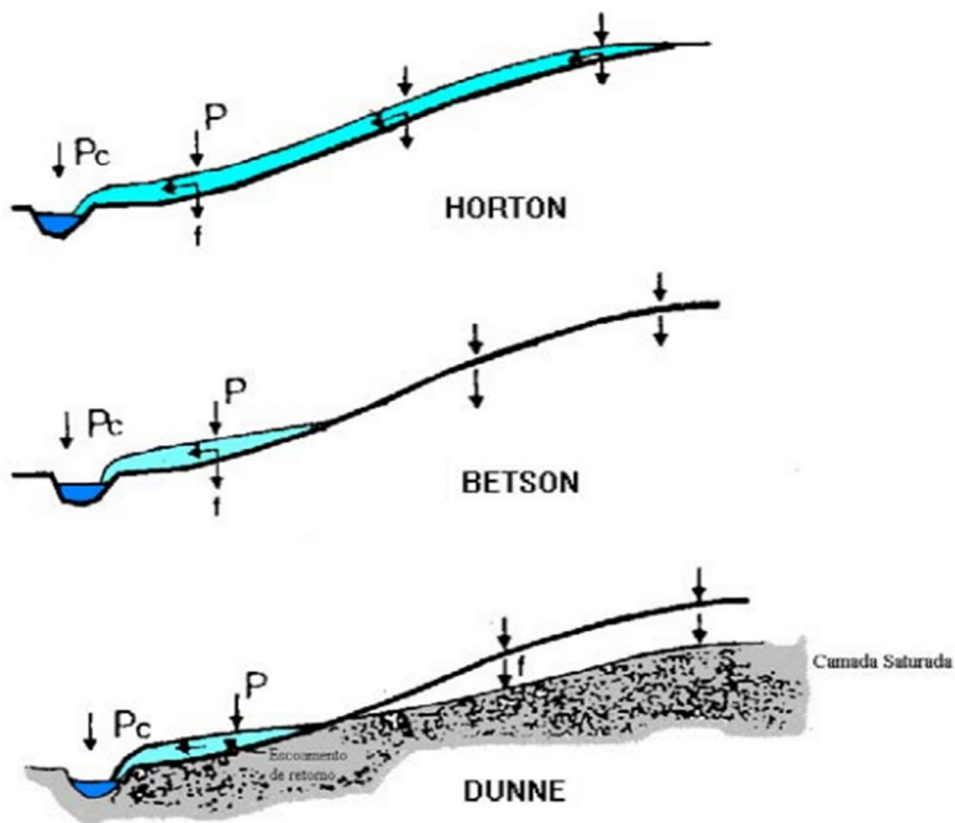


Figura 3.3 - Representação dos mecanismos de escoamento superficial. Adaptada de Mendiondo & Tucci (1997).

Para Lima & Zakia (2006), a própria definição de zona ripária encontra amparo na teoria da área variável de afluência ao considerar que, em tese, a delimitação espacial dessa zona estende-se lateralmente ao curso d'água até o alcance máximo das áreas saturadas, considerando o processo natural de expansão dessas áreas durante o período chuvoso.

A geração dos fluxos nos rios, contudo, não é resposta exclusiva dos mecanismos de escoamento superficial. Brutsaert (2010) afirmou que em muitas bacias a taxa de infiltração raramente é excedida sob condições naturais. Sob tais circunstâncias, o volume precipitado é incorporado ao subsolo, que o transmite subsuperficialmente até a calha do rio. Essa situação foi observada no trabalho de Hoover & Hursh (1943) com bacias experimentais em áreas florestadas. Os autores observaram rápidas respostas nas hidrógrafas das oito bacias estudadas estimuladas por um evento de precipitação, cuja intensidade jamais excedera a taxa de infiltração do solo. Essa situação particular observada por Hoover & Hursh (1943) é explicada pelo fluxo preferencial através dos macroporos interconectados. Brutsaert (2010) ressaltou que, em geral, os macroporos podem ser definidos como estruturas secundárias da matriz do solo resultantes de processos puramente físicos, como rachaduras dissecantes, ou mesmo processos biológicos como os canais formados pelo decaimento de raízes mortas, ou escavados por animais.

A dinâmica do processo descrito por Dunne & Black (1970), acrescida dos processos subsuperficiais observados por Hoover & Hursh (1943), torna difícil a modelagem da transferência da precipitação em escoamento na calha. Observa-se que esses últimos autores não incursionaram em uma tentativa de uma formulação matemática do processo como o fizeram anteriormente Horton (1933) e Betson (1964). A integração entre modelos hidrológicos subterrâneos e superficiais é, talvez, o caminho para modelagem fenomenológica do escoamento em bacias hidrográficas. Alternativamente, destacou Brutsaert (2010) que, no intuito de manter a formulação do problema suficientemente simples e parcimoniosa, pode ser necessária a identificação do mecanismo dominante para as condições postas, aceitando-se algumas incertezas associadas a outros mecanismos de menor monta.

3.4- **MODELAGEM DOS PROCESSOS HIDROLÓGICOS E POLUIÇÃO DIFUSA**

Embora a transformação da precipitação em contribuição fluvial seja, como visto, um fenômeno de escala da bacia, mais discretamente pode-se considerar a vertente como elemento dos processos de escoamento superficial. Da mesma forma, os processos de erosão e transporte da poluição difusa ocorrem nessa escala e mantêm ligação com os processos hidrológicos de escoamento. A tentativa de modelar parte desses mecanismos remonta ao trabalho de Mulvany (1851), proponente do método racional de determinação de vazões máximas em bacias.

Destacaram Borah & Bera (2003) que compreender e avaliar os processos naturais em uma bacia hidrográfica, seus problemas e prejuízos, são desafios contínuos para cientistas e engenheiros. Modelos que simulam tais processos complexos são úteis ferramentas de análise para entender e encontrar soluções para os efeitos danosos de certos processos hidrológicos. Esses modelos podem, por exemplo, auxiliar no estabelecimento de padrões máximos de carga poluentes comumente trazidos em resoluções e outros atos normativos, além de possibilitar a simulação de implementação de cenários alternativos para os diversos usos de solo e melhores práticas de gestão, a fim de que padrões legais sejam alcançados.

Antes de passar propriamente para a análise dos atributos de um determinado modelo é importante conhecer os tipos de modelos considerando seus múltiplos aspectos. A obtenção das informações necessárias ao problema abordado sucede à escolha adequada do modelo matemático que detenha certas características. Dito de outra forma, caso o problema abordado demande do modelo simulações da vazão em intervalos de 15 minutos, a escolha de um modelo computacional que estime vazões em intervalos diários não atenderá aos interesses de avaliação em curso.

Muito embora os sistemas naturais sejam complexos, os modelos tendem a adotar algumas ou mesmo muitas simplificações do ambiente representado. Essas simplificações podem incidir não apenas na variabilidade temporal e espacial dos parâmetros que caracterizam o sistema, mas também sobre suas variáveis de entrada.

Segundo Chow *et al.* (1988), na abordagem numérica da modelagem, o funcionamento do sistema é descrito por meio de um conjunto de equações que vinculam as variáveis de entrada às variáveis de saída do modelo. Nesse sentido, quando a aleatoriedade de uma variável de entrada é considerada no processo de modelagem, o modelo é classificado como *estocástico*. Nesse tipo de modelo a variável não assume um valor fixo em um ponto específico no espaço ou no tempo, mas é função de uma distribuição de probabilidade. De natureza antagônica é a definição de um modelo dito *determinístico*. Por não considerar a aleatoriedade, nesse tipo de modelo uma dada entrada sempre produz a mesma saída.

Com relação à variabilidade espacial dos modelos, Viessman *et al.* (2002) classificaram como *concentrado* aquele modelo que não reconhece a variação espacial nos parâmetros do sistema. Já os modelos *distribuídos* levam em consideração o comportamento desigual dos parâmetros ao longo do sistema modelado. Embora a definição de Viessman *et al.* (2002) tenha focado apenas na variabilidade dos parâmetros, outros autores, a exemplo de Chow *et al.* (1988), classificaram os modelos em distribuídos e concentrados tendo em conta, ainda, a variabilidade ou não das variáveis do sistema.

Há, também, aquela classificação lastreada pelo tamanho da série de eventos simulados. Aqueles modelos dedicados à simulação do evento de precipitação são conhecidos como modelos de *evento único*. Nessa linha, modelos com a habilidade de simular de forma sequencial diversos eventos de precipitação e os processos hidrológicos por eles desencadeados são categorizados como modelos de *passo contínuo*.

A evolução da modelagem hidrológica levou à incorporação de outros fenômenos que não aqueles relativos ao movimento da água na bacia hidrográfica. Diversos modelos foram desenvolvidos ou mesmo incorporaram às suas rotinas computacionais o transporte de poluentes carregados difusamente pelo movimento da água na bacia.

Em revisão acerca dos modelos hidrológicos e de poluição não pontual, Borah & Bera (2003) apresentaram uma ordenada sinopse das principais características de 11 desses modelos hidrológicos para bacias hidrográficas. A Tabela 3.1 resume determinadas características de alguns dos modelos avaliados pelos autores.

Tabela 3.1 - Principais características dos modelos contínuos discutidos por Borah & Bera (2003).

| Críério | AGNPS | ANSWERS | HSPF | Mike SHE | SWAT |
|-------------------------|---|--|--|--|---|
| Componentes do modelo | Hidrologia, transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas resultantes do derretimento de neve, precipitação e irrigação; Programas com interfaces interativas incluindo o TOPAGNPS, que gera as células e rede de drenagem a partir do DEM. | Balço hídrico diário com rotinas de infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração e escoamento em canal; Transporte de sedimentos, nitrogênio e transformação de fósforo; perdas de nutrientes por absorção, escoamento superficial e sedimentos. | Escoamento superficial e qualidade de água em áreas permeáveis e impermeáveis; fluxo da água e de contaminantes no canal e reservatórios; parte do sistema de modelagem da USEPA-BASINS com interface para o usuário em ambiente ArcGis. | Interceptação; evapotranspiração; escoamento superficial e no canal; zona saturada e não saturada; derretimento de neve; trocas entre o aquífero e rios; advecção e dispersão de solutos; processos geoquímicos; erosão de solo. | Hidrologia; clima; sedimentos; temperatura do solo; crescimento de plantas; nutrientes; pesticidas; práticas agrícolas; rotinas para canais e reservatórios; transferência de água. |
| Escala temporal | Longo termo; passo diário ou sub-diário. | Longo tempo; passo diário e sub-diário: diário para dias secos e 30 segundos para dias com precipitação. | Longo tempo; passo constante variável (diário). | Longo tempo ou evento de precipitação; passo variável dependendo da estabilidade numérica. | Longo tempo; passo diário. |
| Escoamentos superficial | Método do <i>Curve Number</i> para geração do escoamento diário, seguido pelos procedimentos SWRRB, EPIC e SCS TR-55 para geração da vazão de pico. | Equação da continuidade e de Manning (variável no tempo e espacialmente uniforme) resolvidas por esquema numérico explícito. | Utiliza-se de uma altura mínima empírica para geração de escoamento; fluxo calculado pela equação de Chezy-Manning. | Equação da onda difusiva 2-D resolvida por esquema de diferenças finitas implícito. | Escoamento pelo método do <i>Curve Number</i> e vazões de pico utilizando o método racional modificado ou pelo método SCS TR-55. |
| Geração de Sedimentos | Utiliza-se da RUSLE para geração da erosão laminar e de enconsta diariamente ou a partir da definição do usuário. | Desagregação do solo por impactação da chuva com base na intensidade da precipitação e fator da USLE. | Desagregação do solo por impactação da chuva e carreamento de sedimentos baseado na capacidade de transporte em função do armazenamento de água no solo. | Sem informações. | Produção de sedimentos com base na MUSLE expressa em termos de volume escoado superficialmente, vazão máxima e parâmetros da USLE. |

Todavia, alertaram van Griensven *et al.* (2006) que modelos hidrológicos que se debruçam ainda em variáveis como fluxo de sedimento e nutrientes necessitam de detalhamento nos processos de transformação de chuva em escoamento superficial. Isso se faz necessário tanto na escala espacial como temporal, a fim de que seja possível reproduzir os processos de erosão e sedimentação ou mesmo o trânsito de elementos no solo, nas águas subterrâneas, nos rios e nos reservatórios.

3.5- CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS

A quantificação do grau de ajuste do comportamento do sistema modelado às observações fornece uma avaliação da capacidade de previsão do modelo. Neste contexto, o Índice de Eficiência de Nash-Sutcliffe -NSE é amplamente utilizado no sector dos recursos hídricos para avaliar o desempenho de um modelo hidrológico (Jain & Sudheer 2008). Obtém-se o valor do NSE por meio da seguinte equação:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{médio})^2} \quad (5)$$

Embora bastante utilizado, autores como Hall (2001) e Moriasi *et al.* (2007) reconheceram as limitações do NSE como indicador único para aderência de modelos hidrológicos. Esses últimos, indo além, propuseram a aplicação de três estatísticas para melhor classificar a aderência do modelo. Além do NSE, os autores recomendam avaliar o percentual de viés - PBIAS e a estatística erro médio quadrático padronizado -RSR. Cujos valores são obtidos, respectivamente pelas equações a seguir:

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \quad (6)$$

$$RSR = \frac{RMSE}{DESVPAD_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{médio})^2}} \quad (7)$$

Este último, todavia, não aparenta trazer vantagem adicional ao processo de avaliação do modelo visto que se trata de uma função não linear do NSE. Isso porque o RSR

corresponde à razão entre a raiz do erro médio quadrático (RMSE) do modelo e o desvio padrão dos dados observados, conforme Equação 7.

3.6- O MODELO SWAT

Segundo Arnold *et al.* (1998), o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é um modelo hidrológico de base física contínuo em relação ao tempo. Foi desenvolvido para previsão do impacto da gestão do uso do solo sobre a vazão do rio e a produção de sedimentos em grandes bacias rurais não monitoradas. Na bacia hidrográfica o modelo considera os processos de escoamento superficial, fluxo lateral, fluxo de base, evapotranspiração e escoamento no canal, discretizados por sub-bacia ou por célula.

De acordo com Neitsch *et al.* (2011), em suas primeiras revisões, o modelo SWAT incorporou as múltiplas unidades de respostas hidrológicas (HRUs), com base na divisão das sub-bacias em áreas com mesma declividade, cobertura e tipo de solo. Como o próprio nome sugere, é na escala das HRUs que o modelo simula o escoamento superficial e a geração de sedimentos. Para o escoamento superficial o modelo se apropria do método SCS com modificações. Isso porque, o valor do coeficiente de escoamento superficial CN (*curve number*), no modelo SWAT, é atualizado de forma não linear, em função da umidade do solo; na medida em que o solo se torna mais próximo da saturação o valor do CN aproxima-se de 100. Para a geração de sedimentos, o modelo SWAT utiliza-se da Equação Universal de Perda de Solos modificada (MUSLE), que emprega o volume de escoamento superficial no lugar da precipitação. A Figura 3.4 apresenta a rotina simplificada da geração de escoamento e sedimentos pelo modelo SWAT.

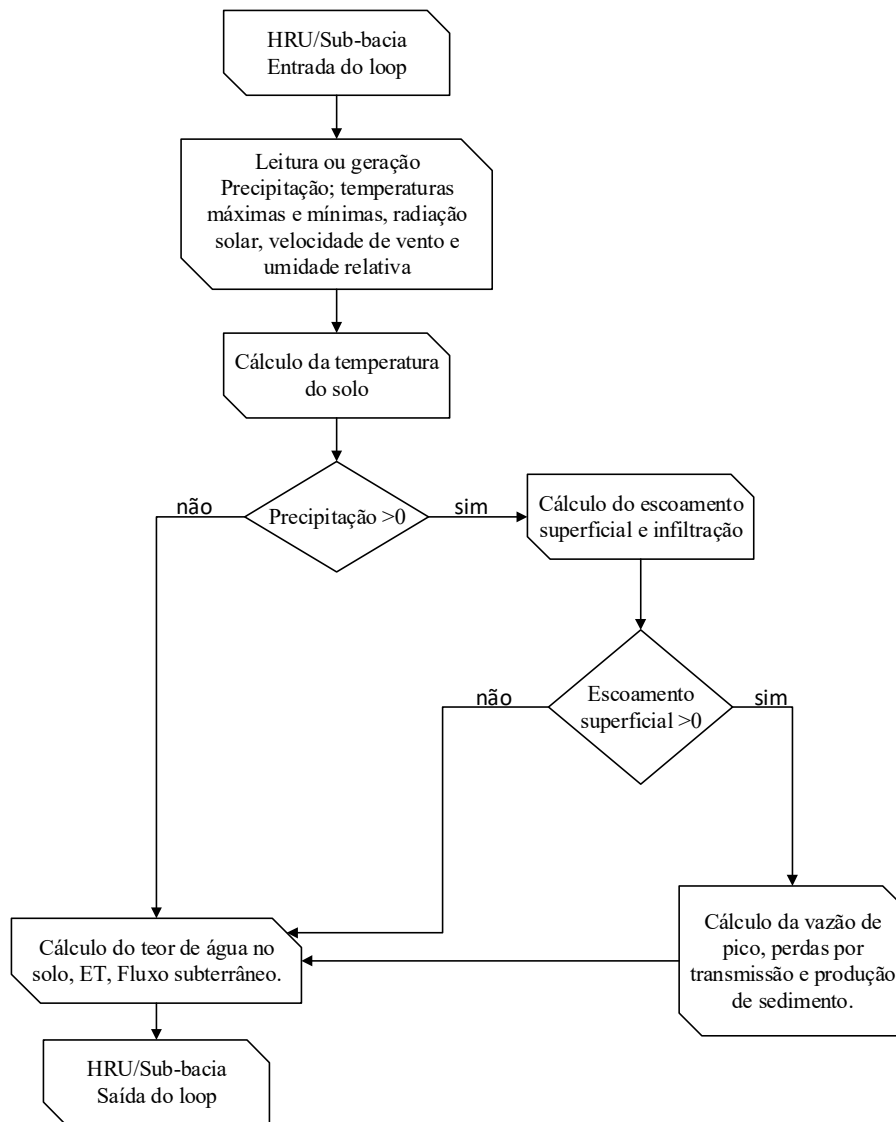


Figura 3.4 - Rotina simplificada do modelo SWAT para balanço hídrico na HRU/Sub-bacia. Adaptada de (Neitsch et al., 2011).

Com relação à atenuação da carga de sedimentos, foi introduzida na versão SWAT-2000, uma rotina simples de redução dos sedimentos pela influência de faixas vegetadas com uso da seguinte equação:

$$trap_{ef} = 0,367(width_{filterstrip})^{0,2967} \quad (8)$$

Onde: $trap_{ef}$ é a fração de sedimento removida e $width_{filterstrip}$ é a largura, em metros, da faixa vegetada (Neitsch et al., 2005).

Uma vez que o escoamento superficial, bem como a geração de sedimentos, são fenômenos modelados na escala da HRU, a faixa de vegetação que atenua os efeitos desses processos é igualmente definida na HRU.

A estrutura de arquivos de entrada para parametrização do modelo SWAT compreende arquivos de texto separados por unidade de resposta hidrológica e processo hidrológico. Nesse sentido, é possível integrar essa estrutura de entrada às lógicas de programação para calibração e verificação do modelo. A Figura 3.5 apresenta alguns desses arquivos de entrada do modelo.

```

gw file Watershed HRU:173 Subbasin:10 HRU:8 Luse:CAMO Soil: CX Slope: 8-20 9/14/2016 12:00:00 AM ArcSWAT 2012.10_0.14
1000.0000 | SHALLST : Initial depth of water in the shallow aquifer [mm]
2000.0000 | DEEPST : Initial depth of water in the deep aquifer [mm]
31.0000 | GW_DELAY : Groundwater delay [days]
0.0480 | ALPHA_BF : Baseflow alpha factor [days]
1000.0000 | GWQMN : Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur [mm]
0.0200 | GW_REVAP : Groundwater "revap" coefficient
750.0000 | REVAPMN : Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur [mm]
0.0500 | RCHRG_DP : Deep aquifer percolation fraction
1.0000 | GWHT : Initial groundwater height [m]
0.0030 | GW_SPYLD : Specific yield of the shallow aquifer [m3/m3]
0.0000 | SHALLST_N : Initial concentration of nitrate in shallow aquifer [mg N/l]
0.0000 | GWSOLP : Concentration of soluble phosphorus in groundwater contribution to streamflow from subbasin [mg P/l]
0.0000 | HLIFE_NGW : Half-life of nitrate in the shallow aquifer [days]
0.0000 | LAT_ORGN : Organic N in the base flow [mg/L]
0.0000 | LAT_ORGP : Organic P in the base flow [mg/L]
0.0100 | ALPHA_BF_D : Baseflow alpha factor for deep aquifer [days]

```

a)

```

.Sol file Watershed HRU:138 Subbasin:8 HRU:15 Luse:CAMO Soil: LVA Slope: 20-9999 9/14/2016 12:00:00 AM ArcSWAT 2012.10_0.14
Soil Name: LVA
Soil Hydrologic Group: A
Maximum rooting depth(mm) : 3300.00
Porosity fraction from which anions are excluded: 0.216
Crack volume potential of soil: 0.050
Texture 1 :
Depth [mm]: 300.00 1000.00 3500.00
Bulk Density Moist [g/cc]: 0.44 0.96 0.96
Ave. AW Incl. Rock Frag : 0.02 0.13 0.13
Ksat. (est.) [mm/hr]: 124.95 401.26 230.05
Organic Carbon [weight %]: 1.69 0.95 0.95
Clay [weight %]: 57.36 64.37 64.37
Silt [weight %]: 24.61 20.54 20.54
Sand [weight %]: 18.03 15.09 15.09
Rock Fragments [vol. %]: 0.00 0.00 0.00
Soil Albedo (Moist) : 0.08 0.10 0.10
Erosion K : 0.02 0.02 0.02
Salinity (EC, Form 5) : 0.00 0.00 0.00
Soil pH : 0.00 0.00 0.00
Soil CAC03 : 0.00 0.00 0.00

```

b)

Figura 3.5 - Exemplo de arquivos de entrada do modelo SWAT. a) Arquivo com parâmetros de processos de fluxo subterrâneo; b) arquivo com parâmetros de processos relacionados às características do solo.

Em seu trabalho de revisão, Bressiani *et al.* (2015) apontaram um crescente uso do modelo no Brasil. Em especial, os trabalhos acadêmicos desenvolvidos no país buscaram validar a aplicação do modelo para a realidade das bacias brasileiras. Muitos dos estudos revistos pelos autores ficaram limitados devido à falta de informações locais necessárias para a parametrização do modelo. O levantamento e a preparação dos dados para

aplicação do modelo SWAT no Brasil são apontados pelos autores como um desafio para aplicação do modelo de forma rotineira.

Uma tentativa de superar, ao menos parcialmente, essa ausência de dados estruturados foi empreendida por Lima *et al.* (2013), que promoveram o levantamento e a estruturação de uma base de dados para solos representativos do Cerrado compatível com a estrutura de entrada necessária para o modelo SWAT.

A literatura relata existência de inúmeras aplicações do modelo SWAT para avaliação de recursos hídricos. As pesquisas publicadas relacionam-se à análise de vazões do rio, à dinâmica das águas superficiais e subterrâneas, à dinâmica das geleiras e neve, ao represamento, às práticas de irrigação, ao manejo da água, aos processos de erosão e perdas de sedimentos, à poluição difusa, às melhores práticas de gestão na agricultura, aos impactos na mudança do uso da terra, aos impactos nas mudanças climáticas e aos impactos combinados desses dois últimos (Krysanova & Srinivasan 2015).

Em um ambiente computacional, como o modelo Swat, é possível a proposição de diferentes cenários para avaliação da resposta da bacia hidrográfica frente ao cenário simulado. Exemplo desse tipo de análise pode ser encontrado nos trabalhos de Blainski *et al.* (2017), que avaliou o impacto do processo de urbanização nas vazões de pico e fluxo de base, ou no artigo de Monteiro *et al.* (2016) que empregou o modelo SWAT para avaliar os efeitos de recomposição da floresta ripária em termos de redução sedimentos na bacia. Ambos autores recorreram ao uso de cenários, reais ou propostos para acessar as respostas hidrológica e sedimentológica da bacia estudada.

É nesse contexto, de análise de cenários, que o presente trabalho se lastreia. Empregando-se o modelo SWAT na busca por respostas hidrossedimentológicas frente ao incremento de proteção justafluvial. Espera-se demonstrar a necessidade da proteção das zonas ripárias sobre o prisma da manutenção da qualidade de água. A escolha dos processos sedimentológicos está vinculado aos problemas trazidos por sólidos em suspensão na água que, tanto oneram, quando inviabilizam captações para fins de abastecimento público.

4- METODOLOGIA

A presente pesquisa baseou-se no monitoramento hidrossedimentológico em bacia experimental com intuito de identificar os processos naturais de formação do escoamento para avaliar o efeito tampão das formações florestais ripárias representativas do bioma Cerrado.

Para subsidiar a calibração e a verificação de um modelo hidrológico de descargas líquidas e sólidas, medições diretas hidrossedimentométricas da bacia foram empreendidas. De posse de um modelo numérico hidrológico para a bacia experimental, utilizou-se a simulação de cenários de proteção da floresta ripária, a fim de acessar o benefício marginal do serviço ambiental proporcionado por essa fitofisionomia. Essa metodologia lastreia tecnicamente a discussão para estabelecimento de faixas de proteção necessárias à manutenção da qualidade das águas, sob o prisma hidrossedimentológico.

O alcance dos objetivos propostos demanda esforços na coleta de dados para parametrização física do problema. Realizou-se, nesse sentido, uma metodologia escalonada, com três etapas, a saber: identificação dos principais processos de formação do escoamento, monitoramento hidrossedimentológico do curso principal e modelagem hidrossedimentológica da bacia preservada.

De posse de um modelo calibrado da bacia, promoveu-se um levantamento do benefício marginal, em termos sedimentológicos, associado ao incremento de área de preservação permanente. Essa última etapa envolveu uma simulação de cenários de mudança de uso e ocupação da bacia experimental associados ao gradual incremento na faixa de APP. Os resultados, cotejados com os padrões legais de proteção atualmente empregados no Brasil, servirão para discutir a proteção hídrica do bioma. A Figura 4.1 apresenta um fluxograma das etapas envolvidas.

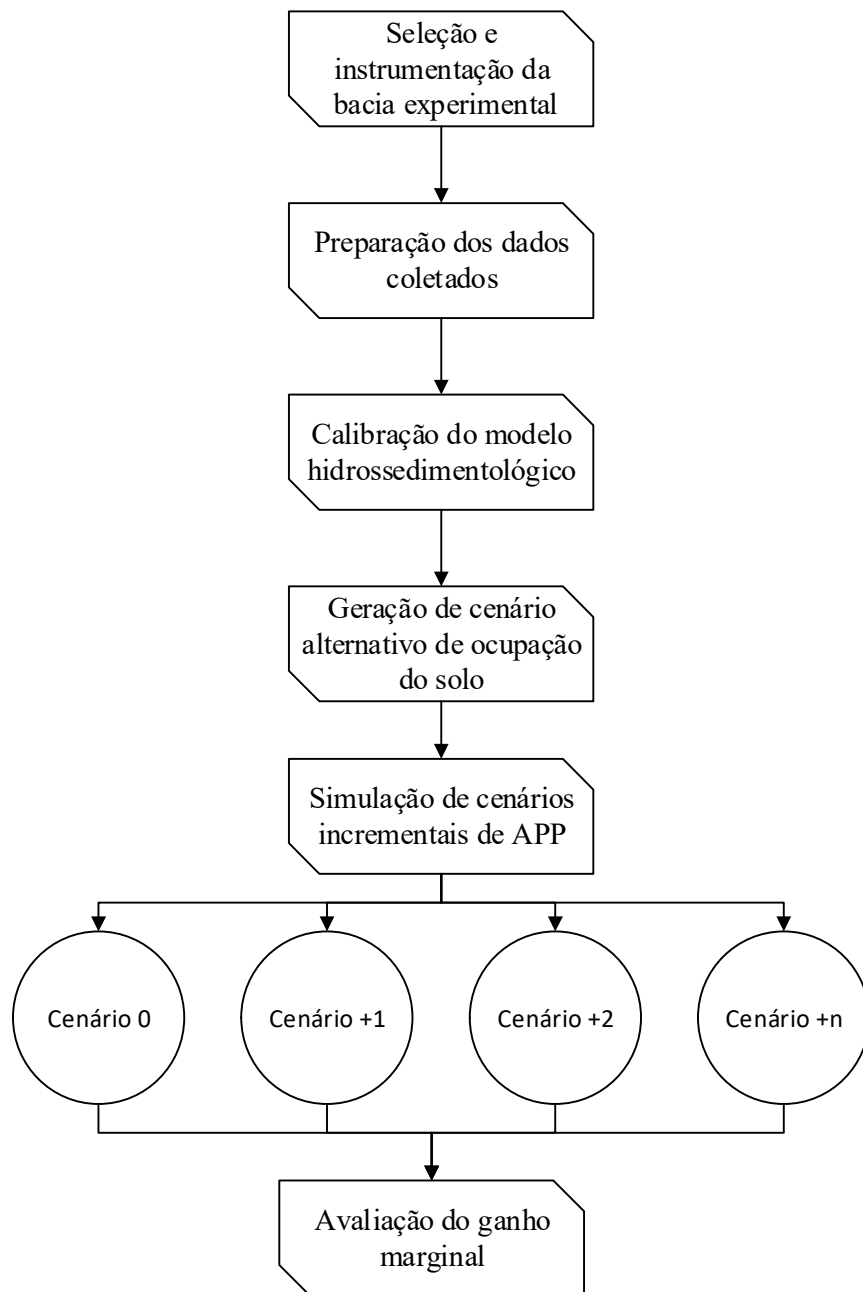


Figura 4.1 - Representação das etapas metodológicas

Naturalmente, ao longo do levantamento de dados, para melhor representar os processos hidrológicos e sedimentológicos, experimentos paralelos e não representados na Figura 4.1 foram empreendidos, a exemplo da investigação do papel da interceptação e da identificação de padrões espaciais da geração dos sedimentos. Esses experimentos acessórios encontram-se descritos no presente capítulo.

4.1- **ÁREA DE ESTUDO**

Como local de estudo buscou-se selecionar uma Unidade de Conservação - UC cujos limites coincidissem, ou mesmo excedessem, uma sub-bacia hidrográfica a ser monitorada. A seleção de espaços protegidos proporciona maior homogeneidade na área estudada reduzindo variáveis aleatórias associadas ao uso e à ocupação do solo facilitando, em princípio, o entendimento dos processos hidrológicos naturais do bioma em estudo. Ademais, a seleção de espaços preservados permitiu avaliar a real amplitude ortogonal das formações florestais ripárias com a mínima perturbação por atividades antrópicas.

A Área de Proteção Ambiental Gama Cabeça de Veado¹, especificamente na sua porção especialmente protegida pela Área de Relevante Interesse Ecológico Capetinga-Taquara², abarca os atributos necessários para o estudo em tela. Adicionalmente, as instalações da Fazenda Água Limpa – FAL/UnB, mantenedora do espaço, proporcionam assistência às atividades de pesquisa, seja com recursos humanos para execução de serviços, seja com maquinário e equipamento para os trabalhos. A bacia em questão conta, ainda, com esforço conjunto de um grupo de pesquisa formado no intuito de promover estudos hidrossedimentológicos. A parceria com o Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da Universidade de Brasília converge esforços e amplia a capacidade de geração e análise de dados.

A proposta do projeto de pesquisa foi submetida ao crivo da unidade acadêmica gestora do espaço, nos termos do processo nº 01/2014/FAL, aprovado na 1º Reunião Conselho Deliberativo da Fazenda Água Limpa em fevereiro de 2014. Com a autorização, passou-se às incursões em campo para a seleção de áreas para o desenvolvimento das atividades. A Figura 4.2 exibe a área de estudo com destaque para a sub-bacia do córrego Capetinga, afluente do ribeirão do Gama, que por sua vez insere-se na bacia hidrográfica do rio Paraná. O projeto em questão foi, igualmente, submetido ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, sendo contemplado com financiamento nos termos da Chamada Universal – MCTI/CNPq nº 14/2014.

¹ Unidade de Conservação de uso sustentável criada pelo Decreto Distrital nº 9.417, de 21 de abril de 1986.

² Unidade de Conservação de proteção integral criada pelo Decreto Federal nº 91.303, de 3 de junho de 1985.

Sobre as características da bacia experimental, verifica-se uma área de drenagem até a estação fluviométrica de aproximadamente 11 km², com cotas variando de 1.055 a 1205m e perímetro de 16,8km. O comprimento do canal maior é de 4,1 km. A bacia exibe um padrão tipicamente dendrítico de drenagem e coeficiente de compacidade de 1,42, com o curso principal alcançando a terceira ordem Strahler, conferindo à bacia uma rápida resposta à precipitação. A densidade de drenagem de Horton, por seu turno foi calculada em 0,993 km/km².

Uma caracterização do regime hidrológico da bacia estudada pode ser encontrada em Souza *et al.* (2012). Os autores avaliaram o comportamento de uma série de 13 anos de dados hidrológicos da bacia do córrego Capetinga. Como resultado, observou-se que a precipitação total anual, a vazão média de longa duração e a vazão mínima apresentaram séries estacionárias. Isso reflete, segundo os autores, o grau de preservação da bacia, com manutenção das características das fitofisionomias encontradas.

Na bacia estudada observa-se predominância de declividades entre 0 e 8%. Os solos predominantes na bacia são o Cambissolo (42,15%) e o Latossolo Vermelho-Amarelo (31,38%). As classes de solo Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho e o Gleissolo completam a caracterização da bacia.

Em termo de fitofisionomia, observa-se na bacia experimental do Córrego Capetinga as classes de campo compondo aproximadamente 53% da área. O cerrado sentido restrito é observado em cerca de 31% da área, seguido para mata de galeria com 9,6%. Apenas em uma pequena porção da bacia não se observa a vegetação original.

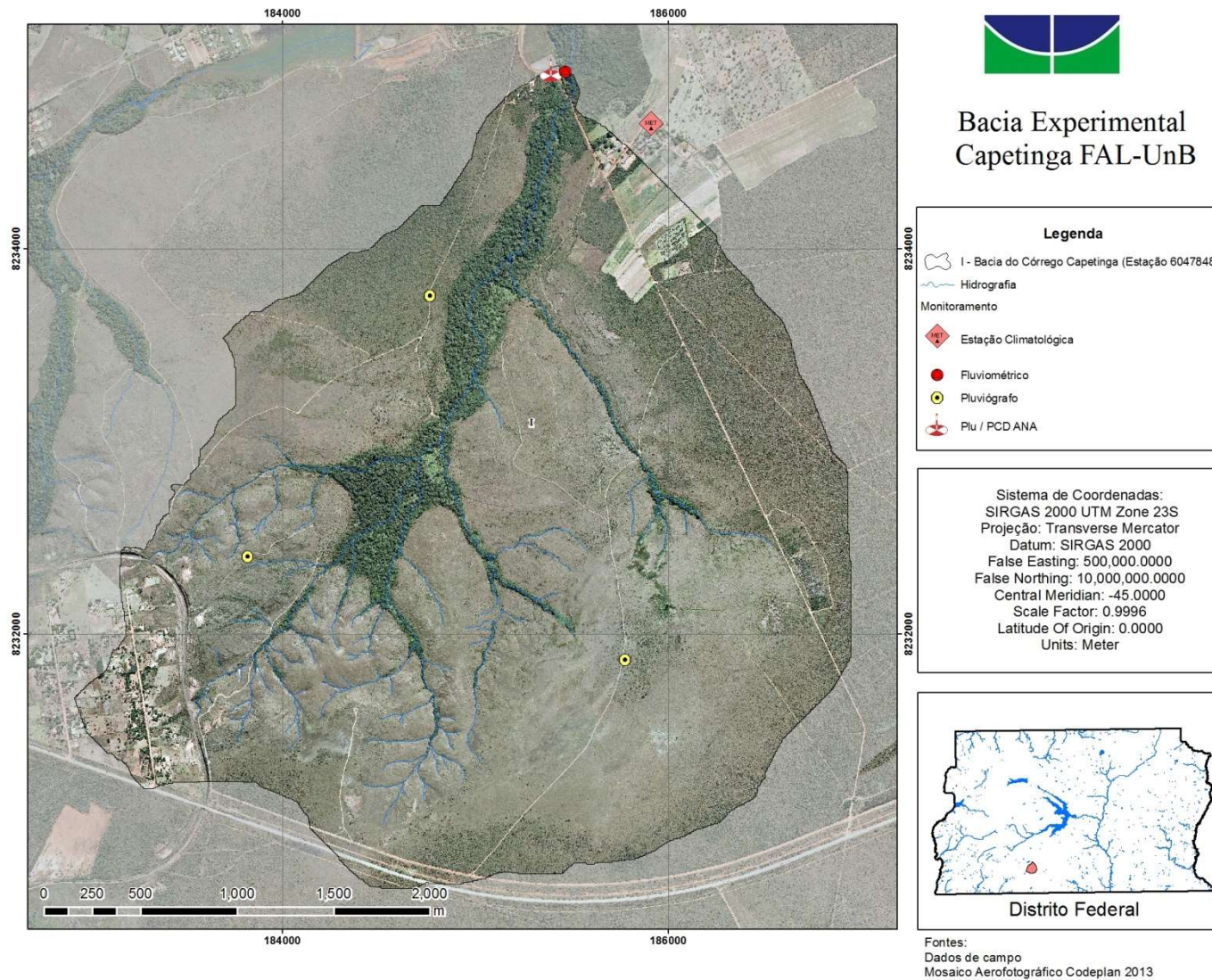


Figura 4.2 - Carta-imagem da bacia experimental

4.2- MONITORAMENTO E COLETA DE DADOS

4.2.1- Monitoramento da bacia

O processo de parametrização e mesmo calibração de modelos hidrológicos demanda um conhecimento do estado do sistema estudado, bem como do comportamento das variáveis de estado estimulado por uma perturbação. A caracterização física da bacia e a mensuração de certos fenômenos (ex. precipitação, descarga líquida e descarga sólida) são elementos inseparáveis do processo de modelagem.

Para preencher, ao menos parcialmente, essa demanda de informações, foi instalada uma Plataforma de Coleta de Dados – PCD com medição da precipitação e do nível d'água do córrego Capetinga. A referida PCD foi fornecida pela Agência Nacional de Águas, instalada e mantida em parceria entre o Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos e o Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da UnB. A precipitação é medida com pluviógrafo de balança em intervalos de 15 minutos. O nível d'água do corpo hídrico, por sua vez, é determinado por radar e registrado com igual intervalo de tempo. A plataforma de coleta de dados foi incluída no Sistema de Monitoramento Hidrológico da Agência Nacional de Águas sob o código 60478482 FAL-UNB. A Figura 4.3 apresenta o processo de montagem da seção fluviométrica.

Dados climatológicos foram extraídos a partir do Boletim Agroclima, mensalmente publicado pela Estação de Agroclimatologia da Fal/UnB. A série utilizada para caracterização climática compreende os anos de 2000 a 2016. A Figura 4.3 apresenta os equipamentos instalados, bem como a visão geral da seção de monitoramento.

A seção conta, ainda, com lance de réguas limétricas e ponte para auxiliar na medição das descargas. Adicionalmente, foi fixado um pluviógrafo de balança Onset com registrador de dados na vertente onde foram realizados levantamentos geofísicos, a serem detalhados neste capítulo. Outros dois pluviógrafos Onset foram instalados na cabeceira da bacia experimental. As localizações dos equipamentos de hidrometria encontram-se na Figura 4.2. Tais equipamentos propiciam o acesso direto ao comportamento do corpo

hídrico frente a um evento de precipitação para um dado estado em que o sistema se encontrava, sendo de valia, inclusive, para programação de atividades de campo.



Figura 4.3 - Seção hidrométrica do córrego Capetinga. a) visão da seção; b) nivelamento de régua; c) instalação da PCD; d) PCD finalizada; e e) régua linimétrica.

Foi definida a seção de medição de descargas devidamente materializadas com seus pontos iniciais e finais (PI e PF). O levantamento topo-batimétrico da seção foi realizado com nível óptico Kolida e trena de fibra, seguindo as recomendações de Santos *et al.* (2001).

Para aquisição de pontos da curva-chave para conversão da série de cotas linimétricas empregou-se o método convencional com medição das velocidades em dois pontos; a 0,2 e 0,8 vezes a profundidade da vertical; com espaçamento de 0,3m entre verticais. Na medição das velocidades em cotas de até 1m empregou-se a técnica a vau com uso de medidor acústico ADC OTT. Nas descargas associadas às cotas mais elevadas utilizou-se o medidor acústico ADCP Qliner II da OTT. A Figura 4.4 apresenta os equipamentos envolvidos na medição das vazões.

Os dados de vazão foram ajustados ao modelo exponencial descrito em Jaccon & Cudo (1989) na seguinte forma:

$$Q = k(h - h_0)^n \quad (9)$$

Onde:

Q – vazão (m³/s);

k – parâmetro do modelo relacionado à hidráulica da seção (adimensional);

h – cota linimétrica (m);

h₀ – cota de vazão nula (m);

n – parâmetro do modelo relacionado à hidráulica da seção (adimensional).

Para ajuste dos parâmetros do modelo foi desenvolvido um algoritmo na linguagem R (R Core Team, 2015) baseado no método dos mínimos quadrados não linear (Baty *et al.*, 2015). Como ambiente de desenvolvimento foi utilizado o RStudio.

A extrapolação da curva-chave seguiu o método de Stevens, descrito em Jaccon & Cudo (1989). O método consiste em relacionar as vazões medidas, bem como as cotas da seção, ao fator geométrico da seção derivado da fórmula de Strickler. Tal fator geométrico consiste no produto da área molhada da seção (S) pelo respectivo raio hidráulico (R_h) elevado à fração 2/3. Embora consista de um método gráfico, a extrapolação da curva-chave pode ser feita analiticamente ajustando-se as funções $SR_h^{2/3} = f(Q)$ e $SR_h^{2/3} = f(h)$, igualando-as posteriormente. Assim como no ajuste da curva-chave, esse método de extrapolação foi implementado em algoritmo próprio desenvolvido na linguagem R.

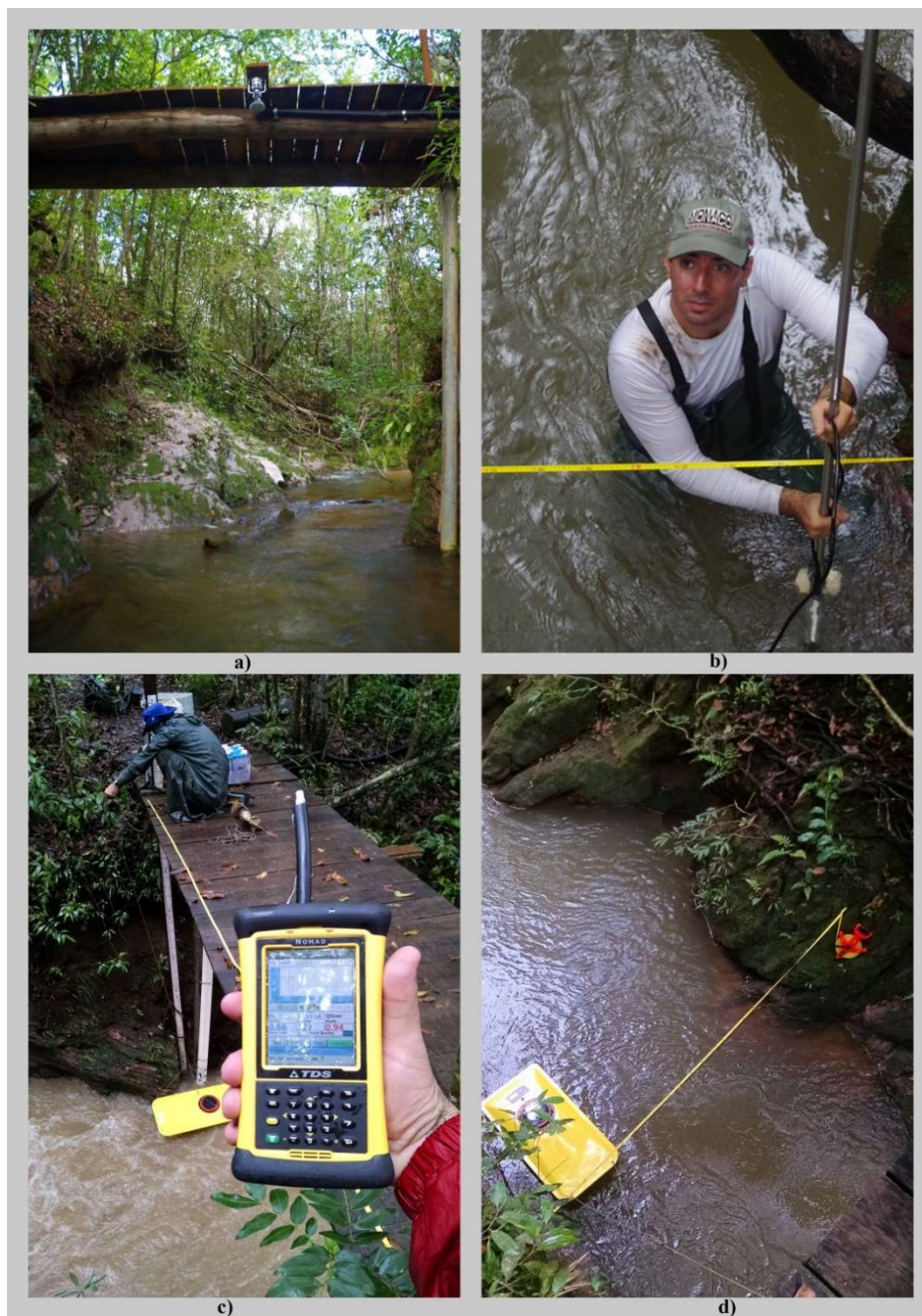


Figura 4.4 - Equipamentos empregados nas medições de vazão. a) radar de medição de cota; b) medição a vau com ADC; c) e d) medição acústica com Qliner.

Complementando o estudo, foi realizado o monitoramento das descargas sólidas para composição da curva-chave de sedimentos. A utilização de monitoramento automático e contínuo associado ao monitoramento direto e discreto tem se mostrado eficiente para construção de séries históricas de descargas sólidas. Amostragens pontuais de sólidos em suspensão podem ser representativas quando um padrão de mistura completa é observado.

O monitoramento contínuo indireto foi realizado com sonda multiparamétrica com sensor de turbidez e condutividade elétrica. Uma sonda Hydrolab DS5X cedida pela Agência Nacional de Águas foi empregada inicialmente na seção fluviométrica. Todavia, a autonomia da energia desse modelo limita seu emprego em monitoramento de longo tempo sem uma fonte contínua de alimentação. Uma sonda multiparamétrica Aquaread AP800 mostrou-se mais eficiente em termos de consumo de bateria, entretanto a ausência de sistema autolimpante do sensor exige frequentes verificações. Ambas as sondas contam com armazenador de dados e foram programadas para coleta de dados em intervalos de 15 minutos.

Defenderam Poletto & Merten (2006) que a amostragem de sedimentos em suspensão de granulometria predominantemente fina ($<62\mu\text{m}$) e distribuída uniformemente na seção do rio seria suficientemente representativa se realizada próxima da superfície, no centroide do escoamento. Para garantir que tais condições sejam verdadeiras os autores recomendaram, entre outras, a avaliação prévia da variabilidade espacial da concentração de sedimentos na seção, assim como a variação da granulometria dos sedimentos na vertical.

Lopes (2010) comprovou um padrão de mistura completa em bacia hidrográfica no Distrito Federal com dimensões compatíveis com a bacia do presente estudo. Em seu trabalho o autor observou variações máximas da ordem de 8% na concentração de sólidos em suspensão entre as verticais amostradas. Em bacia de maior porte, ainda no Distrito Federal, Aguiar (2015) observou que uma amostragem por integração na vertical central do escoamento tinha a mesma representatividade da carga sólida quando comparado com método convencional de amostragem.

Nesse sentido, utilizou-se o método de amostragem por integração na vertical central bem como o método de amostragem em ponto fixo. Isso porque, se a literatura sustenta a representatividade do primeiro, necessária foi a validação desse segundo método. Para tal verificação, amostras coletadas simultaneamente com amostrador manual USD 49 e com amostrador automático ISCO foram confrontadas. A Figura 4.5 apresenta os equipamentos envolvidos no monitoramento das descargas sólidas.



Figura 4.5 - Monitoramento de qualidade. a) amostragem na vertical central; b) amostras coletadas; c) corpo hídrico durante evento; d) amostrador automático; e) local de instalação da sonda multiparamétrica.

A hipótese a ser testada é que a diferença da concentração de sólidos de duas amostras pareadas obtidas pelos diferentes métodos seja igual a zero. O resultado dessas diferenças foi submetido ao teste t para verificar a hipótese e definir o intervalo de confiança da diferença das amostras.

O amostrador automático ISCO com sensor de nível apresenta vantagens operacionais, principalmente em bacias pequenas, onde a passagem de uma onda de cheia se dá em poucas horas. Tal amostrador pode ser programado com diferentes regras de operação buscando-se a

obtenção de amostras tanto no ramo ascendente como na recessão da passagem da onda de cheia. O sistema original de detecção de nível apresentou falha em diversos momentos e foi adaptado com a substituição da ponta do detector por uma boia de mercúrio.

As amostras foram analisadas no Laboratório de Análise de Águas – LAA para determinação da concentração dos sólidos em suspensão seguindo o método descrito em APHA (2005). A Figura 4.6 exibe os equipamentos envolvidos na determinação dos sólidos em suspensão.



Figura 4.6 - Equipamentos utilizados na determinação dos sólidos em suspensão. a) turbidímetro de bancada; b) amostras secas para determinação da massa; c) amostras brutas; e d) sistema de filtração.

Após tomadas medidas de turbidez e volume, as amostras foram submetidas ao processo de filtração a vácuo. Os filtros foram secos à temperatura de 100°C até massa constante. Foram utilizados filtros analíticos de microfibras de vidro, previamente lavados com água destilada e secos até massa constante.

4.2.2- Variabilidade espacial na produção de sedimentos

Técnicas de correlação com espacialização de variáveis são frequentemente empregadas em estudos climáticos. Exemplo aplicado desse método pode ser observado no estudo de Vuille *et al.* (2000), no qual, para explicar os mecanismos climáticos relacionados ao fenômeno *El Niño*, séries temporais de mapas de temperatura da superfície terrestre foram empregados.

Para testar a hipótese de que regiões específicas da bacia são responsáveis pela geração da maior carga de sólidos em suspensão procedeu-se a um teste de correlação espacial entre os dados de turbidez e padrão de precipitação. Foram selecionados 32 eventos de precipitação espacializados por meio de polígono de Thiessen. Os totais diários precipitados foram espacialmente correlacionados com a turbidez máxima diária. A Figura 4.7 traz uma representação esquemática do procedimento.

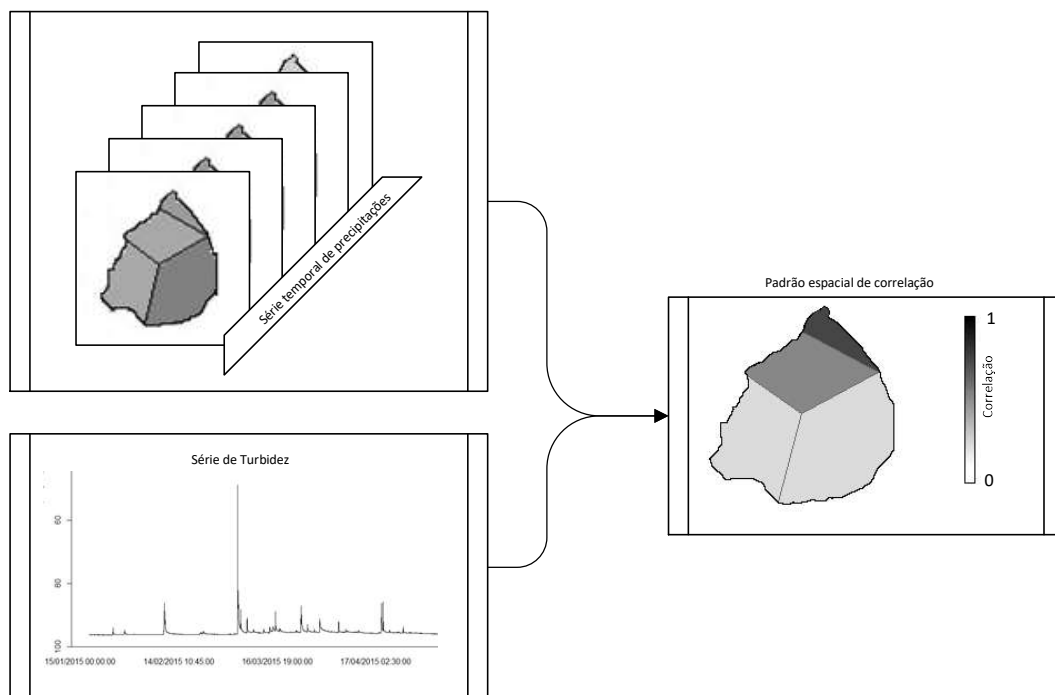


Figura 4.7 - Análise de padrão espacial na geração de SS

Adicionalmente ao procedimento proposto, outra sonda multiparamétrica modelo Aquaread AP800 foi instalada a montante da intersecção com a estrada, a fim de se obter o padrão de resposta da bacia sem essa contribuição pontual.

4.2.3- Monitoramento de vertente

4.3.2.1- Interceptação

Foram instaladas parcelas experimentais para medição da interceptação nas duas principais fitofisionomias estudadas: cerrado e mata de galeria. Uma vez que a precipitação interna apresenta variabilidade espacial bastante superior à precipitação total medida em campo aberto, um número muito maior de medições se faz necessário para estimar corretamente seu volume (Helvey & Patric, 1966).

No presente trabalho o fenômeno de *stemflow* não foi considerado. Isso porque estudos como o de Giglio & Kobiyama (2013) indicam que esse processo representa apenas 1,8% da precipitação na Amazônia, 0,8% na Mata Atlântica e 6% no Cerrado/Caatinga. Ainda que este último não possa ser considerado de pequena monta, esse valor apresenta um viés trazido pela fitofisionomia de cerradão. Em vegetação ripária de Cerrado esses autores apontaram valores de *stemflow* de 0,9%, reforçando sua pouca influência na fitofisionomia em estudo.

Os estudos de interceptação foram conduzidos em duas etapas. Em um primeiro momento foi realizado um levantamento em base diária com uso de coletores cilíndricos e medição do volume de precipitação interna. Foi adotado o arranjo aleatório em uma malha regular de 10 x 10m, com discretização de 1m seguindo o padrão adotado por Vieira (1999).

Uma amostragem aleatória simples apresenta precisão levemente inferior quando comparada com outros métodos de amostragem (Zimmermann *et al.*, 2010) e por isso foi utilizada no presente trabalho, que contou com 11 coletores cilíndricos tipo C1 Fabrimar ($\emptyset = 8$ cm) em cada parcela experimental. Esse primeiro levantamento foi

realizado entre os meses de março e abril de 2015. A Figura 4.8 apresenta um croqui com o arranjo experimental empregado na primeira etapa.

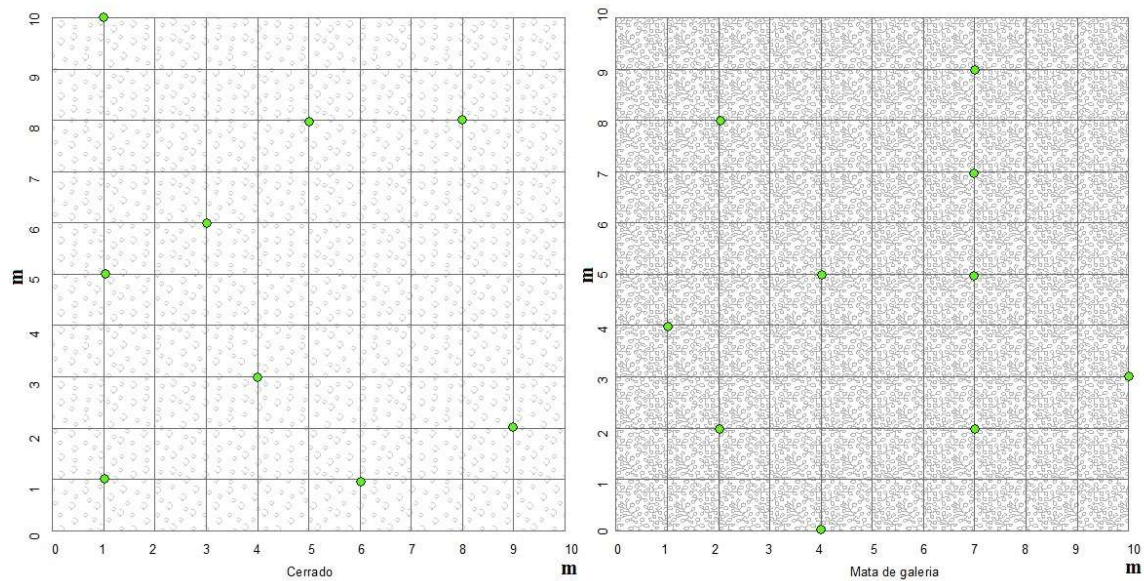


Figura 4.8 - Arranjo experimental para medição da precipitação interna.

O número de amostras necessárias para estimativa da média populacional é expresso pelo modelo de distribuição *t* de *student*, com base na variância amostral e de um erro entre a média amostral e a média populacional previamente definido. Alternativamente, Zimmermann *et al.* (2010), bem como Kimmins (1973), utilizaram-se de uma abordagem baseada do coeficiente de variação (CV) e no erro percentual (*e*) entre a média amostral e populacional, conforme a equação a seguir:

$$n = \frac{t^2 CV^2}{d^2} \quad (10)$$

onde *n* é o número de pluviômetros distribuídos na área, *t* é o valor crítico desejado da distribuição *t* de *student*, CV é o coeficiente de variação da amostra, e *d* é o erro percentual entre a média amostral e a média real da precipitação interna.

A segunda etapa deteve um enfoque voltado para compreensão dos processos envolvidos na interceptação. Nessa etapa os esforços amostrais foram concentrados na porção da mata de galeria com a substituição dos coletores Fibramar por 11 (onze) pluviógrafos de balsa Onset RG-2 com registrador de dados.

Assim como no levantamento inicial, os pluviógrafos foram realocados de tempos em tempos. Diferentemente dos coletores de precipitação acumulada, a discretização dos dados dos pluviógrafos permitiu analisar o fenômeno de interceptação ao longo do evento de precipitação. Considerou-se, para fins de separação dos eventos de precipitação, o tempo mínimo inter-evento de 6 horas, seguindo as recomendações de Lloyd *et al.* (1988), Link *et al.* (2004) e Marin *et al.* (2000).

A malha de 10m x 10m foi novamente utilizada. Foi empregado o método descrito por Link *et al.* (2004) para determinação do comportamento hidrológico do dossel em termos de interceptação. Promoveu-se uma subdivisão conceitual da área em quatro quadrantes, a fim de melhor caracterizar a estrutura do dossel. A Figura 4.9 apresenta a divisão da área experimental.

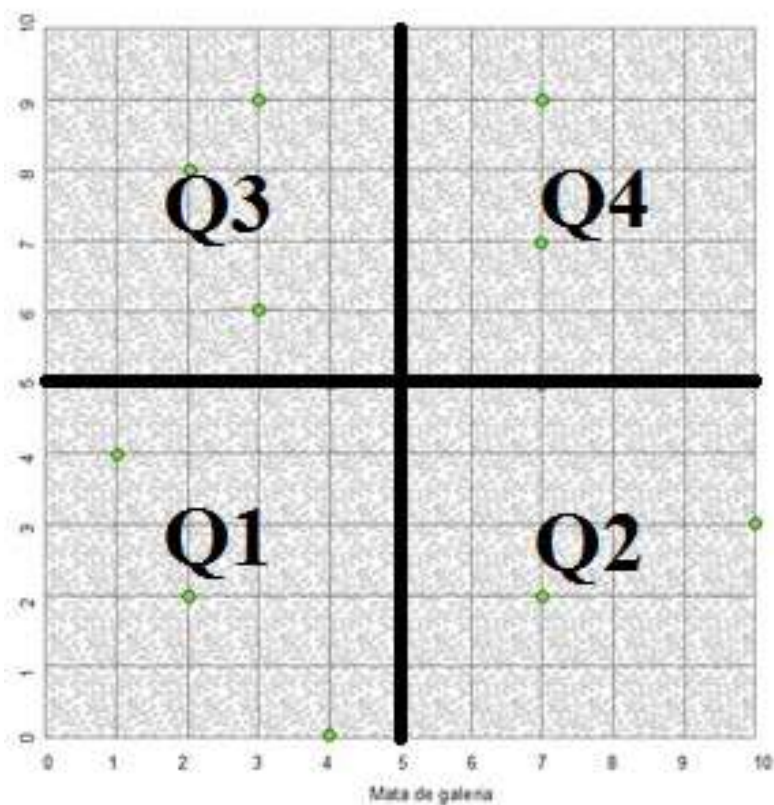


Figura 4.9 - Croqui do arranjo experimental.

O processo de caracterização da copa das árvores consistiu-se na aquisição de imagens hemisféricas com bússola do norte magnético. Utilizou-se um sistema composto por uma câmera digital Nikon Copix dotada de uma lente grande angular 180° Delta T. As

imagens foram pós-processadas com o *software GAP Light Analyser – GAP* (Frazer *et al.*, 1999), com registro da posição Sul-Norte da imagem e aplicação do limiar de 130 como separador de intensidade do pixel. Foram analisados os dados correspondentes aos quatro anéis centrais considerando-se o zênite. A Figura 4.10 apresenta os equipamentos utilizados na etapa dois do experimento de interceptação.

O processamento das imagens no GAP se dá com ajuste da geometria da lente à imagem capturada em um processo assistido pelo usuário, onde as marcações do eixo Norte/Sul na imagem são indicadas ao *software*. Posteriormente um limiar de contraste é aplicado pelo usuário para diferenciar pixels claros (luz através da copa das árvores) de pixels escuros (vegetação do dossel). Após aplicação de contraste a imagem é convertida para 1 bit (0, 1) para processamento. A partir do tipo de lente é adotado um sistema de projeção à imagem hemisférica com correção das distorções e cômputo das áreas claras e escuras, com posterior determinação das métricas desejadas (ex: índice de área foliar e índice de vazios do dossel).

Utilizou-se, para essa segunda etapa, o modelo proposto por Gash *et al.* (1995) aplicado para cada evento de precipitação. Uma vez que a análise das imagens permite apenas a parametrização parcial do modelo, promoveu-se a calibração dos parâmetros restantes (P_G' , e $\frac{E}{R}$) utilizando a técnica de *Particle Swarm Optimization* (PSO). Para tanto foi desenvolvido um código na linguagem de programação R para calibração automática desses parâmetros. O código computacional busca os valores ótimos de P_G' e $\frac{E}{R}$ maximizando o coeficiente de Nash (NSE) utilizado como função objetivo. Ao longo do processo de calibração foi permitida uma pequena correção ($\pm 10\%$) no valor de ρ incorporando, assim, a variabilidade natural de estrutura do dossel.



Figura 4.10 - Visão geral dos equipamentos utilizados. a) pluviógrafos de báscula instalados na área; b) detalhe da lente 180°; c) arranjo do conjunto câmera, lente e tripé; d) imagem registrada em processamento.

4.3.2.2- Espacialização da umidade do solo

Para melhor compreender os processos de escoamento na escala da vertente selecionou-se uma encosta posicionada na porção média do curso principal da bacia experimental

para monitoramento. Por tratar-se de espaço especialmente protegido optou-se pelo uso de medições indiretas das propriedades hidráulicas subsuperficiais. Foi empregado o levantamento geofísico continuado da vertente, permitindo a espacialização da umidade do solo ao longo do gradiente topográfico e fornecimento de informações sobre a estratigrafia da vertente. Optou-se pelo emprego do método da eletrorresistividade na caracterização da vertente, também conhecida como tomografia elétrica 2-D.

Segundo Reynolds (1997) a técnica consiste na mensuração da resistividade aparente do solo, rocha ou minerais. Essa medição se dá pela perda de potencial (V) quando se faz passar uma corrente elétrica (A) no meio investigado. Essa investigação demanda a instalação de quatro eletrodos alinhados na superfície estudada. Os eletrodos extremos são submetidos à passagem da corrente elétrica, enquanto a perda de potencial é medida nos eletrodos internos. A Figura 4.11 exibe um arranjo típico de quadripolo utilizado em sondagens de eletrorresistividade.

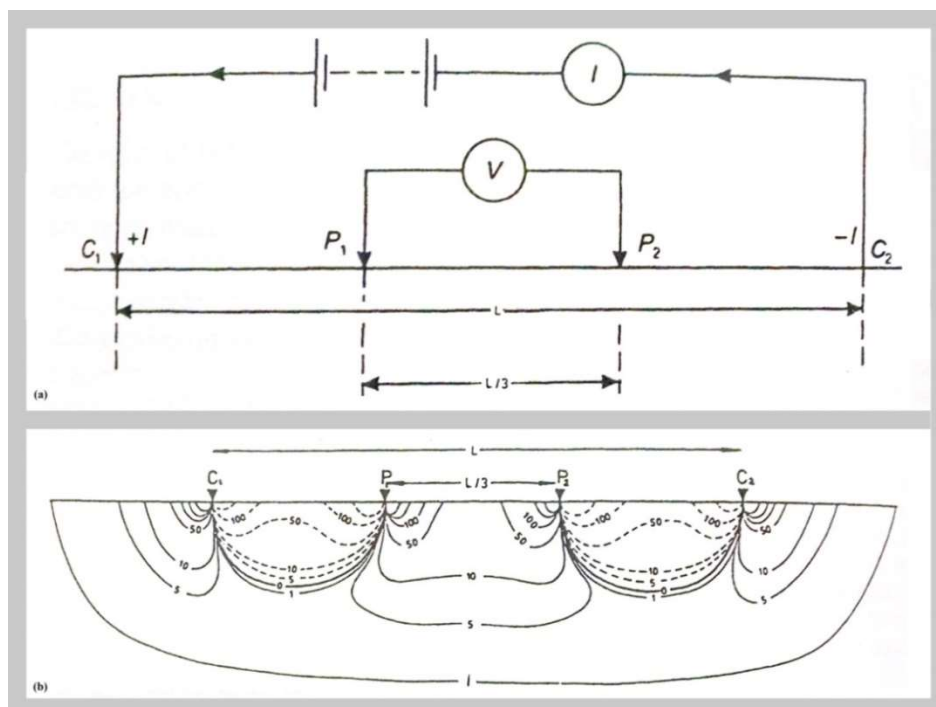


Figura 4.11 - Método da eletrorresistividade. a) Arranjo dos eletrodos (quadripolo); b) linhas equipotenciais geradas. Fonte: Adaptada de Segundo Reynolds (1997)

Uma vez que a resistividade é função não apenas do meio físico, mas também do seu estado, é possível associar alterações na medição da resistividade em um dado local, ao longo do tempo, a alterações no estado do meio estudado. Esse estado corresponde

basicamente a alterações no teor de água ao longo da vertente. Nesse sentido, a série temporal de imagens de eletrorresistividade foi analisada com objetivo de acompanhar a evolução de umidade no perfil. Adotou-se o procedimento descrito por Chambers *et al.* (2015), segundo o qual a série de imagens é transformada pela razão do logaritmo das resistividades conforme a seguinte equação:

$$\Delta = \log \left(\frac{\Omega_{t_0+n}}{\Omega_{t_0}} \right) \quad (11)$$

onde Δ é a variação na resistividade, Ω_{t_0+n} é a resistividade no tempo $t_0 + n$, e Ω_{t_0} é a resistividade no tempo inicial. Considerou-se a resistividade Ω_{t_0} como aquela obtida na primeira medição no período de seca.

Nesse sentido, realizou-se a fixação de 40 eletrodos com espaçamento de 5m entre eles ao longo da vertente. Esse arranjo igualmente espaçado, conhecido como Winer, permite as investigações vertical e horizontal da resistividade da vertente. Foi empregado o resistivímetro Geopulse da Campus Geophysical Instruments. A Figura 4.12 apresenta um croqui do esquema de monitoramento realizado.

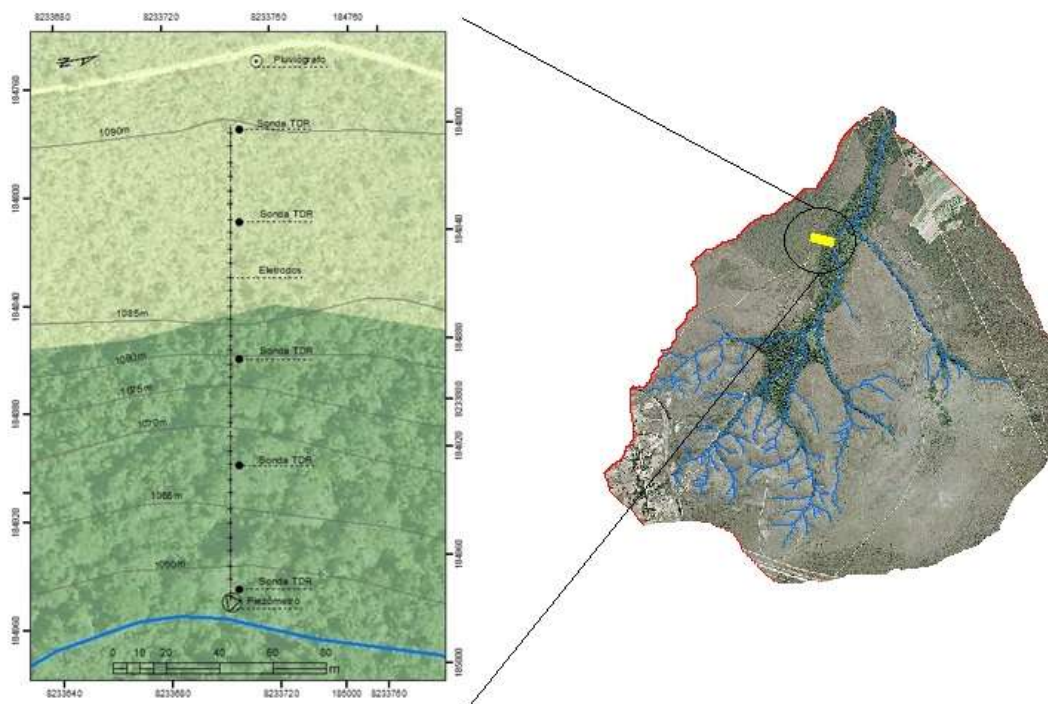


Figura 4.12 - Croqui do esquema de monitoramento da vertente.

4.3.2.3- Mensuração direta do efeito tampão da floresta ripária

Como parte dos esforços conjuntos do grupo de pesquisa de estudos hidrossedimentológicos, instalaram-se 12 parcelas experimentais do escoamento superficial do tipo Wischmeier & Smith (1978). As parcelas de 2m² são isoladas lateralmente e em sua porção de montante com chapas de aço galvanizado. A porção de jusante da parcela, por sua vez, conta com calha coletora do escoamento e dois reservatórios de armazenamento em série com capacidade total de aproximadamente trinta litros.

As fisionomias de mata ripária e de cerrado sentido restrito, além de cobertura com gramínea e com solo exposto, foram selecionadas para instalação das parcelas. Na tentativa de obtenção de um estimador da dispersão do fenômeno foram instaladas três parcelas em cada fisionomia/cobertura enumerada. A Figura 4.13 apresenta algumas dessas parcelas. Os resultados desse experimento encontram-se em Oliveira (2015).

Muito embora os dados gerados por parcelas experimentais do tipo Wischmeier sustentem a parametrização de grande parte dos modelos de descargas sólidas, a forma como é concebida não permite avaliar a capacidade de determinada fisionomia reter aportes de massa advindos de montante da vertente. Dito de outra forma, os experimentos que lastrearam a equação universal de perdas de solo fornecem apenas a geração de escoamento e produção de sedimentos daquela fisionomia avaliada. Trata-se de um sistema semiaberto pois, se no plano vertical as parcelas permitem a entrada da precipitação efetiva e os processos de infiltração, no plano horizontal tais parcelas divergem as contribuições dos fluxos de montante, não permitindo um balanço de massa completo.



Figura 4.13 - Parcelas tipo Wischmeier. a) cerrado sentido restrito; b) solo exposto; c) gramínea; e d) mata de galeria.

Na busca por superar essa singularidade das parcelas fechadas promoveu-se a instalação de coletores de escoamento superficial seguindo o gradiente topográfico da vertente monitorada. Intencionava-se a instalação de cinco coletores em cada ponto amostral da vertente. Ao menos um ponto de amostragem foi instalado na região de cerrado sentido restrito, fora da zona ripária, onde era esperada maior geração de sedimentos. Os demais pontos seriam alocados no interior da zona florestada, em distâncias diversas em relação à borda, com propósito de avaliar sua capacidade de atenuação dos aportes de montante. Ao término de cada evento seriam retiradas alíquotas das amostras para submissão à análise de sólidos totais, segundo APHA (2005).

A título de teste foram projetados, produzidos e instalados dois modelos de coletores que se encontram representados na Figura 4.14. Embora os dois modelos propostos tenham coletado escoamentos ao longo da fase de teste, não se tencionou uma avaliação de desempenho, mas apenas das dificuldades de instalação em campo. O modelo triangular representado nas Figura 4.14 “a” e “b” supera aquele do tipo calha que exige maiores esforços de abertura de trincheira.

No total foram instalados 10 coletores triangulares para avaliações iniciais da atenuação do aporte de sedimentos. O primeiro conjunto de 5 coletores foi instalado na porção de cerrado na borda da zona ripária. Outros 5 coletores foram instalados no interior da mata de galeria a 10 metros de sua borda. As Figuras 4.14 “a” e “b” apresentam os conjuntos instalados na mata de galeria e cerrado, respectivamente. Já as Figuras “c” e “d” representam detalhamentos da instalação.



Figura 4.14 - Coletores de escoamento superficial. a) instalação na mata de galeria; b) instalação no cerrado sentido restrito; c) detalhe de projeto e instalação; e d) fase de instalação.

4.1- MODELOAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

Para atender aos objetivos da avaliação do benefício marginal associado à proteção ripária serão empregadas simulações matemáticas para diferentes cenários de proteção marginal. O processo consistiu nas etapas de seleção de um código computacional adequado, levantamento de informações para elaboração do modelo conceitual, calibração e verificação do sistema estudado. Foram aplicados métodos de calibração automática dos parâmetros desconhecidos utilizando-se na função objetivo não apenas dados de vazões, como também de descargas sólidas observadas.

A partir de um modelo verificado foram simulados os cenários com faixas incrementais de proteção da floresta ripária. Os resultados das simulações servirão para a etapa de valoração do serviço ambiental.

As características do problema abordado demandam um modelo distribuído ou semi-distribuído preferencialmente com passo computacional diário, para estimar a concentração de sedimentos de forma mais dinâmica e discreta possível. A interface *ArcSWAT* (Arnold *et al.*, 2012), além de possuir tais características, incorpora a habilidade de estimar a geração, assim como o transporte de poluição difusa, em especial o aporte de sedimentos na calha do rio. Essa aplicação do modelo SWAT incorpora o código original do modelo ao Sistema de Informações Geográficas ArcGis da ESRI.

Para a caracterização física do modelo foram utilizados os dados do Sistema Cartográfico do Distrito Federal – SICAD 2013. As curvas de nível com equidistância de 5m foram utilizadas para composição do modelo digital de terreno hidrologicamente consistente e posterior derivação das declividades. As classes de declividade foram análogas àquelas adotadas por Ferrigo (2014).

As imagens orbitais de alta resolução foram empregadas para o mapeamento das coberturas vegetais da bacia experimental. Na caracterização pedológica da bacia foi utilizado o levantamento feito por Lacerda *et al.* (2007), que promoveram o mapeamento dos solos da FAL-UnB com identificação de pedoambientes homogêneos, sua associação a uma classe de solo e posterior validação em campo.

A base de dados utilizada no presente trabalho foi desenvolvida por Lima *et al.* (2013) elaborada especificamente para o modelo SWAT em condições de solo do Cerrado, posteriormente modificada por Ferrigo (2014).

A interface de visualização dos resultados do modelo ArcSWAT apenas indica o balanço hídrico global da série modelada. Da mesma forma, a entrada de dados para parametrização do modelo necessita de operações com distintos programas com alteração do banco de dados dos parâmetros do modelo via *Microsoft Access* e posterior geração dos arquivos de entrada por meio do *ArcGis*. Isso torna os processos de checagem do desempenho hidrológico e de calibração um pouco exaustivos. Nesse sentido, para aperfeiçoar o processo de visualização de resultados e calibração foram desenvolvidos dois códigos computacionais em R. O primeiro destina-se a visualização gráfica das vazões diárias com sobreposição de dados observados e apresentação da métrica de aderência. O segundo código, por seu turno, promove alteração e gravação dos arquivos de entrada, execução do código do modelo SWAT, verificação da métrica de aderência para posterior otimização por meio do método PSO. Os supracitados códigos encontram-se nos apêndices C e D.

Para o correto funcionamento dos códigos em comento é necessária a configuração inicial do ambiente de trabalho. Essa preparação consiste em destinar uma cópia do arquivo executável do modelo SWAT (*SWAT.exe*) para a pasta TxtInOut criada quando da elaboração do modelo conceitual no ambiente do *ArcSWAT*. Adicionalmente, um arquivo “*Obs.txt*”, contendo a série observada, deve ser igualmente destinado ao conjunto de arquivos que compõe a pasta TxtInOut. Um fluxograma de funcionamento da rotina destinada à calibração encontra-se na Figura 4.15.

Uma vez iniciada a execução do código, a conexão com os arquivos de entrada é realizada por meio de busca direcionada baseada na extensão do arquivo. Isso porque os arquivos de entrada do modelo SWAT são separados por processo hidrológico e por unidade de resposta hidrológica. Nesse sentido, os parâmetros relacionados ao comportamento do aquífero encontram-se em arquivos que recebem a numeração da HRU precedida pela extensão “*gw*” (ex. *00001.gw*). No que se refere aos parâmetros do tipo de solo o arquivo recebe a extensão “*sol*” (ex. *00001.sol*). Os parâmetros conexos

com práticas de conservação, agricultura e cobertura do solo encontram-se designados pela extensão “*mgt*” (ex. *00001.mgt*). Por fim, aspectos físicos das unidades de resposta hidrográficas, como comprimento de rampa, declividade e coeficiente de escoamento superficial, encontram-se representadas pela extensão “*hru*” (ex. *0001.hru*).

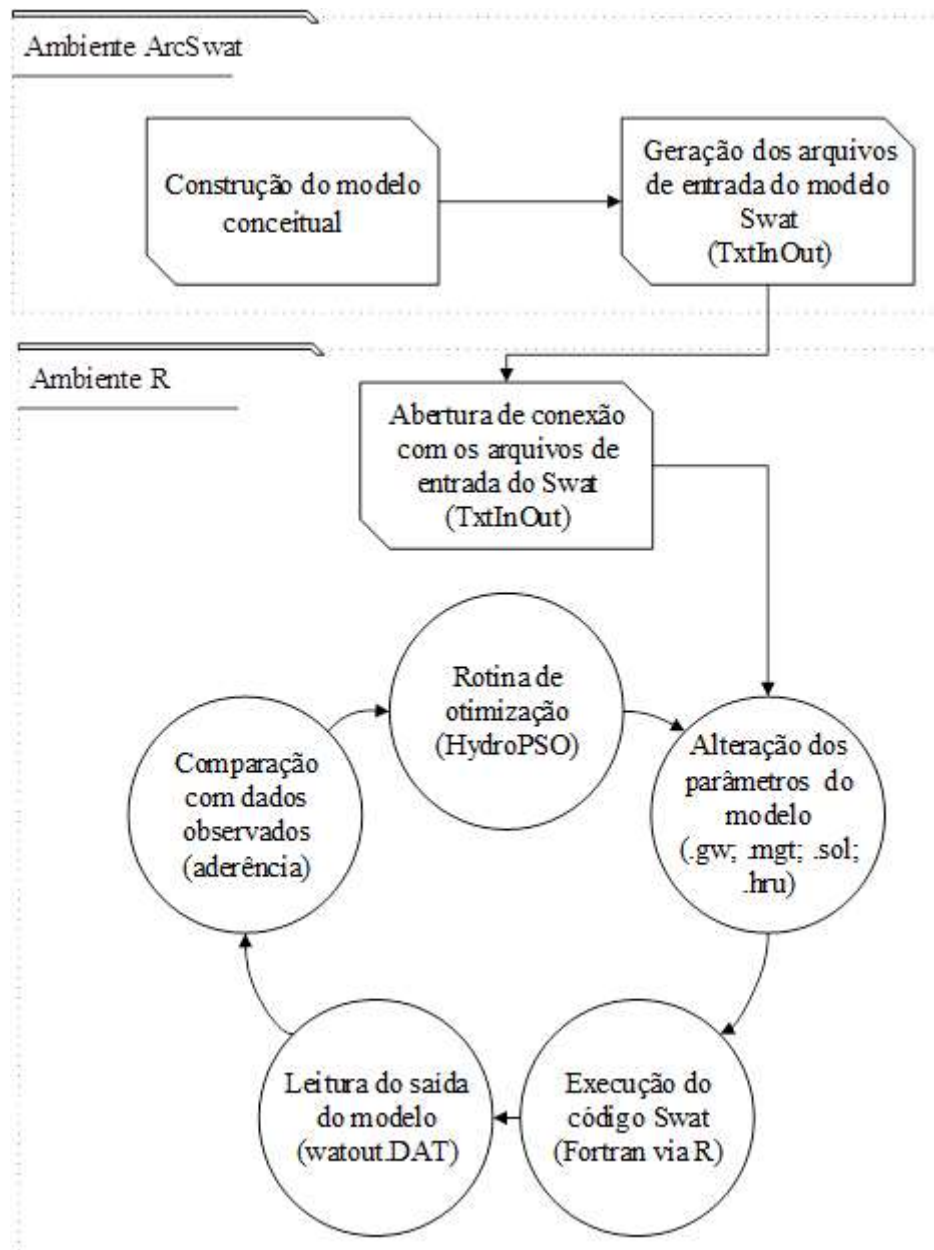


Figura 4.15 - Representação do algoritmo de controle e calibração desenvolvido.

Com base nessas premissas, o código elaborado no presente trabalho realiza uma busca no diretório TxtInOut e, com base na extensão do arquivo, promove a alteração dos parâmetros específicos para, posteriormente, executar o modelo SWAT. Os resultados

dos diversos componentes do balanço hidrossedimentológicos em passo diário são gravados em arquivo designado por “watout.DAT”, utilizado no presente estudo para verificação com os dados observados e, por fim, resultar na métrica de aderência. Para automatizar a calibração do modelo o algoritmo PSO implementado no pacote *HydroPSO* (Zambrano-Bigiarini & Rojas, 2014) foi utilizado.

No processo de calibração do modelo hidrológico a maximização do NSE foi empregada como função objetivo e o PBIAS como métrica adicional de avaliação.

4.2- SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE PROTEÇÃO

Para avaliação da atenuação do aporte de sedimentos promoveu-se uma modificação digital do uso e ocupação da bacia, que passou a ter características de ocupação rural intermediária. O padrão de ocupação que se buscou retratar é compatível com percentuais de uso agrícola observados na bacia do Lago Descoberto, conforme reportado por Ferrigo (2014). Um comparativo entre o uso atual e o cenário alternativo encontra-se na Figura 4.16.

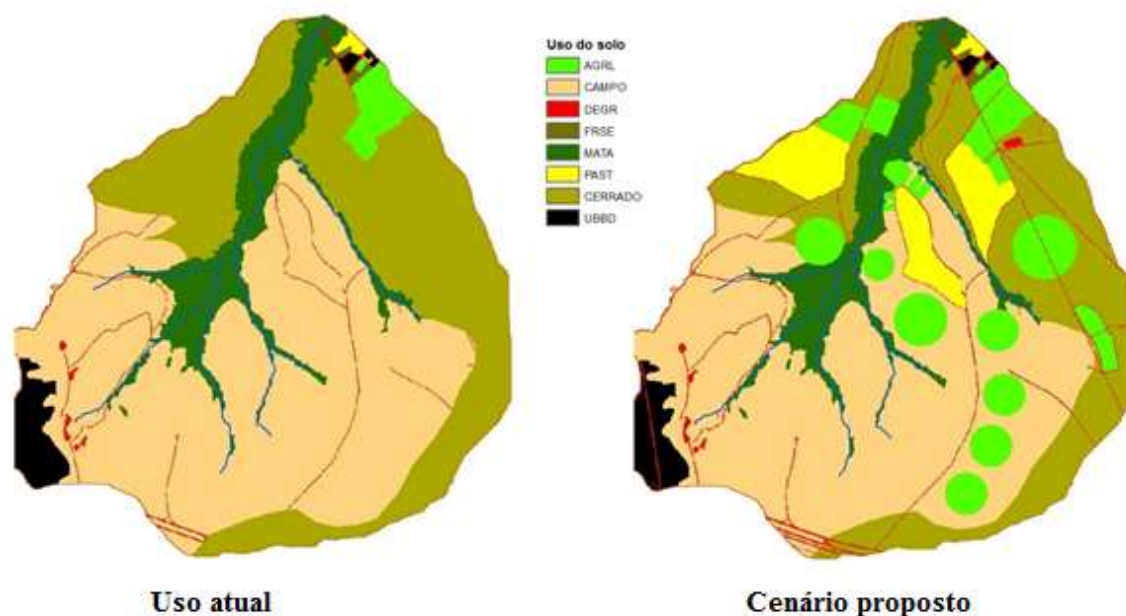


Figura 4.16 - Uso do solo atual e cenário de uso proposto.

Nesse novo cenário o uso agrícola passou a representar 12% da ocupação da bacia, enquanto a destinação de área para pasto foi ampliada para 6,5%. Foram gerados novos

arquivos de entrada para o modelo SWAT considerando essa hipotética condição de uso do solo para a bacia.

Um código computacional desenvolvido em ambiente R foi, então, empregado para simulação dos cenários incrementais de proteção justafluvial. De maneira semelhante ao código de calibração do modelo SWAT anteriormente apresentado, a simulação de cenários incrementais de APP se dá a partir da alteração controlada do parâmetro de entrada que rege o efeito tampão promovido pela fitofisionomia. A Figura 4.17 consiste na representação esquemática de funcionamento do algoritmo.

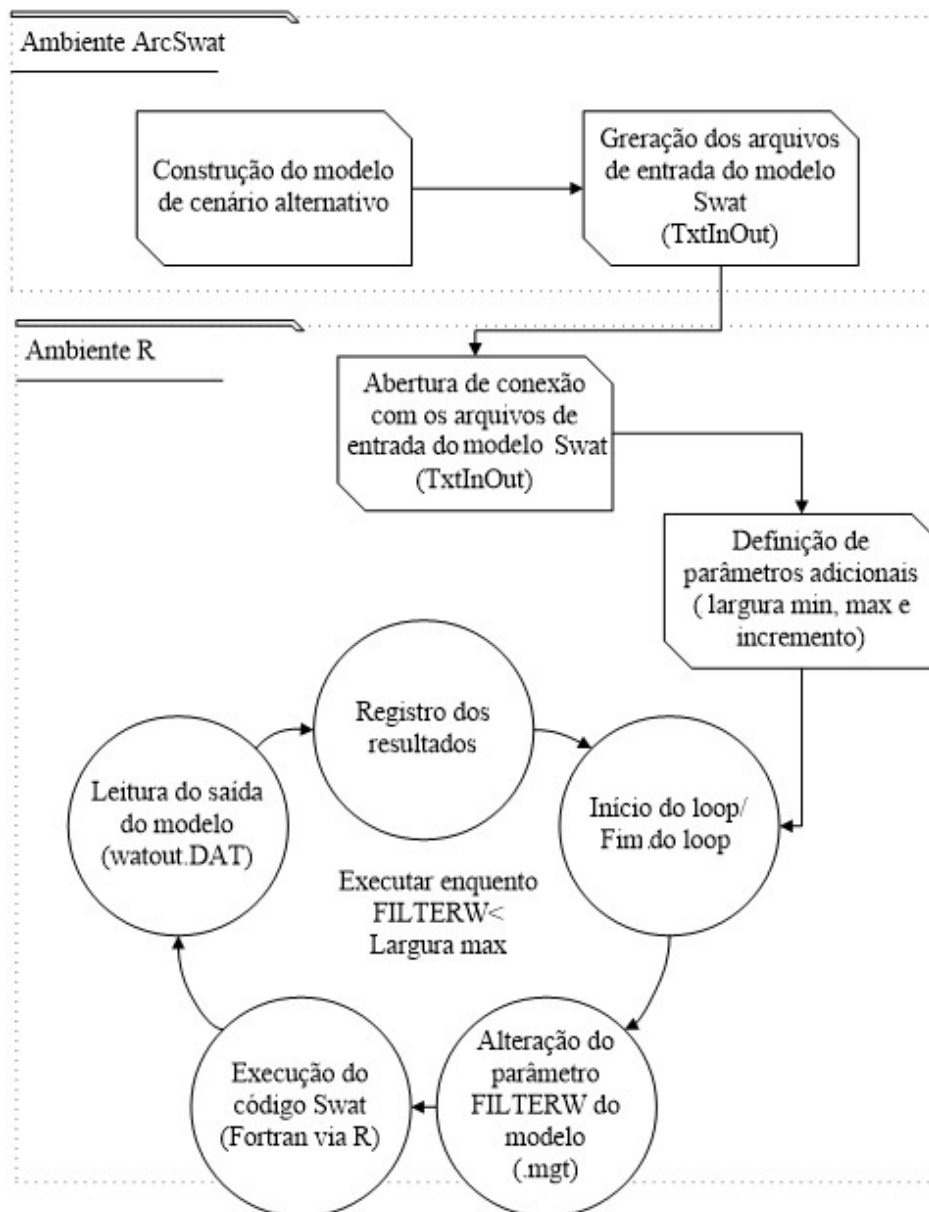


Figura 4.17 - Representação do algoritmo de avaliação do controle incremental da faixa protegida

O parâmetro FILTERWD controla a largura da faixa de vegetação que promove a atenuação no aporte de sedimentos. Esse parâmetro é espacializado por HRU e pode ser modificado nos arquivos com extensão “.mgt”. A saída dos resultados foi programada para registrar as saídas de cada iteração incremental de proteção, tanto de forma gráfica como na forma de tabelas. O referido código encontra-se no apêndice D.

5- RESULTADOS

Os resultados e discussão dos dados climatológicos e hidrométricos para caracterização da bacia hidrológica são apresentados a seguir. Esses resultados subsidiaram a parametrização do modelo SWAT, sua calibração e validação. O comportamento de vertente em termos de evolução temporal de sua resistividade, assim como os processos de interceptação, são explorados e apresentados no presente capítulo. Por fim, são apresentados os resultados da calibração hidrossedimentológica da bacia estudada, assim como as simulações de cenário de proteção, avaliando-se e discutindo-se os efeitos em termos de comportamento hidrossedimentológico do cenário proposto em função do incremento marginal da faixa de proteção justafluvial.

5.1- CARACTERIZAÇÃO CLIMATOLÓGICA

Os dados climáticos da Estação Climatológica da Fazenda Água Limpa, que servem de entrada ao modelo SWAT, encontram-se na Figura 5.1. A série conta com dados diários coletados entre os anos de 1999 e 2016. No que diz respeito à temperatura, observa-se uma menor influência da sazonalidade nas máximas diárias em comparação com as mínimas registradas.

A velocidade do vento apresenta comportamento semelhante ao longo do ano, com mediana levemente superior a 2m/s. A umidade relativa, por seu turno, apresenta-se mínima no mês de setembro.

No que diz respeito às variáveis climáticas que influenciam os processos hidrológicos, em especial as perdas por evapotranspiração, observa-se um comportamento constante no período das chuvas entre os meses de novembro e março. Ou seja, à exceção da própria precipitação, esse comportamento de pouca oscilação da temperatura, da velocidade do vento, da umidade relativa e da radiação solar, no período chuvoso, reduz a complexidade do problema modelado.

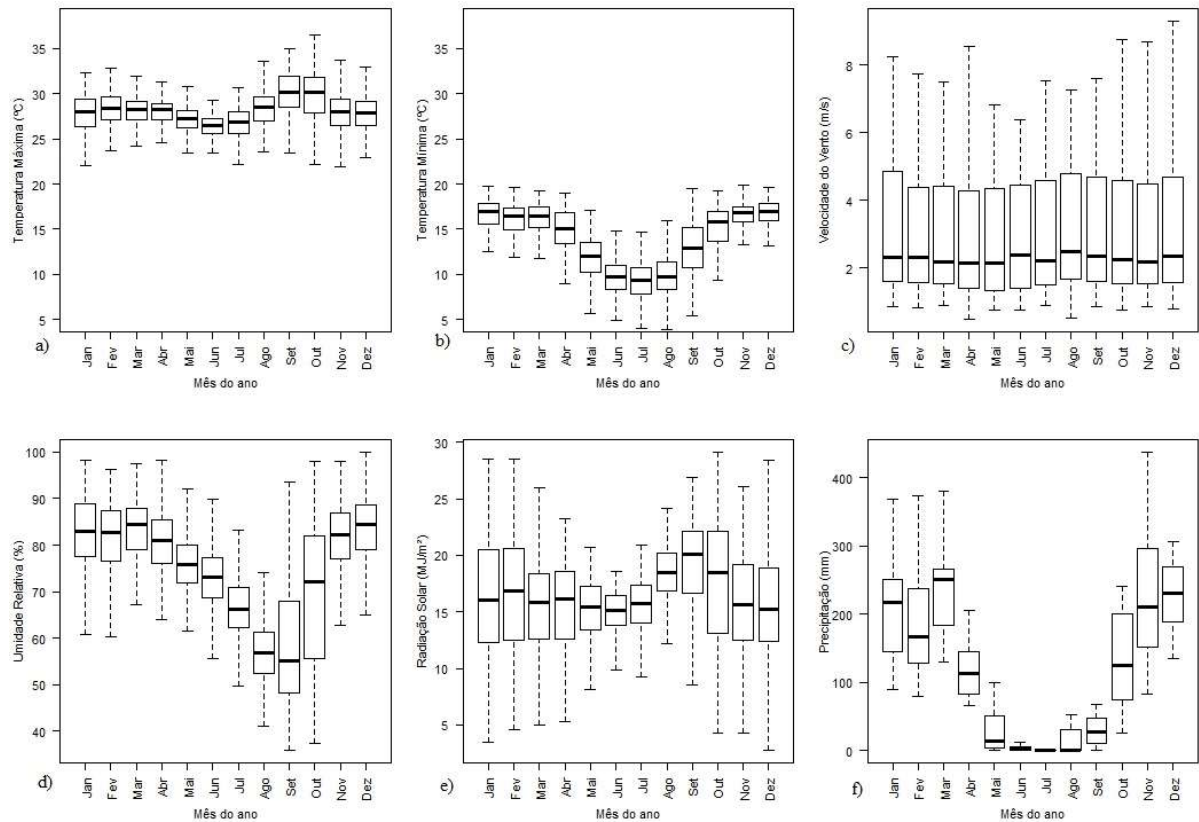


Figura 5.1 - Variáveis climáticas da área de estudo.

5.2- LEVANDAMENTO DA CURA-CHAVE DA SEÇÃO FLUVIOMÉTRICA

A partir dos dados do levantamento topográfico obtiveram-se as características geométricas da seção fluviométrica. A Figura 5.2 apresenta o perfil desse nivelamento, bem como algumas características hidráulicas.

Os dados de medição de vazão foram submetidos ao algoritmo de ajuste de curva-chave desenvolvido no presente estudo. A análise estatística do ajuste sugere que os três parâmetros da curva-chave (k , h_0 e n) foram significativos ao modelo com valores de p de $2,88 \times 10^{-06}$; 0,00251 e 0,00658, respectivamente.

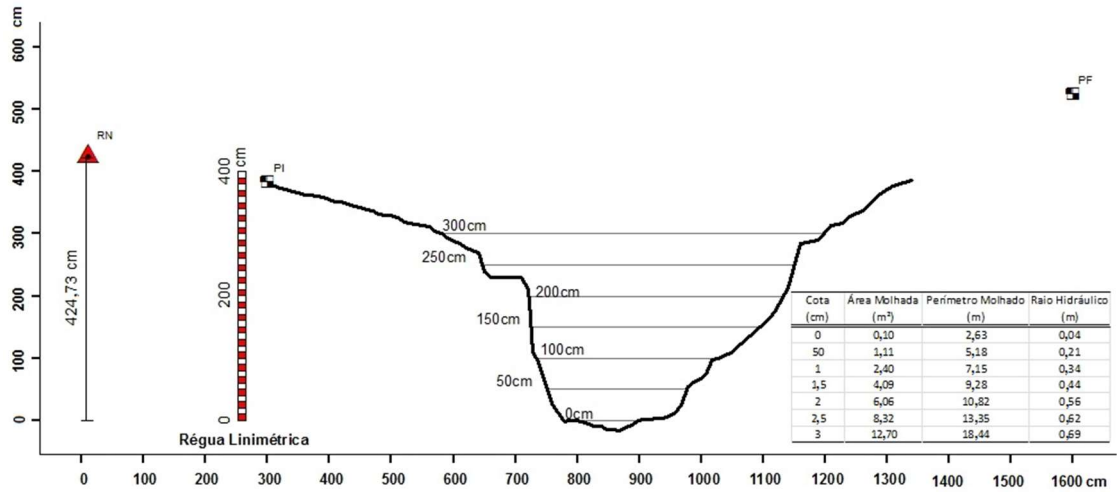


Figura 5.2 - Levantamento do perfil da seção fluvimétrica e características hidráulicas da seção.

Utilizando-se das características geométricas da seção de medição, bem como dos valores medidos de vazão, procedeu-se, também, com a extrapolação da curva-chave pelo método anteriormente discutido. A Figura 5.3 apresenta a curva-chave da seção da bacia experimental contendo as equações para baixas vazões (ajustadas aos dados medidos) e para as altas vazões (extrapolada pelo método de Stevens).

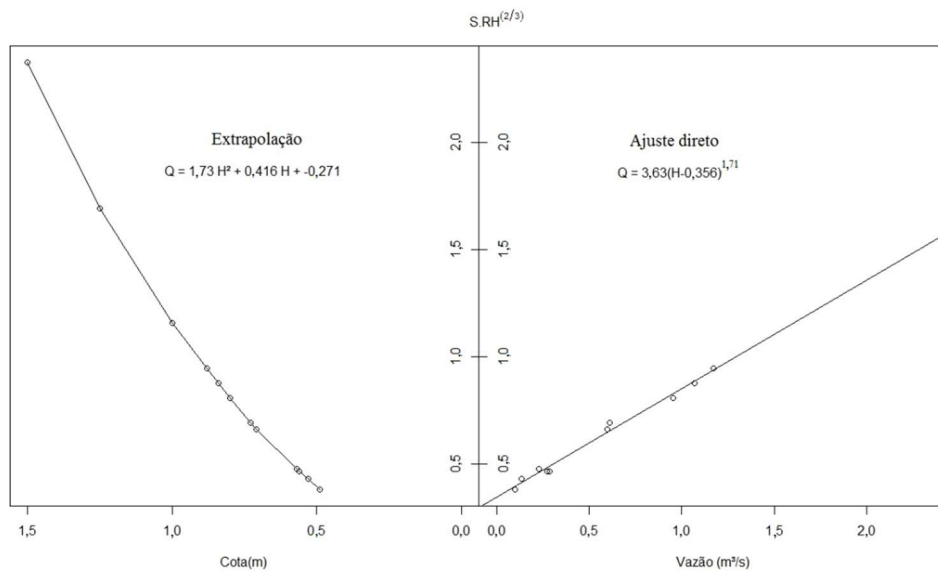


Figura 5.3 - Curva-chave da seção fluvimétrica.

Os dados armazenados pela PCD foram submetidos às equações de curva-chave para baixas e altas cotas. Parte da série de chuva e vazão é representada na Figura 5.4. A máxima cota observada desde o início do monitoramento foi de 2,74m, resultante de uma precipitação de 49,6 mm convertida em uma vazão de 14,7m³/s. Vazões máximas instantâneas da ordem de 15m³/s foram reportadas para a bacia em questão em Silva (2003).

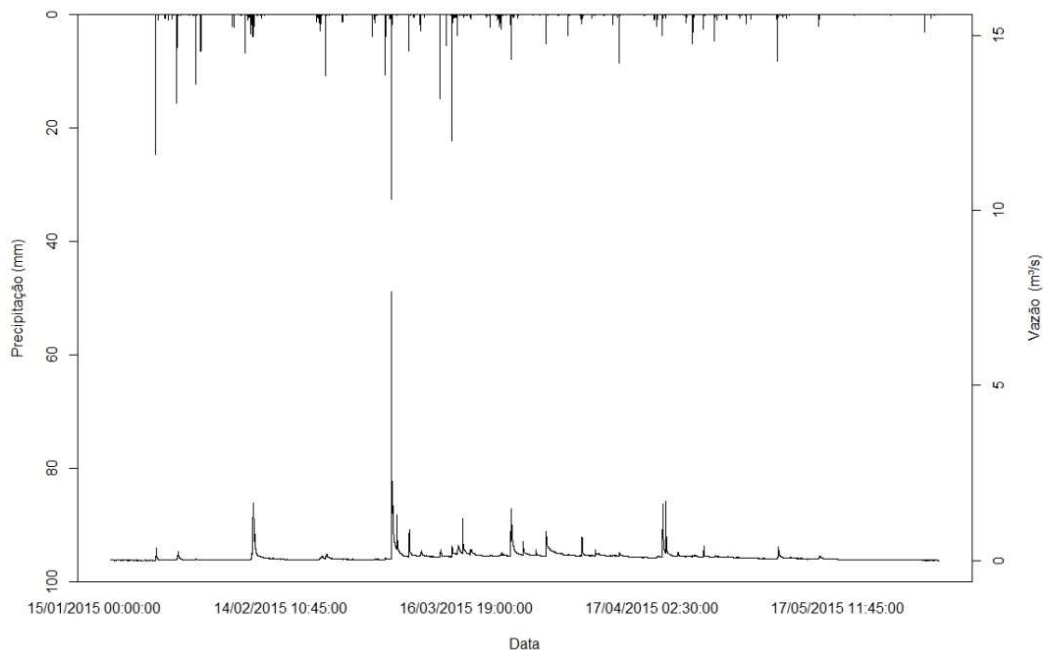


Figura 5.4 - Exemplo de série de precipitação x vazão da bacia experimental do córrego Capetinga.

5.3- LEVANTAMENTO DA CURVA-CHAVE DE DESCARGA SÓLIDA

Ao longo do último período de chuvas foram coletadas 62 amostras de forma automática com uso do amostrador ISCO. A cada evento, o amostrador era pré-programado para identificação da elevação do nível do curso d'água e aquisição de uma amostra a cada 15 minutos. Entre essas amostras coletadas de forma automática foi possível a aquisição, de forma pareada, de oito amostras utilizando-se do amostrador manual USD 49 para efeitos de comparação dos métodos amostrais.

A faixa de concentração amostrada variou de 2,4 mg/L a 414 mg/L, considerando o amostrador automático e de 90 mg/L até 139 mg/L, no caso do método convencional, conforme depende-se da Figura 5.5a.

O teste estatístico indicou uma diferença média das concentrações do amostrador automático em comparação com o método tradicional de -6 mg/L, com um intervalo de confiança para a média da diferença variando de -22 mg/L até 10 mg/L. A Figura 5.5a apresenta um resumo gráfico da distribuição da diferença das amostras pareadas.

Considerando a faixa de concentração amostrada de forma pareada, variando de 96 até 139mg/L, tem-se o intervalo de confiança para a média do erro relativo entre 8,9% - 16,9%, com uma média fixada em -3,98%, conforme observa-se na Figura 5.5b. Embora o teste estatístico tenha refutado a hipótese de diferença nula entre os métodos, o resultado indica uma incerteza grande no valor da média dessa diferença. Nesse sentido, deverão ser empregados mais esforços no intuito de cobrir uma maior faixa de amostragem pareada para reduzir essas incertezas.

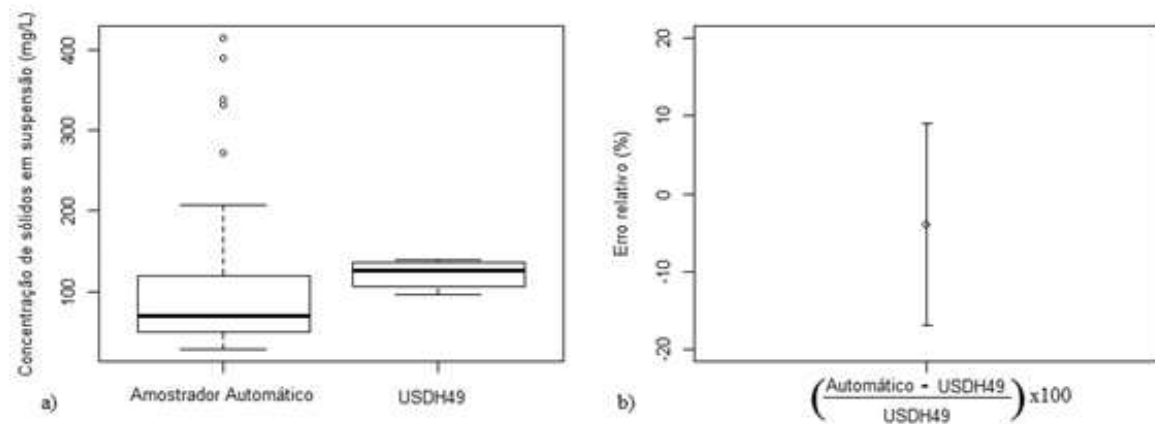


Figura 5.5 - Resumo estatístico das amostras de sólidos em suspensão. a) boxplot indicando as faixas de amostragem captadas pelo amostrador automático e USD 49; e b) barra de indicação de média e intervalo de confiança do erro relativo dos dois métodos amostrais.

Como meio de obtenção de uma curva-chave de descargas sólidas, construíram-se as relações entre as variáveis independentes turbidez e cota, tomando a concentração de sólidos em suspensão como variável resposta.

Na Figura 5.6 é possível verificar o resultado do ajuste de uma função potência para o fenômeno em análise. As linhas pontilhadas indicam o intervalo de confiança dos parâmetros ajustados. Os diferentes eventos são indicados pelos símbolos distintos na área de plotagem. Verifica-se uma maior incerteza no modelo preditivo quanto se toma a cota como variável independente (Figura 5.6b) em comparação com aquele que se é apropriada da turbidez como variável preditiva (Figura 5.6a). Essa maior incerteza do modelo de cotas é corroborada ao se analisar os dados de correlação trazidos na Tabela 5.1, com menor explicação da variância da variável dependente quanto tomada a cota como variável independente.

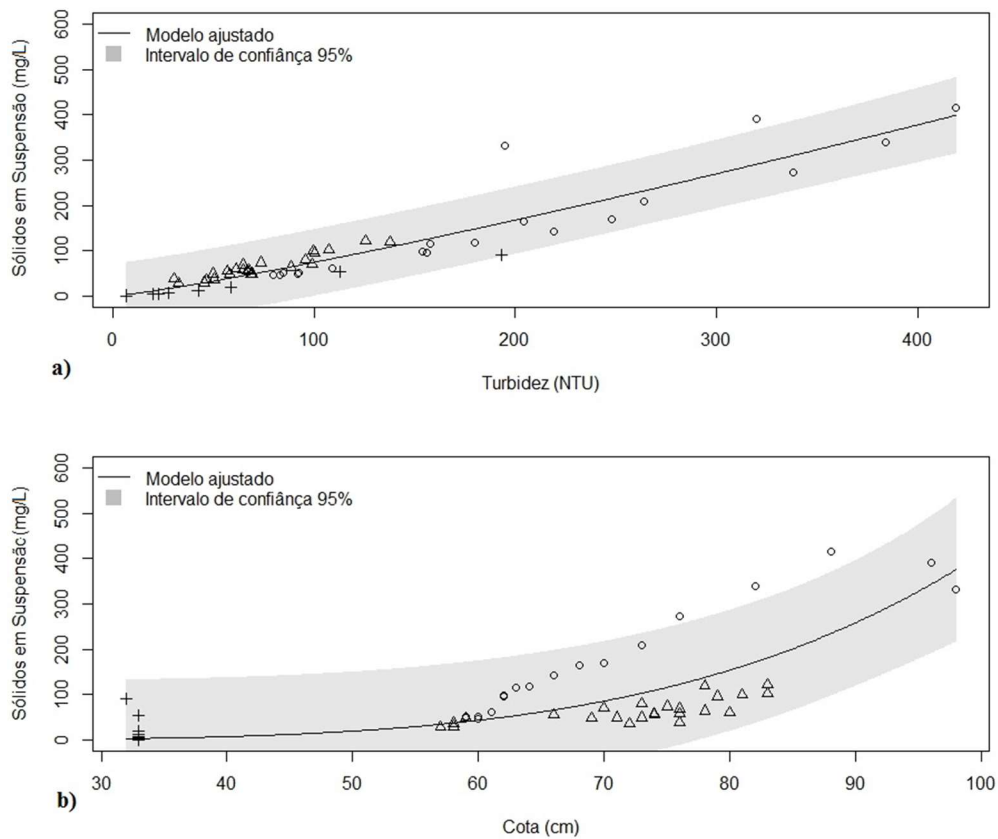


Figura 5.6 - Relação de variáveis físico-química e hidráulica com a concentração de sólidos em suspensão. a) curva de turbidez x sólidos em suspensão; e b) curva de cota x sólidos em suspensão.

Tabela 5.1 - Resumo estatístico do ajuste dos modelos de regressão para sólido em suspensão

| Variável | R ² | Valor p | Modelo |
|----------|----------------|------------------------|---|
| Turbidez | 0,87 | <2,2x10 ⁻¹⁶ | SS = 0,334 * Turbidez ^{1.17} |
| Cota | 0,55 | 2,3x10 ⁻¹⁰ | SS = 6,5 * 10 ⁻⁷ * Cota ^{4.4} |

Onde: r – coeficiente de correlação Spearman; Valor p - probabilidade da correlação do modelo ajustado com a variável preditiva ser ao acaso.

De posse da série de dados de turbidez e do modelo ajustado para a concentração de sólidos em suspensão, construiu-se a série de descargas sólidas apresentada na Figura 5.7. Uma análise dessa figura evidencia que, na bacia estudada, eventos de precipitação nem sempre geram respostas em termos de incremento na descarga de sólidos. Isso pode tratar-se de um aceno para a não geração de escoamento superficial em determinadas situações de precipitação, ou mesmo para uma diferenciação da resposta da bacia em função da posição do evento da precipitação na área de estudo.

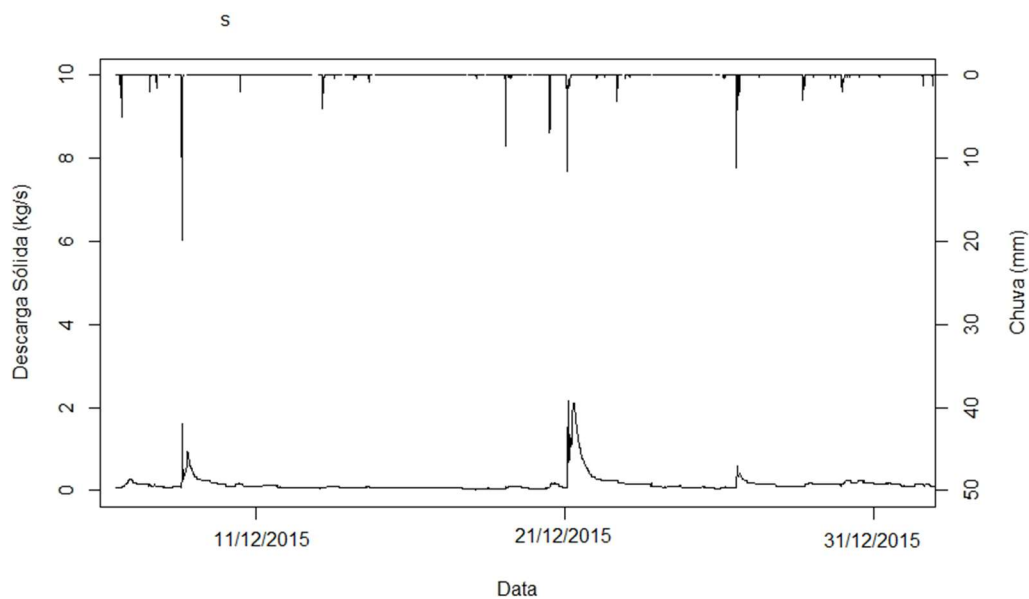


Figura 5.7 - Exemplo de uma série de precipitação x descarga sólida da bacia experimental do córrego Capetinga.

5.4- VARIABILIDADE ESPACIAL NA GERAÇÃO DE SEDIMENTOS

Ao longo dos trabalhos de campo foi identificada importante contribuição de descargas sólidas provenientes de uma estrada não pavimentada a montante da estação hidrossedimentológica. Autores como Ziegler *et al.* (2014) apontam a influência da distribuição espacial da chuva nos processos de geração de sólidos em suspensão - SS em rios. Segundo os autores, a depender da localização da chuva, altas cargas de SS eram observadas mesmo em baixas vazões. Outra observação dos autores foi a alteração do tipo de histerese na curva de descargas sólidas por influência da distribuição da chuva.

A influência da cobertura vegetal na atenuação dos processos erosivos é reportada por autores como Martinez-Mena *et al.* (1999), que observaram uma redução da energia disponível para erosão por impacto da chuva em 50% e da energia disponível para erosão por escoamento superficial em 75% sobre condições de vegetação natural no semiárido da Espanha.

Nesse sentido, não apenas a distribuição espacial da chuva, mas também o padrão de uso e ocupação do solo deve influenciar a produção de sedimentos. Esse padrão de geração de sedimentos foi testado para a bacia experimental do córrego Capetinga e encontra-se nas Figuras 5.8 e 5.9.

A Figura 5.8 apresenta a variabilidade espacial da chuva relativa a 32 eventos, onde foi testada a hipótese de que regiões específicas da bacia têm maior aptidão para geração de sedimentos. No período considerado a máxima precipitação diária foi de 55mm, atribuída à região monitorada pelo pluviôgrafo – PLU 3.

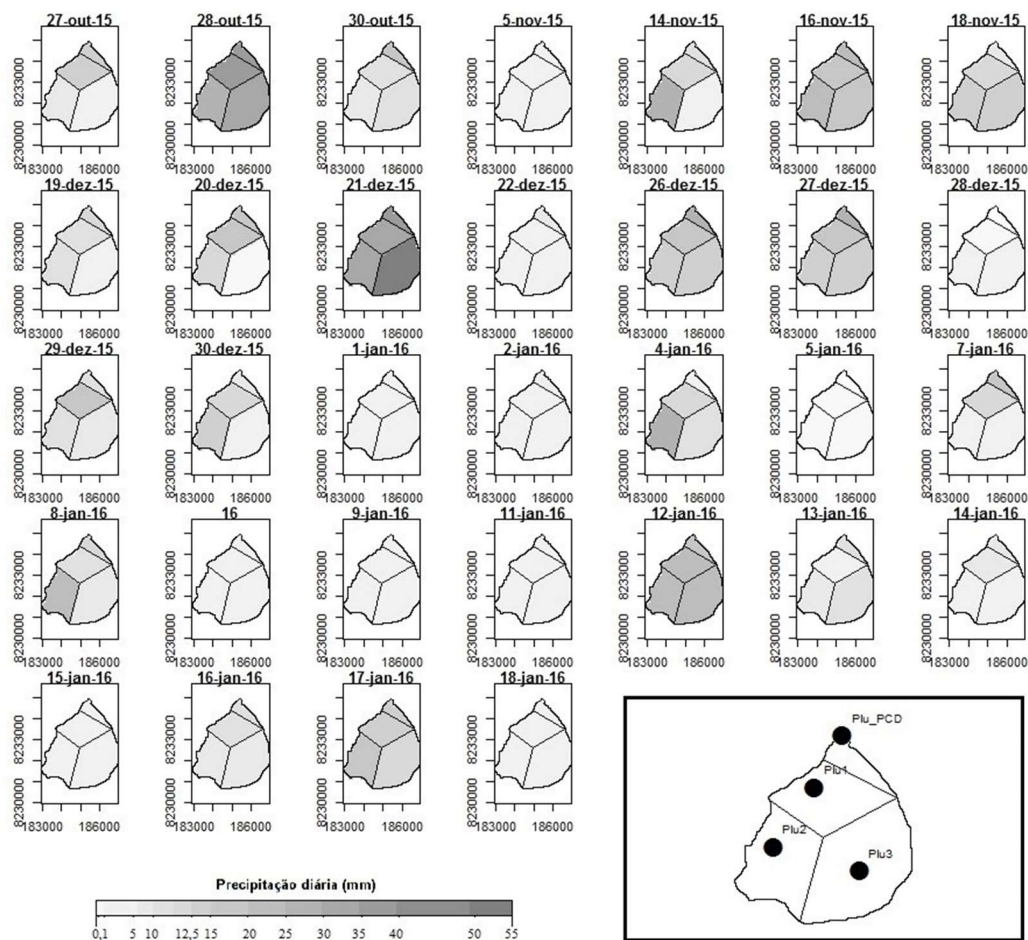


Figura 5.8 - Distribuição espacial das chuvas utilizadas na análise de correlação com pico de turbidez.

A Figura 5.9 apresenta uma matriz de correlação que considera não apenas a correlação entre os pluviógrafos espalhados na bacia, mas também a correlação entre cada pluviógrafo e a máxima turbidez diária. É possível constatar uma forte correlação entre os registradores de chuva distribuídos na bacia. Isso denotaria, em uma primeira análise, um obstáculo para diferenciação de um padrão espacial na geração de sedimentos. Todavia, ao se analisar a correlação com a turbidez máxima, valores mais significativos são observados na região registrada pelo PLU_PCD, localizado no exutório da bacia. Ademais, não houve correlação significativa entre os pluviógrafos mais próximos da cabeceira (PLU2 e PLU3) com a máxima turbidez diária. Isso corrobora a conclusão para um fenômeno orientado pela localização do evento de precipitação mesmo para uma pequena bacia.

Para a presente análise optou-se pelo coeficiente de correlação de *Spearman* em detrimento do coeficiente de *Pearson*. Isso porque o primeiro coeficiente é mais adequado para correlações monotônicas, porém não lineares.

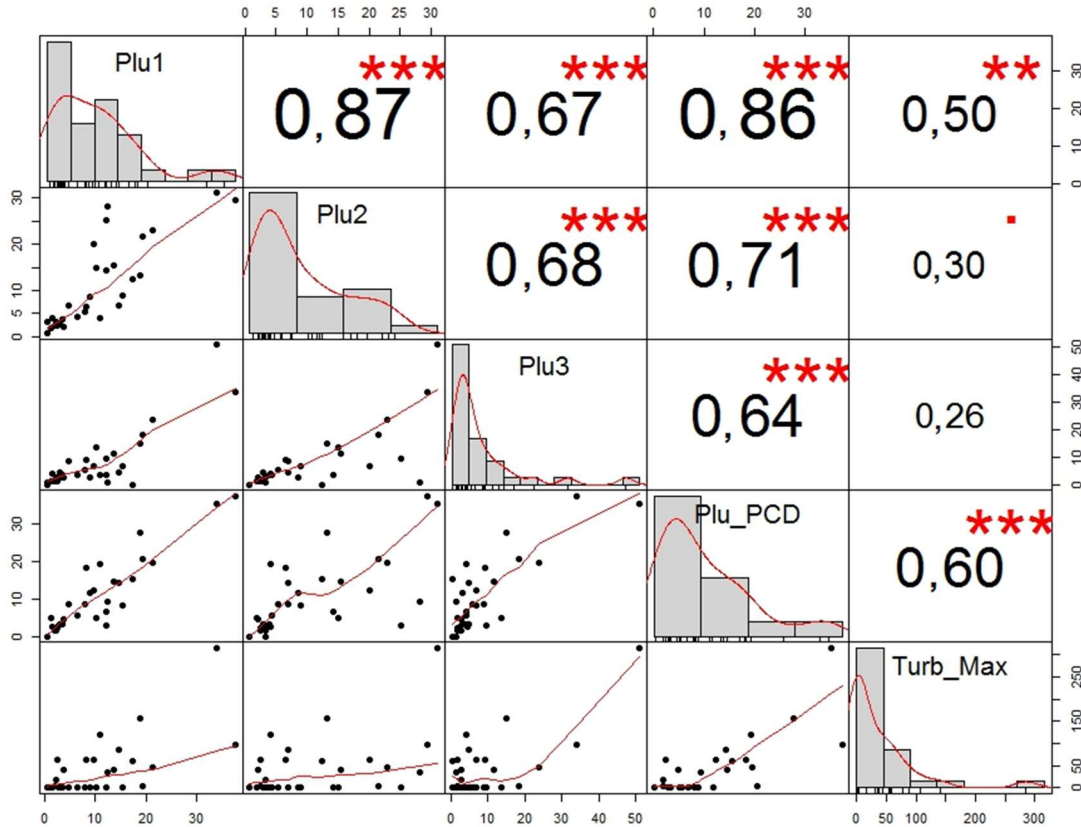


Figura 5.9 - Matriz resumo das interações dos pluviógrafos e turbidez máxima. Correlação cruzada, histograma e teste de significância.

Esse resultado mostra-se ainda mais relevante quando se inclui na análise a área de contribuição de cada pluviógrafo. Tais áreas, computadas pelo método de Thiessen, revelam que o registrador de chuva PLU_PCD é responsável por apenas 6,8% da precipitação total da bacia, contra 23,5% do PLU1, 27,3% do PLU2 e 42,2% do PLU3.

Como visto anteriormente, ainda que a maior precipitação, de 55 mm tenha sido registrada na região abrangida pelo PLU 3, esse apresentou a menor correlação com a produção de turbidez, acentuando o aspecto espacial localizado do processo de geração de sedimentos. A hipótese levantada é que em áreas preservadas, a exemplo da bacia em análise, as estradas não pavimentadas constituem a principal fonte de geração de sedimentos. É justamente o cenário que ocorre em ponto próximo ao pluviógrafo designado por PLU_PCD, onde se localiza a intersecção da principal estrada de acesso à FAL com o curso do córrego Capetinga, convergindo o escoamento superficial da estrada para o corpo hídrico.

Trabalhos como o de Corrêa & Dedecek (2009) apontam que as perdas de solo provenientes de estradas em áreas de florestas plantadas florestal representaram 99,7% das perdas totais de solo, considerando contribuições provenientes das estradas e das áreas de plantio. Tal observação reforça a hipótese desse tipo de comportamento na bacia do Capetinga.

5.5- ESTUDO DE INTERCEPTAÇÃO

5.5.1- Levantamento preliminar

Ao longo primeira fase do estudo de interceptação foram monitorados 15 eventos, considerando uma base diária. Nesse período, foram registradas chuvas acumuladas em 24 horas variando entre 1,0 mm e 46,6 mm. A precipitação interna produzida pelos 15 eventos apresentou variabilidade espacial mais acentuada na fitofisionomia de mata de galeria em comparação com a área de cerrado. A Tabela 5.2 apresenta um resumo estatístico dos resultados experimentais.

Percebe-se, na região de cerrado sentido restrito, um predomínio de assimetria negativa para os eventos de precipitação interna, enquanto na porção de mata houve predomínio de assimetria positiva. Observam-se, ainda, distribuições assimétricas fortes ($|g1|>1$), com maior frequência na fitofisionomia de mata de galeria.

Tabela 5.2 - Resumo estatístico das observações de precipitação interna no cerrado

| Precipitação (mm) | Precipitação interna - Cerrado | | | | | Precipitação interna - Mata de Galeria | | | | |
|----------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|-------|-------|--|-----------------|------------------|-------|--------|
| | Média (mm) | Mediana (mm) | σ (mm) | g_1 | CV | Média (mm) | Mediana (mm) | σ (mm) | g_1 | CV |
| 1,0 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,00 | 63,2% | 0,1 | 0,0 | 0,2 | 1,02 | 171,2% |
| 2,4 | 1,7 | 2,0 | 0,6 | -0,74 | 35,8% | 0,6 | 0,5 | 0,6 | 0,38 | 86,7% |
| 4,2 | 2,4 | 2,0 | 1,4 | 0,65 | 59,3% | 2,3 | 2,0 | 1,0 | 0,51 | 42,1% |
| 4,6 | 3,5 | 4,0 | 1,2 | -0,42 | 33,9% | 2,9 | 2,5 | 1,8 | 2,24 | 61,8% |
| 5,8 | 3,4 | 3,5 | 1,5 | -0,58 | 45,6% | 2,2 | 2,0 | 1,3 | -0,23 | 57,1% |
| 6,6 | 5,7 | 6,0 | 2,0 | -1,21 | 35,4% | 4,1 | 4,0 | 1,4 | 1,37 | 33,6% |
| 7,4 | 6,2 | 6,5 | 1,5 | -0,64 | 23,6% | 6,0 | 4,5 | 3,6 | 1,82 | 59,2% |
| 7,8 | 6,1 | 7,0 | 1,7 | -0,52 | 28,1% | 3,1 | 3,0 | 2,0 | 0,25 | 65,0% |
| 11,14 | 10,1 | 10,0 | 2,5 | -0,14 | 24,5% | 9,3 | 9,0 | 1,7 | 0,34 | 18,4% |
| 12,6 | 10,4 | 11,5 | 3,2 | -0,39 | 31,2% | 9,3 | 8,5 | 5,4 | 1,60 | 58,2% |
| 13 | 9,2 | 10,0 | 2,6 | -0,79 | 28,7% | 5,0 | 5,0 | 2,3 | 0,23 | 46,4% |
| 15,8 | 12,9 | 14,0 | 2,6 | -0,42 | 20,3% | 9,2 | 7,5 | 3,4 | 0,65 | 36,5% |
| 19,2 | 13,2 | 14,5 | 4,1 | -0,59 | 30,6% | 11,0 | 12,0 | 4,3 | -1,32 | 39,2% |
| 26,2 | 18,6 | 18,5 | 4,0 | 0,13 | 21,4% | 18,0 | 17,0 | 3,7 | 0,09 | 20,5% |
| 46,6 | 42,8 | 41,0 | 9,3 | 0,42 | 21,7% | 27,9 | 31,5 | 6,3 | -0,59 | 22,6% |

Onde: g_1 - Coeficiente de Assimetria de Pearson; σ - Desvio Padrão.

Os resultados do presente experimento corroboram os apontamentos de Helvey & Patric (1966), Jackson (1971), Kimmins (1973), assim como Vieira (1999). Esses autores observaram que a variabilidade espacial do fenômeno estudado é inversamente proporcional ao tamanho do evento de precipitação.

No presente estudo, em ambos os casos, cerrado e mata de galeria, os resultados encontrados acenam para uma tendência de decaimento do coeficiente de variação da precipitação interna com o aumento da precipitação total. Essa tendência é, todavia, mais marcante na região da mata de galeria, como pode ser observado na Figura 5.10, onde as linhas pontilhadas representam intervalo de confiança com 95% de probabilidade.

De maneira geral, a variabilidade da precipitação interna para eventos de pequena monta demonstrou-se significativamente menor na área de cerrado em comparação com a área de mata de galeria. Com a elevação da precipitação total o comportamento médio da

variabilidade da precipitação interna nas duas áreas estudadas tendeu à estabilidade, com valores ligeiramente inferiores a 20% na área de mata.

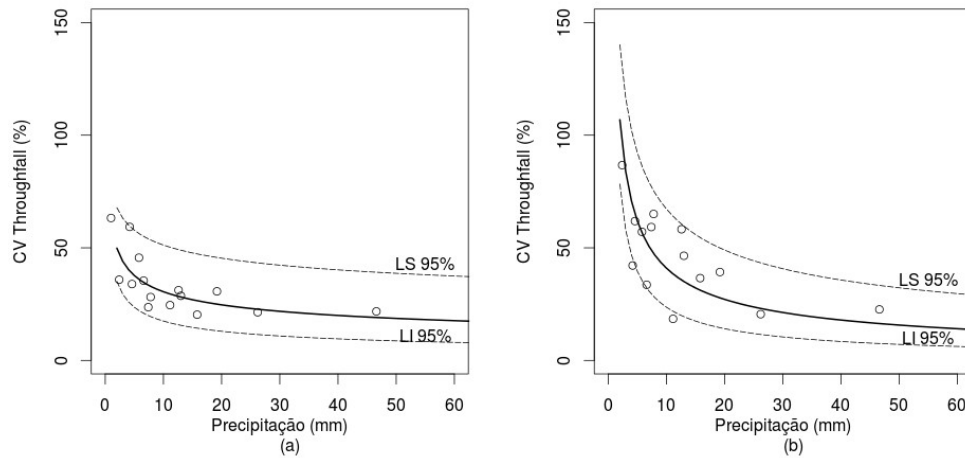


Figura 5.10 - Comportamento do coeficiente de variação da precipitação interna em função da precipitação total. a) cerrado; e b) mata de galeria.

Pode-se relacionar esse comportamento com a saturação da capacidade de armazenamento do extrato formado pelas copas. Em estudo conduzido por Zimmermann *et al.* (2009) concluiu-se que, enquanto os espaços vazios entre as copas estavam relacionados a valores *outliers* em eventos pequenos, com o aumento da lâmina precipitada esses espaços vazios tinham menor participação na geração de valores extremos.

A Tabela 5.3 apresenta o resumo estatístico do ajuste do modelo para variação do CV em função do tamanho do evento de precipitação.

Tabela 5.3 - Ajuste dos modelos do CV em função da chuva acumulada em 24h

| Fitofisionomia | r | Valor p | Modelo |
|----------------|------|-------------------------|--------------------------------|
| Cerrado | 0,92 | $< 2,2 \times 10^{-16}$ | $CV_{pi} = 61,57 * P^{-0,30}$ |
| Mata | 0,85 | $< 2,2 \times 10^{-16}$ | $CV_{pi} = 161,50 * P^{-0,59}$ |

Onde: r - Correlação Spearman; Valor p - probabilidade de r ser igual à zero, pi - precipitação interna, P - precipitação total

A dispersão decrescente dos dados de precipitação interna traz implicações no próprio planejamento de estudos dessa natureza. Isso porque reflete em um número desigual de amostras necessárias para reduzir a incerteza sobre o comportamento médio do fenômeno. Uma vez que eventos de precipitação de pequena monta exibem precipitação interna com elevado coeficiente de variação, o número de amostras necessárias para estimar um dado erro

(d) na média amostral será sensivelmente superior quando comparado com eventos mais expressivos.

Tomando como base a aproximação apresentada pela Equação 10, promoveu-se a determinação do número de amostras de precipitação interna necessárias para obtenção de um erro amostral de 1%, 5% e 10% com 95% de probabilidade. O resultado desse processamento encontra-se na Figura 5.11.

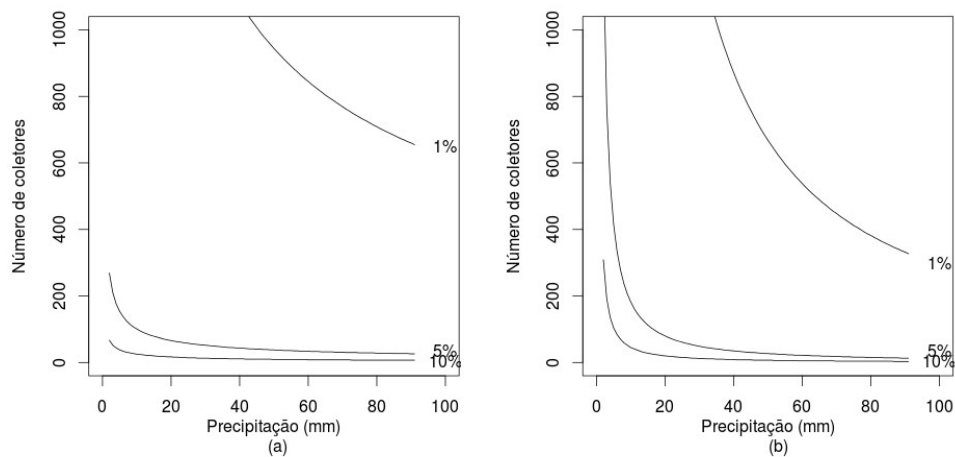


Figura 5.11 - Número de coletores de precipitação interna necessários para obtenção de médias com 1%, 5% e 10% de erro. a) cerrado; e b) mata de galeria.

Observa-se que, em ambos os casos, precipitações de pouca intensidade e, como visto, de elevado coeficiente de variação, ostentam, em termos práticos, valores insustentáveis de coletores. Mesmo admitindo erros máximos da ordem de 10% em relação à média populacional da precipitação interna, seriam necessários mais de 100 coletores para uma adequada estimativa dessa precipitação interna gerada por chuvas de 1mm, no caso do cerrado.

Na fitofisionomia de mata, sob essas mesmas condições de erro e precipitação, o número necessário de coletores de precipitação interna passaria das 700 unidades. Para eventos de precipitação superiores a 10mm o número de coletores passa para patamares mais razoáveis; admitindo-se erros na média de 10%, são necessários aproximadamente 25 coletores para o caso do cerrado e de 45 amostras para a fitofisionomia de mata de galeria.

Esses resultados convidam para uma reflexão: qual esforço amostral deve se empregar para a determinação da precipitação interna? Naturalmente a resposta encontra-se lastreada por outro questionamento: com qual objetivo essa estimativa será empregada? Para estudos hidrológicos direcionados ao comportamento de máximas de uma bacia, um número menor e factível de amostradores atenderia ao propósito. Todavia, para estudos hidrológicos de outra natureza, a exemplo de recarga de aquíferos, a abordagem com coletores cilíndricos demandaria um número de difícil operação. Nesse último caso, a opção por uma amostragem com um número reduzido de coletores alargaria o erro da média amostral a ponto de comprometê-la.

Conhecer o comportamento da chuva na região estudada pode auxiliar na decisão do número de amostras. Na área em exame, a título exemplificativo, os dados de precipitação indicam que em 80% dos dias chuvosos a lâmina precipitada não superou 18,8mm. Nesses termos, com a adoção de 17 coletores, apenas 20% dos eventos teriam as médias de precipitação interna determinadas com erro de no máximo 10% para a área de cerrado, enquanto para a região de mata 21 coletores satisfariam essa condição.

Um problema derivado da heterogeneidade do coeficiente de variação é o rompimento com pressupostos estatísticos básicos que impediriam uma análise de regressão para previsão dos valores de precipitação interna com base nos valores de precipitação total. Entre as hipóteses estatísticas assumidas para regressão linear das variáveis encontra-se a da homocedasticidade. Segundo Naghettini & Pinto (2007) essa hipótese estabelece que os resíduos da regressão são realizações de uma variável aleatória independente e normalmente distribuída, com média zero e variância constante. Nesses termos, a utilização dos dados brutos da precipitação interna para elaboração de um modelo preditivo esbarra na heteroscedasticidade da variância dos resíduos. Isso porque, como visto anteriormente, o desvio padrão da precipitação interna encontra-se fortemente correlacionado com o tamanho do evento. Autores como Kimmins (1973) comungam dessa constatação. A assimetria detectada na distribuição das distintas observações da variável precipitação interna traz um problema adicional para o ajuste de um modelo preditivo: um aceno para a não normalidade dos dados.

Diante desse cenário, a utilização de regressão linear apresenta problemas de difícil transposição. Uma solução seria a busca por transformação dos dados de precipitação

interna. Alternativamente, a utilização de métodos mais robustos de regressão contornaria a falta de homocedasticidade e normalidade.

A regressão quantílica foi o método empregado no presente estudo. Os resultados gráficos dessa técnica encontram-se na Figura 5.12, onde as linhas vermelhas descontínuas compreendem o intervalo de confiança da regressão com 95% de probabilidade. As tabelas 5.4 e 5.5, por seu turno, trazem um resumo estatístico do ajuste dos modelos.

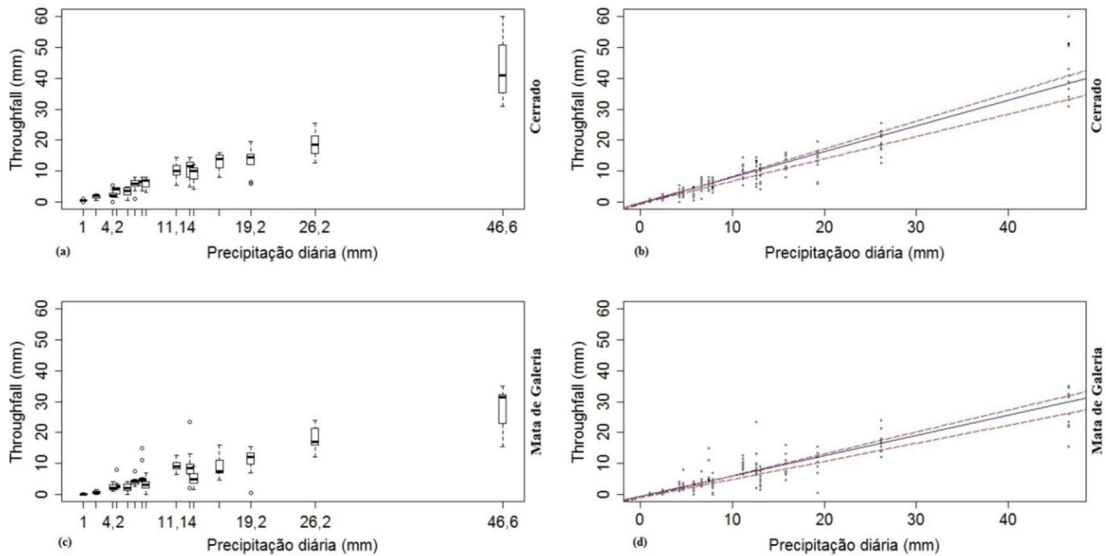


Figura 5.12 - Resultado da regressão quantílica. a) diagrama de caixa dos dados de precipitação interna para o cerrado; b) regressão quantílica para a região de cerrado; c) diagrama de caixa dos dados de precipitação interna para a mata de galeria; e d) regressão quantílica para a região da mata

Tabela 5.4 - Resumo do ajuste do modelo para a precipitação interna na área de cerrado

| | Valor | Erro padrão | Valor t | Pr(> t) | Intervalo do parâmetro |
|----------|-------|-------------|---------|----------|------------------------|
| α | -0,33 | 0,32 | -1,02 | 0,30813 | -0,57 – 0,38 |
| β | 0,83 | 0,04 | 16,98 | 0,00000 | 0,72 – 0,88 |

Onde: α - interceptação da reta; β - coeficiente angular.

Tabela 5.5 - Resumo do ajuste do modelo para a precipitação interna na área de mata

| | Valor | Erro padrão | Valor t | Pr(> t) | Intervalo do parâmetro. |
|----------|-------|-------------|---------|----------|-------------------------|
| α | -0,65 | 0,15 | -4,35 | 0,00002 | -1,10 – (-0,54) |
| β | 0,65 | 0,03 | 20,32 | 0,00000 | 0,58 – 0,70 |

Onde: α - interceptação da reta; β - coeficiente angular.

Observa-se, para ambos os parâmetros (α e β), um intervalo de confiança menos amplo no modelo ajustado para a área de mata de galeria em comparação com os limites desses parâmetros no caso do cerrado. A interceptação da reta no eixo vertical não foi estatisticamente diferente de zero no caso do modelo linear ajustado para a fitofisionomia de cerrado. Diferentemente, para a área de mata de galeria a interceptação da reta apresentou valor negativo e estatisticamente diferente de zero. Esse coeficiente negativo exibido no caso da mata de galeria deve estar associado à capacidade de armazenamento do extrato formado pelas copas das árvores que compõem essa fitofisionomia.

5.5.2- Estudo baseado em evento

Os resultados do experimento mais detalhado, conduzido com pluviógrafos instalados na mata de galeria, são apresentados na sequência. Os eventos de precipitação, bem como o posicionamento dos registradores empregados entre os meses de outubro de 2015 a fevereiro de 2016, encontram-se na Figura 5.13. No período estudado a precipitação acumulada foi de 687mm. Os pluviógrafos foram realocados por seis vezes ao longo do estudo.

Ao longo do período do experimento um total de 35 eventos foram observados, considerando o critério de 6h sem precipitação entre eventos. Na aplicação do método IS entre cinco e seis observações antes do ponto de saturação foram suficientes para um bom ajuste, com menor intervalo de confiança para a linha de regressão, da fase pré-saturação (Figura 5.14a).

A identificação do ponto de inflexão (quando ocorre a saturação do dossel) é elemento-chave no método IS. O uso de algoritmos de minimização global do erro por mínimos quadrados, sugerido por Link *et al.* (2004) produziu, em alguns eventos observados, pontos de saturação não condizentes com a realizada física do processo de interceptação. Esse problema não reside no processo de otimização em si, mas nas limitações da amostragem.

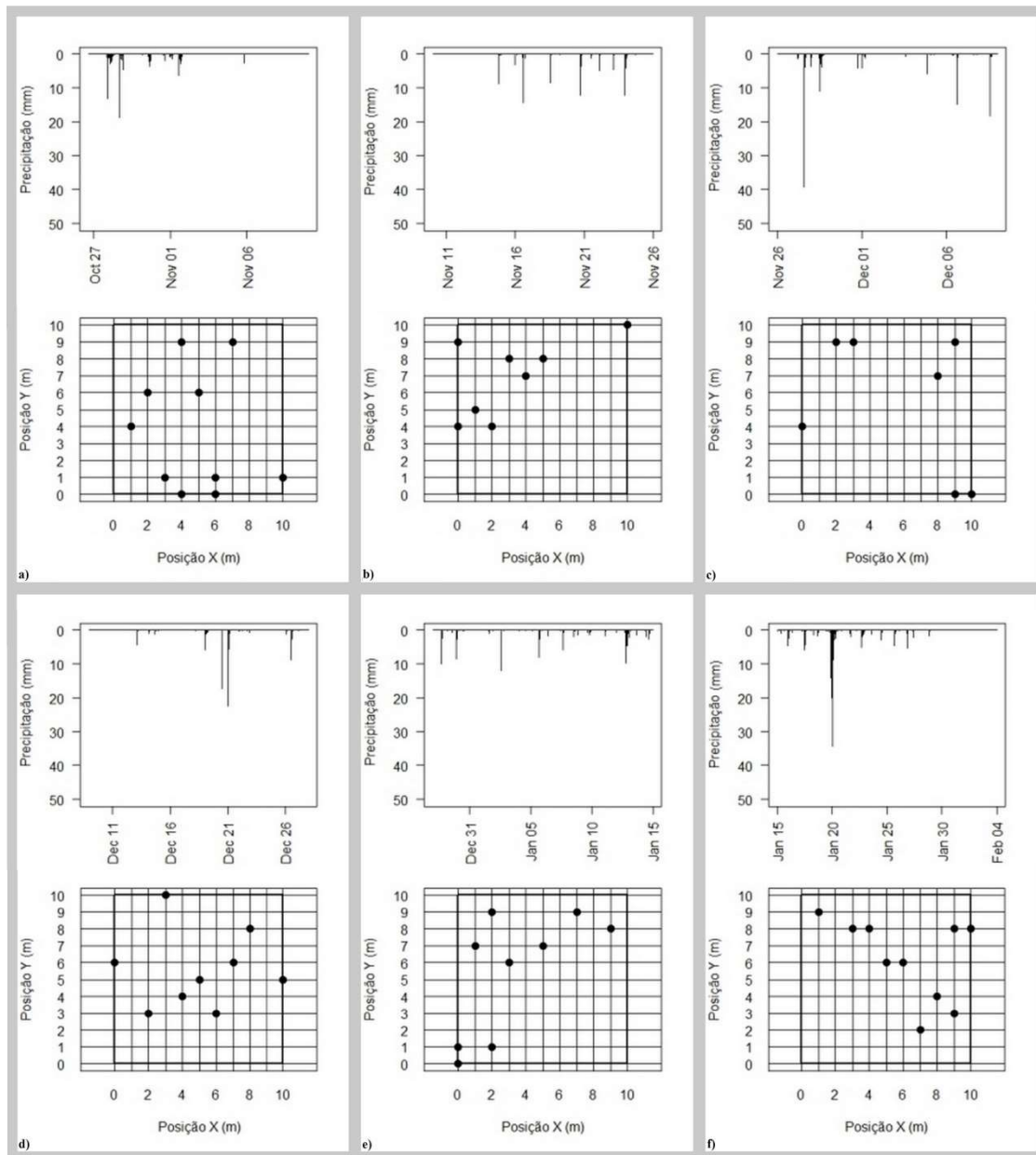


Figura 5.13 - Eventos de precipitação e posicionamento dos pluviógrafos na etapa dois do estudo de interceptação.

Uma vez que a saturação ocorre no início dos eventos (menos de 3 mm de precipitação acumulada), o modelo linear para o estágio de pré-saturação tem maior incerteza. Um exemplo disso é mostrado na Figura 5.14b, onde a área vermelha representa o intervalo de confiança para o modelo linear e a linha escura representa o modelo ajustado. Apesar do fato de que algoritmos de redução do erro médio quadrático razoavelmente identifiquem o ponto de saturação do dossel, o pequeno número de observação do modelo de regressão da fase de pré-

saturação leva a um amplo intervalo de confiança para a inclinação da reta. Isso indica uma amostragem insatisfatória da precipitação interna livre, dominante nessa primeira fase. Embora já tenha sido discutido anteriormente a alta incerteza do throughfall médio real para a pequena altura da chuva, parece que a resolução (0,2 mm) dos pluviômetros explica a falta de pontos de regressão antes da saturação. O uso de medidores de chuva de 0,1 mm de resolução provavelmente descreveria o fenômeno de precipitação interna livre com mais detalhes.

Outro problema observado com o uso do método IS foi a ausência da condição de pré-saturação (Figura 5.14c). Em alguns casos, o período entre eventos de 6 horas parece insuficiente para completa renovação da capacidade de armazenamento do dossel.

A falta de ajuste também ocorreu devido a mudanças na taxa E/R ao longo do evento de precipitação ocasionando pouca aderência ao modelo de regressão na linha de pós-saturação (Figura 5.14d).

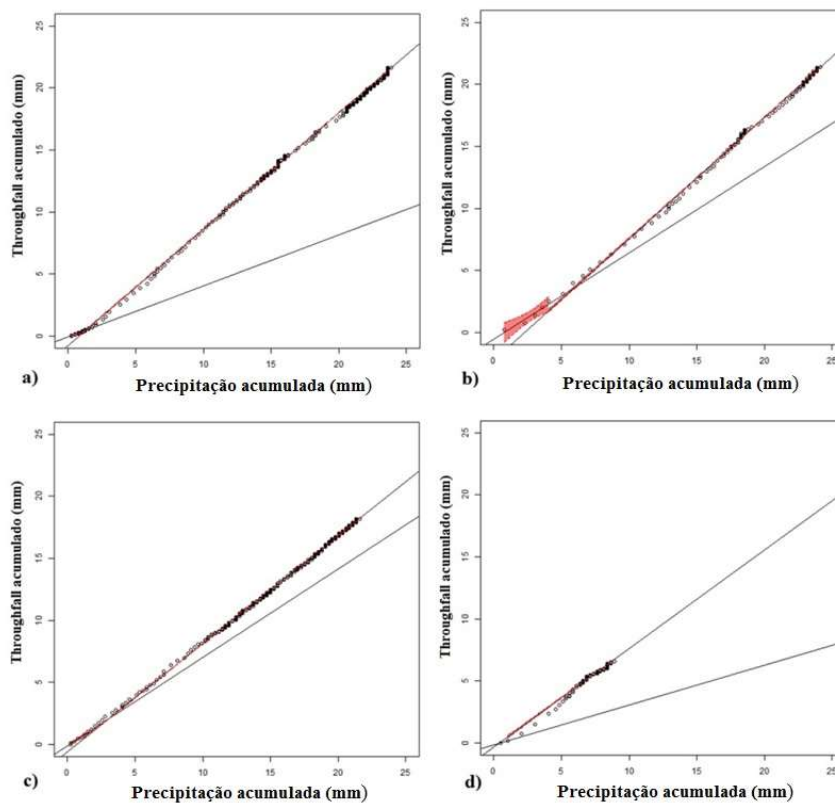


Figura 5.14 - Exemplo de ajuste de dados experimentais pelo método SI

Pode-se constatar, com base na Tabela 5.6, que, para a maioria dos eventos, o coeficiente de precipitação interna livre (ρ) apresentou largo intervalo de confiança delimitado pelos limites inferior e superior desse coeficiente (CI_Inf, CI_Sup).

Tabela 5.6 - Resumo dos eventos de precipitação e do coeficiente de precipitação interna livre (ρ) obtido pelo método IS.

| Dados observados | | | Método IS estatística dos coeficientes | | | |
|------------------|-------------------|------------------|--|--------|--------|----------|
| Evento | Precipitação (mm) | Throughfall (mm) | ρ | CI_Inf | CI_Sup | Pval |
| 1 | 24,38 | 16,28 | 0,21 | 0,04 | 0,38 | 2,99E-02 |
| 2 | 27,94 | 18,94 | 0,25 | 0,19 | 0,31 | 1,90E-05 |
| 3 | 13,21 | 8,7 | 0,12 | 0,04 | 0,2 | 1,29E-02 |
| 4 | 12,45 | 5,54 | 0,08 | 0,03 | 0,14 | 6,59E-03 |
| 5 | 16 | 13,58 | 0,5 | 0,34 | 0,67 | 2,40E-03 |
| 6 | 10,16 | 7,78 | 0,35 | 0,23 | 0,47 | 2,50E-03 |
| 7 | 24,13 | 21,4 | NA | NA | NA | NA |
| 8 | 6,6 | 4,9 | 0,11 | -0,02 | 0,23 | 8,16E-02 |
| 9 | 4,83 | 3,55 | 0,51 | 0,39 | 0,63 | 8,91E-04 |
| 10 | 18,8 | 16,03 | 0,44 | 0,35 | 0,53 | 2,48E-07 |
| 11 | 43,69 | 40,46 | NA | NA | NA | NA |
| 12 | 4,32 | 1,82 | 0,36 | 0,21 | 0,52 | 6,13E-04 |
| 13 | 21,59 | 18,16 | NA | NA | NA | NA |
| 14 | 10,16 | 6,8 | 0,38 | 0,26 | 0,49 | 7,17E-04 |
| 15 | 6,35 | 4,8 | NA | NA | NA | NA |
| 16 | 16,26 | 11,8 | 0,22 | 0,21 | 0,23 | 2,20E-16 |
| 17 | 19,3 | 17 | NA | NA | NA | NA |
| 18 | 4,57 | 2,6 | 0,46 | 0,38 | 0,54 | 9,00E-05 |
| 19 | 8,89 | 6,55 | NA | NA | NA | NA |
| 20 | 17,27 | 12,53 | 0,3 | 0,13 | 0,47 | 1,09E-02 |
| 21 | 33,78 | 30,47 | 0,56 | 0,53 | 0,59 | 2,20E-16 |
| 22 | 16,76 | 12,94 | NA | NA | NA | NA |
| 23 | 15,24 | 9,55 | 0,16 | 0,11 | 0,2 | 1,58E-05 |
| 24 | 13,56 | 10,16 | 0,44 | 0,41 | 0,47 | 2,27E-09 |
| 25 | 12,19 | 7,67 | 0,27 | 0,14 | 0,39 | 6,43E-03 |
| 26 | 10,67 | 7,38 | 0,22 | 0,11 | 0,33 | 7,84E-03 |
| 27 | 9,65 | 6,6 | 0,17 | 0,05 | 0,29 | 2,16E-02 |
| 28 | 23,88 | 21,63 | 0,41 | 0,37 | 0,45 | 2,20E-16 |
| 29 | 6,35 | 3,53 | NA | NA | NA | NA |
| 30 | 8,13 | 5,78 | 0,23 | 0,21 | 0,26 | 2,20E-16 |
| 31 | 13,72 | 9,3 | 0,31 | 0,21 | 0,4 | 2,25E-05 |
| 32 | 115,57 | 93,7 | 0,45 | 0,41 | 0,48 | 2,20E-16 |
| 33 | 14,99 | 13,08 | 0,48 | 0,34 | 0,61 | 4,08E-03 |
| 34 | 8,64 | 4,6 | 0,23 | 0,15 | 0,31 | 1,27E-03 |
| 35 | 6,35 | 4 | 0,47 | 0,44 | 0,5 | 2,20E-16 |

Obs: NA – não foi possível ajuste

A falta de confiança acerca do real valor de ρ levou a discordâncias com a realidade física. Medições diretas realizadas com câmera hemisférica na área experimental indicam que o dossel apresenta um valor ρ de 0,18. O método IS, todavia, produziu valores tão elevados quanto 0,67 e tão baixos, e não realísticos, como -0,02. A Figura 5.15, por seu turno, apresenta as imagens hemisféricas adquiridas em campo. Trata-se da imagem bruta, antes de promoção de ajuste para processamento.

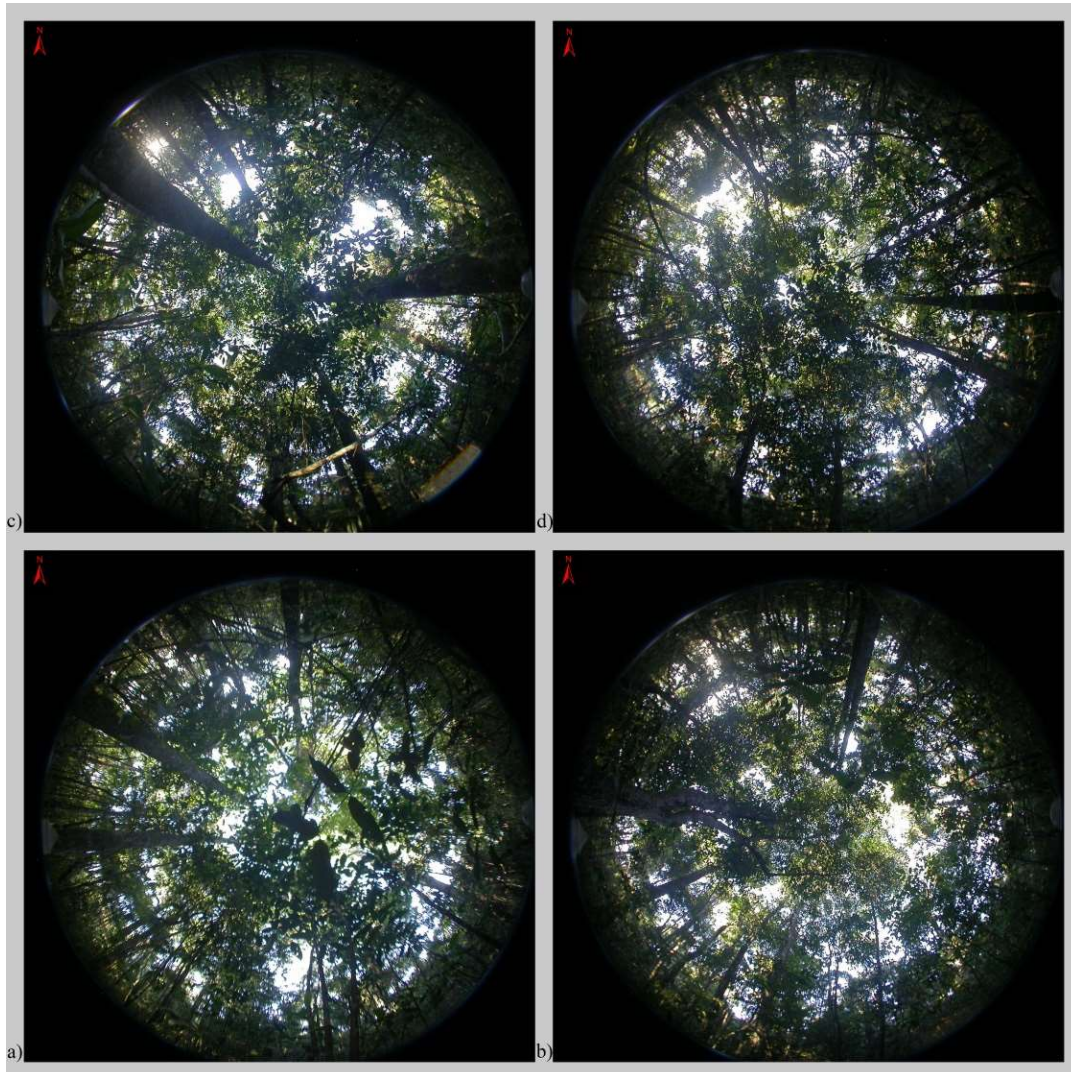


Figura 5.15 - Imagem hemisférica do dossel dos quadrantes área experimental, nos quadrantes 1 (a), 2 (b), 3 (c) e 4 (d).

Para superar essa limitação na estimativa do coeficiente de precipitação interna livre sugere-se outra abordagem, com otimização por PSO baseada nos dados de imagens hemisféricas do dossel, permitindo apenas um pequeno ajuste no valor medido de ρ e calibrando-se os parâmetros P'_g e E/R para cada evento.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados da parametrização do modelo de Gash pelos dois métodos descritos. De todos os eventos observados, o método IS foi capaz de estimar os parâmetros hidrológicos do dossel em 27 casos. O uso de imagem hemisférica e PSO, por sua vez, foi capaz de estimar esses parâmetros para 33 eventos.

No que diz respeito à aderência dos dados observados e modelados, ambos os métodos produziram resultados com bom ajuste. A maioria dos eventos modelados apresentou alto índice de Nash. Pode-se observar na Figura 5.16 que o método de parametrização baseado no PSO e na imagem hemisférica apresentou intervalo mais estreito e com valores mais elevados na mediana em comparação com o método IS.

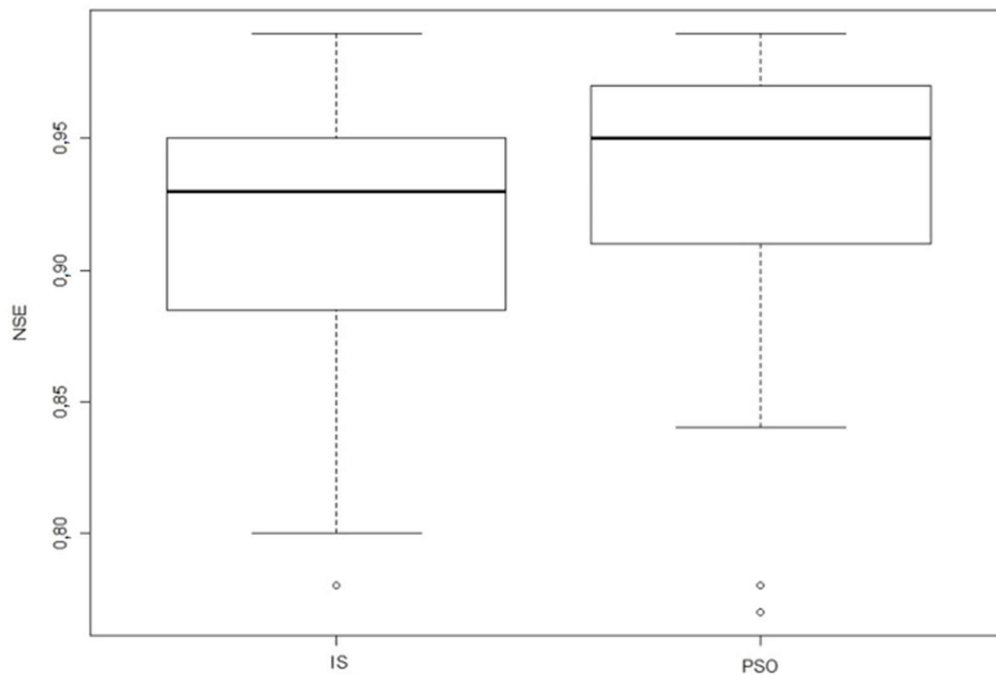


Figura 5.16 - Diagrama de caixa do índice de Nash modelados por meio de parametrização com os métodos IS e PSO + imagem hemisférica.

Embora o diagrama de caixa evidencie sobreposição do NSE para os diferentes métodos de parametrização, um teste T pareado apontou para uma pequena diferença na média de $-0,013$, estatisticamente significativa ($pval = 0,016$). Ainda assim, pode-se considerar como de pequena monta essa diferença, sugerindo que os métodos são equivalentes em termos da métrica de aderência adotada.

Tabela 5.7 - Resumo dos eventos de precipitação e dos parâmetros do modelo de Gash ajustados pelo método IS e PSO + imagem hemisférica.

| Dados observados | | | Modelo Gash (Parametrização pelo método IS) | | | | | Modelo Gash (Parâmetrização pelo método PSO) | | | | |
|------------------|----------------------|---------------------|--|-----------|-------------------------|-------|------|---|-----------|-------------------------|------|------|
| Evento | Precipitação (mm) | Throughfall (mm) | ρ | S (mm) | P' _G (mm) | E/R | Nash | ρ | S (mm) | P' _G (mm) | E/R | Nash |
| 1 | 24,38 | 16,28 | 0,21 | 2,72 | 3,23 | 0,26 | 0,92 | 0,16 | 2,46 | 2,93 | 0,25 | 0,93 |
| 2 | 27,94 | 18,94 | 0,25 | 1,16 | 1,45 | 0,29 | 0,95 | 0,18 | 1,47 | 1,79 | 0,27 | 0,98 |
| 3 | 13,21 | 8,7 | 0,12 | 2,48 | 2,74 | 0,19 | 0,9 | 0,16 | 2,4 | 2,86 | 0,16 | 0,88 |
| 4 | 12,45 | 5,54 | 0,08 | 1,52 | 1,61 | 0,49 | 0,8 | 0,16 | 1,37 | 1,63 | 0,48 | 0,78 |
| 5 | 16 | 13,58 | 0,5 | 2,25 | 3,53 | -0,03 | 0,97 | 0,2 | 2,39 | 2,97 | 0,01 | 0,98 |
| 6 | 10,16 | 7,78 | 0,35 | 2,35 | 3,39 | -0,01 | 0,95 | 0,2 | 2,41 | 3 | 0,05 | 0,97 |
| 7 | 24,13 | 21,4 | NA | NA | NA | NA | NA | 0,16 | 1,25 | 1,5 | 0,11 | 0,97 |
| 8 | 6,6 | 4,9 | 0,11 | 0,45 | 0,5 | 0,22 | 0,96 | 0,17 | 0,53 | 0,64 | 0,25 | 0,97 |
| 9 | 4,83 | 3,55 | 0,51 | 1,01 | 2,06 | 0,06 | 0,94 | 0,17 | 0,37 | 0,44 | 0,18 | 0,88 |
| 10 | 18,8 | 16,03 | 0,44 | 1,68 | 2,74 | 0,07 | 0,86 | 0,16 | 0,92 | 1,1 | 0,13 | 0,91 |
| 11 | 43,69 | 40,46 | NA | NA | NA | NA | NA | 0,18 | 0,63 | 0,76 | 0,01 | 0,96 |
| 12 | 4,32 | 1,82 | 0,36 | 0,97 | 1,39 | 0,52 | 0,94 | 0,19 | 0,85 | 1,05 | 0,55 | 0,96 |
| 13 | 21,59 | 18,16 | NA | NA | NA | NA | NA | 0,2 | 0,23 | 0,29 | 0,14 | 0,91 |
| 14 | 10,16 | 6,8 | 0,38 | 1,19 | 1,69 | 0,2 | 0,84 | 0,2 | 0,76 | 0,94 | 0,23 | 0,88 |
| 15 | 6,35 | 4,8 | NA | NA | NA | NA | NA | 0,18 | 0,06 | 0,08 | 0,26 | 0,98 |
| 16 | 16,26 | 11,8 | 0,22 | 0,8 | 0,94 | 0,24 | 0,92 | 0,16 | 0,85 | 1,01 | 0,2 | 0,92 |
| 17 | 19,3 | 17 | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA | NA |
| 18 | 4,57 | 2,6 | 0,46 | 1,45 | 2,78 | 0,22 | 0,88 | NA | NA | NA | NA | NA |
| 19 | 8,89 | 6,55 | NA | NA | NA | NA | NA | 0,16 | 1,31 | 1,56 | 0,11 | 0,95 |
| 20 | 17,27 | 12,53 | 0,3 | 2,43 | 3,32 | 0,16 | 0,99 | 0,19 | 2,42 | 2,98 | 0,16 | 0,99 |
| 21 | 33,78 | 30,47 | 0,56 | 2,33 | 5,14 | 0,04 | 0,94 | 0,16 | 2,28 | 2,72 | 0,04 | 0,92 |
| 22 | 16,76 | 12,94 | NA | NA | NA | NA | NA | 0,2 | 0,82 | 1,02 | 0,18 | 0,95 |
| 23 | 15,24 | 9,55 | 0,16 | 2,63 | 3 | 0,26 | 0,89 | 0,17 | 2,09 | 2,52 | 0,35 | 0,9 |
| 24 | 13,56 | 10,16 | 0,44 | 2,6 | 4,45 | 0,04 | 0,95 | 0,16 | 1,92 | 2,29 | 0,18 | 0,97 |
| 25 | 12,19 | 7,67 | 0,27 | 4,11 | 5,31 | 0,04 | 0,94 | 0,16 | 2,51 | 3 | 0,19 | 0,96 |
| 26 | 10,67 | 7,38 | 0,22 | 2,1 | 2,56 | 0,14 | 0,93 | 0,16 | 1,48 | 1,77 | 0,24 | 0,95 |
| 27 | 9,65 | 6,6 | 0,17 | 1,24 | 1,46 | 0,21 | 0,85 | 0,17 | 1,31 | 1,58 | 0,21 | 0,91 |
| 28 | 23,88 | 21,63 | 0,41 | 0,82 | 1,26 | 0,06 | 0,93 | 0,16 | 1,47 | 1,76 | 0,08 | 0,94 |
| 29 | 6,35 | 3,53 | NA | NA | NA | NA | NA | 0,16 | 0,38 | 0,46 | 0,42 | 0,77 |
| 30 | 8,13 | 5,78 | 0,23 | 1,66 | 1,95 | 0,06 | 0,81 | 0,19 | 1,41 | 1,73 | 0,11 | 0,84 |
| 31 | 13,72 | 9,3 | 0,31 | 1,52 | 2,1 | 0,21 | 0,78 | 0,17 | 1,07 | 1,29 | 0,27 | 0,84 |
| 32 | 115,57 | 93,7 | 0,45 | 1,79 | 3,02 | 0,17 | 0,98 | 0,2 | 1,48 | 1,84 | 0,18 | 0,98 |
| 33 | 14,99 | 13,08 | 0,48 | 1,98 | 3,36 | 0 | 0,89 | 0,18 | 1,24 | 1,5 | 0,09 | 0,91 |
| 34 | 8,64 | 4,6 | 0,23 | 1,52 | 1,87 | 0,36 | 0,93 | 0,16 | 1,28 | 1,53 | 0,41 | 0,97 |
| 35 | 6,35 | 4 | 0,47 | 1,82 | 3,61 | 0,2 | 0,99 | 0,2 | 1,92 | 2,39 | 0,21 | 0,98 |

Obs: NA – não foi possível ajuste

Os parâmetros do modelo de Gash encontram-se resumidos nos diagramas de caixa na Figura 5.17. Considerando o método de parametrização (IS x PSO + imagem hemisférica), observaram-se correlações estatisticamente significativas entre o coeficiente de precipitação interna livre (ρ) ($r = 0,35$; $pval = 0,03$) parametrizado pelos métodos IS e PSO. O mesmo foi observado para o armazenamento (S), a lâmina de saturação (P'_G), e a razão E/R com valores de r de $0,82$ ($pval = 0,03$); $0,73$ ($pval = 1,08 \times 10^{-5}$) e $0,93$ ($pval = 1,91 \times 10^{-12}$), respectivamente.

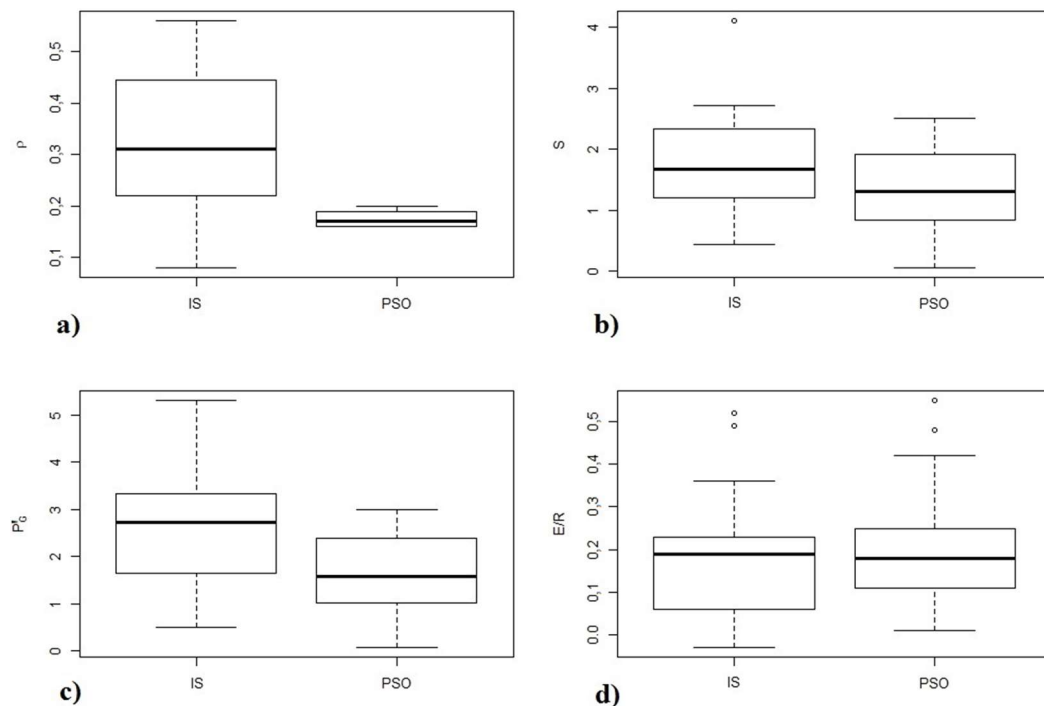


Figura 5.17 - Diagrama de caixa dos parâmetros do modelo de Gash. Resultados da parametrização pelos métodos IS e PSO + imagem hemisférica.

No que diz respeito à amplitude da distribuição de cada conjunto de parâmetros, um teste F para comparação da variância indicou uma redução significativa dessa estatística para ρ e P'_G quando o PSO + imagem hemisférica foi o método de parametrização adotado ($pval = 2,2 \times 10^{-16}$; e $pval = 0,04$). No que concerne ao armazenamento e à razão E/R, o teste estatístico não comprovou qualquer diferença nas variâncias, independentemente do método de parametrização.

Na parametrização com o método IS, a distribuição dos dados sugere um coeficiente de precipitação interna livre de $0,32$, com intervalo de confiança variando entre $0,26$ e

0,37. O intervalo de confiança para o armazenamento, por seu turno, variou entre 1,48mm e 2,1mm com média de 1,79mm. A medida central para a lâmina de saturação foi de 2,6mm, com intervalo de confiança de 2,13mm até 3,08mm. A mediana observada para a razão E/R foi de 0,19, com intervalo assimétrico de 0,14mm até 0,29mm.

Considerando o método PSO como método de parametrização, observou-se um coeficiente de precipitação interna livre médio de 0,17, com intervalo de confiança entre 0,16 e 0,18. É importante ressaltar que esse intervalo mais estreito foi propositalmente incluído durante o processo de calibração. Conforme já mencionado, permitiu-se ao algoritmo um pequeno ajuste ($\pm 10\%$) em torno do valor ρ medido em campo. O intervalo de confiança para o armazenamento abrangeu valores entre 1,11mm até 1,62mm, com média de 1,37mm. A lâmina de saturação apresentou média de 1,66mm, com intervalo de confiança entre 1,35mm e 1,97mm. Por fim, a taxa E/R foi de 0,2, com intervalo assimétrico entre 0,15 e 0,24.

Essa variabilidade na distribuição dos parâmetros que caracterizam a interceptação foi relatada em diferentes trabalhos. O mais precoce deles foi possivelmente o de Horton (1919), que, analisando dados experimentais de interceptação, concluiu pela variabilidade do armazenamento em função das condições de vento ou mesmo da energia de impacto da chuva sobre a própria superfície de armazenamento. Além das questões de variabilidade inter-evento, aspectos relacionados à sazonalidade e ao estágio de desenvolvimento da floresta devem ser considerados, conforme aponta Pypker *et al.* (2005).

Como já mencionado, a aderência entre os valores observados e calculados medidos pelo índice de Nash apresentou uma pequena vantagem quando o método PSO é utilizado. Todavia, utilizando-se novamente o teste t pareado para os pares de parâmetros ajustados pelos distintos métodos, foram observadas diferenças estatísticas bem mais acentuadas, conforme se observa na Tabela 5.8. Conclui-se a partir desse resultado que ambos os métodos de parametrização forneceram bons ajustes, todavia com conjuntos de parâmetros distintos.

Tabela 5.8 - Resumo estatístico do teste t pareado para diferenças nas médias dos parâmetros

| Método de parametrização IS x PSO | t-val | df | p-val | Diferença nas médias |
|--------------------------------------|--------|----|------------------------|----------------------|
| ρ | 5,412 | 25 | $1,29 \times 10^{-05}$ | 0,142 |
| S | 2,864 | 25 | $8,34 \times 10^{-03}$ | 0,249 |
| P'G | 4,269 | 25 | $2,48 \times 10^{-04}$ | 0,708 |
| E/R | -3,941 | 25 | $5,77 \times 10^{-04}$ | -0,040 |

Trabalhos anteriormente desenvolvidos no bioma Amazônico sugerem valores de ρ entre 0,03 e 0,13 (Germer *et al.* 2005 Cuartas *et al.* 2007; Lloyd *et al.* 1988), em um aceno para a menor contribuição desse processo na formação da precipitação interna quando comparado com a fitofisionomia florestal de cerrado estudada no presente trabalho ($\rho = 0,17$). Esses autores apontaram, ainda, para uma capacidade de armazenamento entre 0,74 mm e 1,05 mm. Nesse sentido, embora a mata de galeria do bioma Cerrado tenha apresentado uma maior abertura no dossel, sua capacidade de armazenamento por unidade de área ($S = 1,79$ mm) supera aquela reportada para florestas do bioma Amazônico. Pode-se atribuir esse fato à elevada razão E/R (0,2) observada na mata de galeria em condição de saturação do dossel, em comparação com do bioma Amazônico (entre 0,031 e 0,045). Em outras palavras, a maior evaporação observada no bioma Cerrado deve promover uma renovação na capacidade de armazenamento quando este se encontra próximo à saturação.

Utilizando-se os dados de precipitação e os parâmetros calibrados pelo método PSO, promoveu-se a simulação de cada evento com o modelo de Gash. A Figura 5.18 apresenta a série temporal de alguns eventos simulados. Ao longo do processo de simulação observou-se que uma discretização temporal mínima de 5 minutos, um passo de tempo bastante inferior ao passo diário da concepção original do modelo, já é suficiente para um bom ajuste dos dados. Demonstra-se, dessa forma, que a abordagem desenvolvida por Gash é capaz de ir além de uma representação do balanço de massa diário do fenômeno, mas possibilita simulação contínua do fenômeno de interceptação na escala de evento.

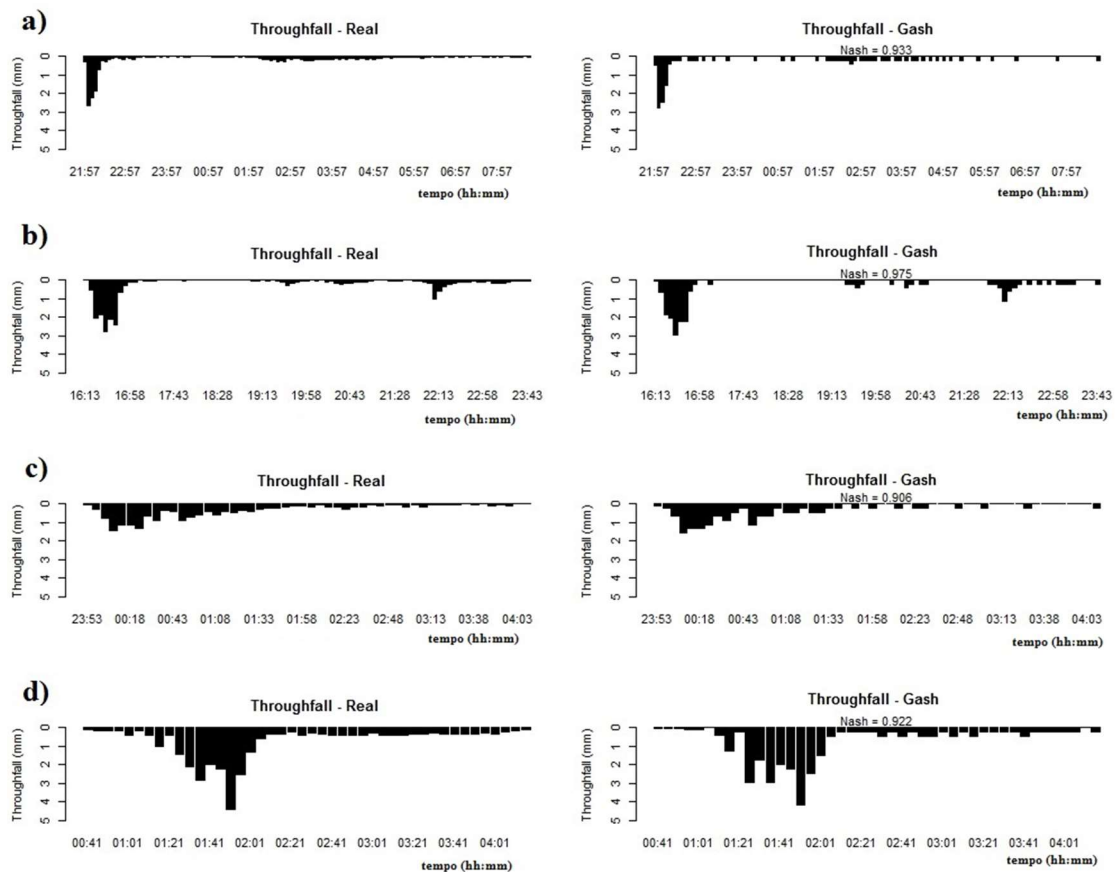


Figura 5.18 - Resultado da simulação de throughfall da parametrização baseada no PSO/imagem hemisférica. a) evento 1; b) evento 2; c) evento 10; e d) evento 21

O desempenho do modelo observada no presente trabalho é corroborado pelas observações de Pypker *et al.* (2005) ao ponderar que quando o modelo de Gash incorpora variações sazonais de ρ , S e E/R, os erros médios na modelagem da interceptação são reduzidos.

Os dados coletados indicam que, na mata de galeria do bioma Cerrado, 75,3% da precipitação atingem o solo na forma de precipitação interna livre enquanto 24,7% são perdidas por interceptação. A Figura 5.19 apresenta a série temporal da precipitação acumulada, throughfall acumulado e interceptação na base diária para o período observado.

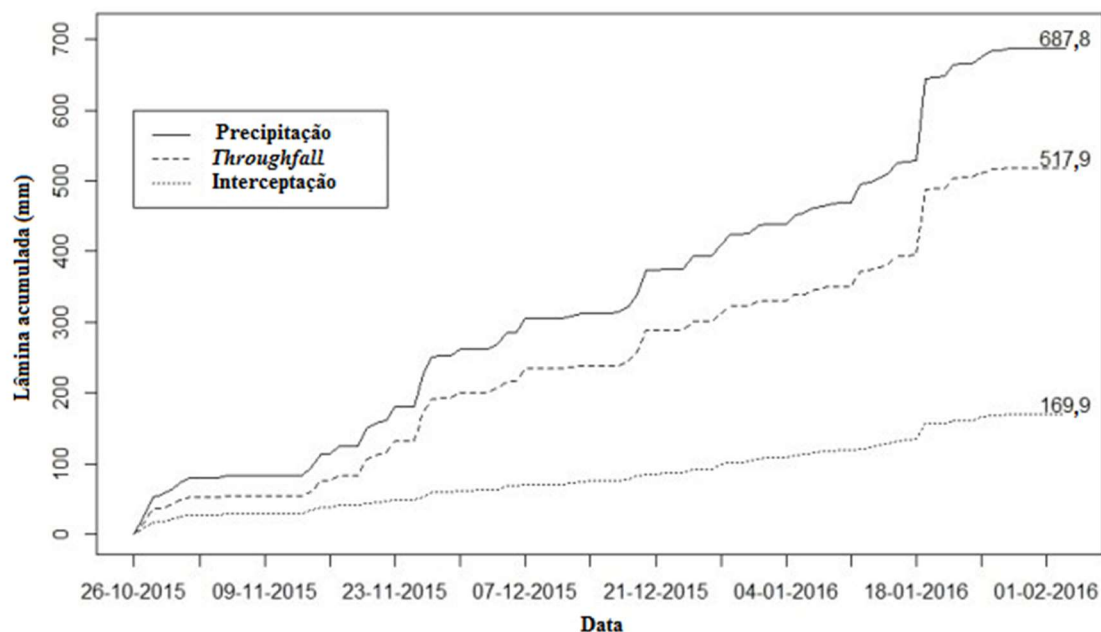


Figura 5.19 - Interceptação acumulada ao longo do período estudado

5.6- MONITORAMENTO DA VERTENTE

Os perfis de tomografia elétrica sequenciados produziram uma série temporal bidimensional da variação da resistividade ao longo da vertente. Após processamento dos dados brutos de resistividade elétrica, com a correção topográfica e interpolação dos dados, procedeu-se à determinação da variação no tempo da resistividade. Para isso, tomou-se o logaritmo da razão das imagens em relação ao estado do primeiro levantamento, ocorrido em 20/08/2015. A Figura 5.20 apresenta o resultado dessa divisão pixel a pixel. Convém destacar que nesse processo de divisão, valores negativos indicam redução da resistividade, enquanto valores superiores indicam elevação.

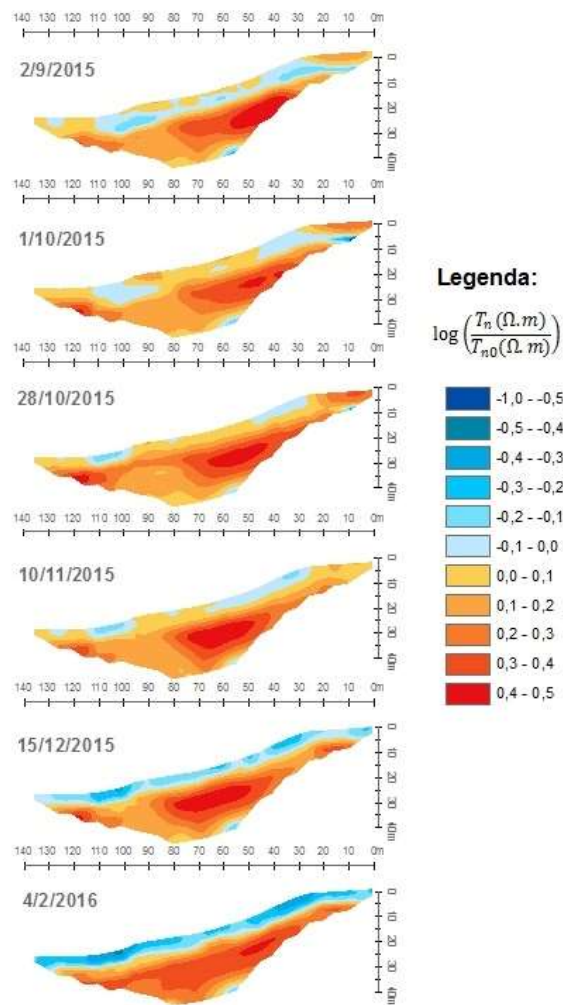


Figura 5.20 - Série temporal de tomografias elétricas da vertente

Observa-se a redução da resistividade no topo do perfil a partir do mês de novembro, em concordância com o início do período de chuvas da região de estudo. Demonstra-se dessa forma o potencial da técnica para estudos de processos hidrológicos. Ainda assim, autores como Schwartz *et al.* (2008) apontaram que não há uma relação tão clara entre a resistividade obtida pela técnica elétrica 2-D e a umidade do solo determinada por sondas TDR. Isso porque diferentes propriedades físicas e químicas do solo influenciam sua resistividade elétrica e não apenas o teor de umidade.

Em relação ao experimento das calhas coletoras, as primeiras investidas apontaram para problemas sanáveis na execução da instalação e outros problemas metodológicos de difícil contorno.

O primeiro tipo de problema observado tem relação com a contaminação da amostra em função da própria alteração física do local quando da instalação das calhas. A exposição de alguma quantidade de solo e o corte no terreno necessário para colocação do coletor são possíveis fontes de contaminação da amostra, conforme observa-se na Figura 5.21. Todavia, observou-se que com o tempo ocorre a estabilização do sistema.



Figura 5.21 - Contaminação do coletor por contribuição externa.

O segundo problema identificado tem relação com aspectos metodológicos da pesquisa. Isso porque se observou ser muito baixa a contribuição em termos de sólidos carreados advindos da porção do cerrado. Nesse sentido, há uma inerente dificuldade de medição da atenuação promovida pela formação florestal, uma vez que não existe um aporte significativo a ser atenuado. A Figura 5.22 apresenta os primeiros resultados do sedimento transportado e depositado nas calhas coletoras.

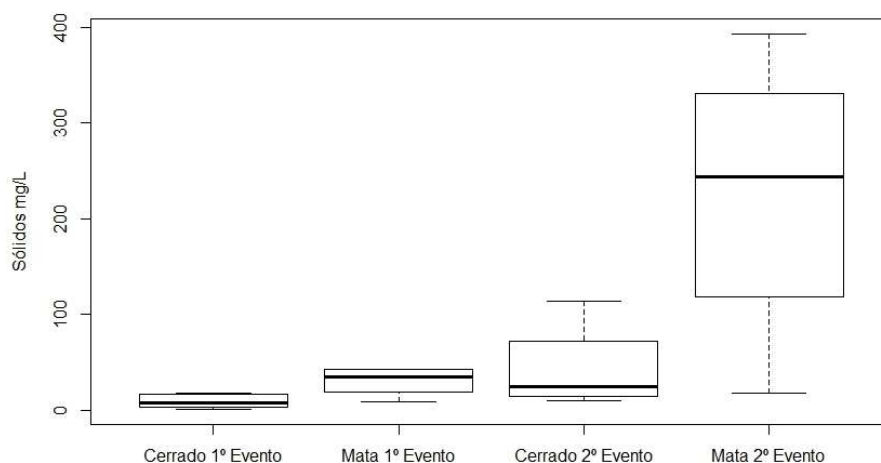


Figura 5.22 - Resultado das primeiras amostras das calhas coletoras

As maiores concentrações de sólidos na mata em comparação com o cerrado têm mais relação com a contaminação por contribuições externas da calha do que com os processos naturais de perda de solo e geração de sedimentos.

5.7- MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA

5.7.1- Caracterização das Unidades de Resposta Hidrológicas

No processo de geração das HRUs pelo modelo SWAT as informações cartográficas foram compiladas em um Sistema de Informações Geográficas para posterior processamento. O produto desse processamento inicial para preparação do modelo hidrossedimentológico encontra-se na Figura 5.23.

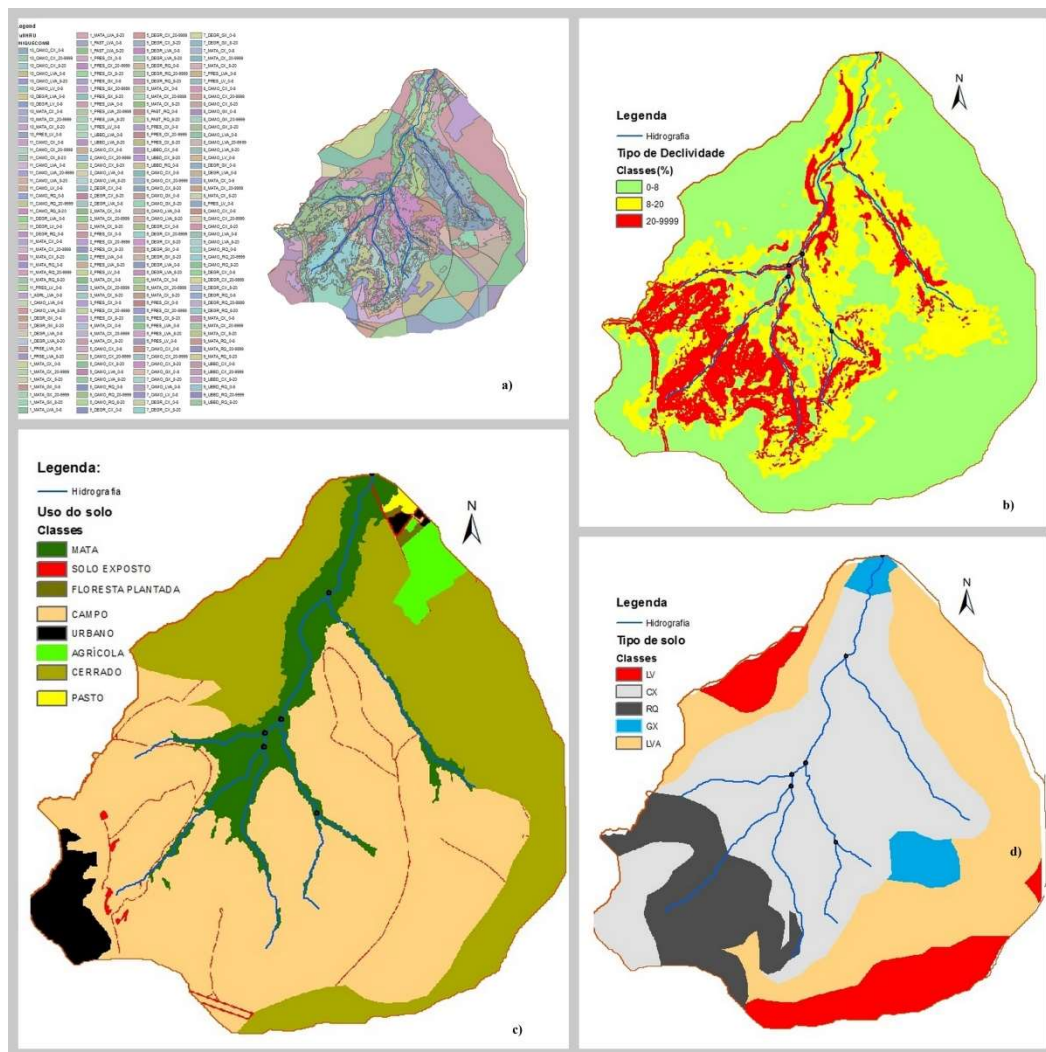


Figura 5.23 - Camadas de entrada do modelo SWAT. a) Mapa de tipos de uso; b) Mapa de solos; c) Mapa de declividades; e d) Unidades de Respostas Hidrológicas.

Em termos de caracterização do uso e ocupação do solo da bacia experimental, o produto da classificação da imagem orbital (Figura 5.23) confirma o padrão de proteção ambiental da área. O campo é a fitofisionomia predominante na bacia estudada, compreendendo 53% da área total da bacia; em segundo lugar tem-se o cerrado sentido restrito com 31%. Acrescentando a área ocupada por mata de galeria, com 9,6% do total, aproxima-se de um percentual de 93,6% de área com vegetação original. Compete ao restante da ocupação da bacia aos usos agrícolas, de floresta plantada, urbano de baixa densidade, pasto e solo exposto.

Em relação ao tipo de solo o Cambissolo ocorre em 42,15% da bacia, seguido pelo Latossolo Vermelho-Amarelo, com 31,38%, Neossolo Quartzarênico, com 13,11%, Latossolo Vermelho, com 10,07%, e pelo Gleissolo, com 3,3%.

As declividades mais acentuadas estão associadas às cabeceiras de drenagem e à porção do terreno dissecada ao longo dos cursos d'água. Todavia, há predominância de terras com declividade variando entre 0 – 8 %.

Esse conjunto resulta em 197 HRUs, que, somadas as áreas dessas unidades equivalentes em termos de declividade, uso de solo e tipo de solo, resultam em 60 classes, conforme indicado na Figura 5.24.

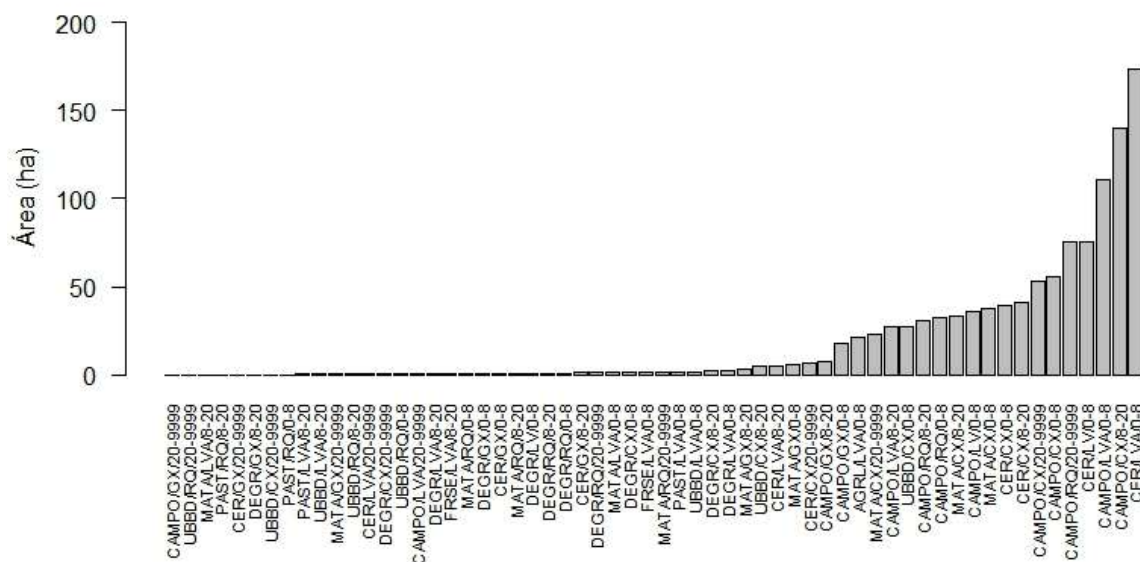


Figura 5.24 - Resumo das HRUs equivalentes da Bacia Experimental Córrego Capetinga.

Observa-se um grande número de HRUs (45%) com área inferior a 1,0 ha. Isso indica, para trabalhos futuros, possibilidade de simplificação do modelo com ganho computacional sem perda de representatividade dos processos hidrológicos. A HRU com maior área somada é formada pela combinação de cerrado sobre Latossolo Vermelho Amarelo, com declividade entre 0 – 8%.

5.7.2- Calibração do modelo

Inicialmente procedeu-se à simulação hidrológica utilizando-se a base dados de Ferrigo (2014) para parametrização do modelo SWAT (Figura 5.25). Observa-se a necessidade de algum esforço de calibração para melhor ajustar os resultados da modelagem. Em especial, percebe-se pouca aderência do modelo ao ramo descendente da curva de recessão.

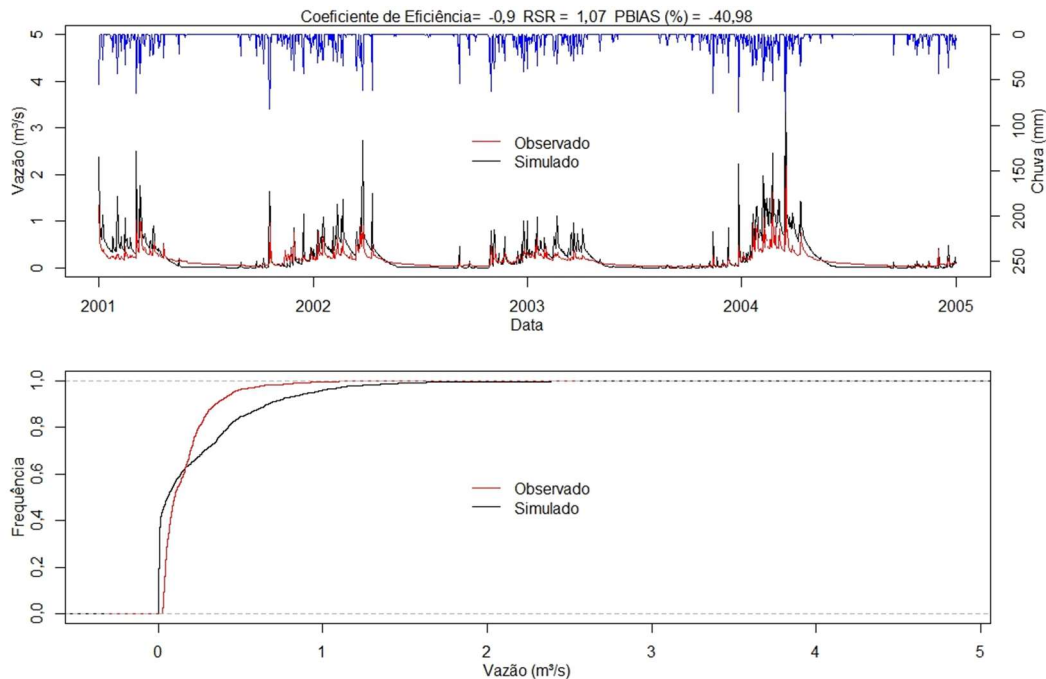


Figura 5.25 - Resultado da simulação com parametrização de Ferrigo (2014). a) hidrogramas; e b) curva de permanência das vazões.

Procedeu-se com a análise de sensibilidade seguindo os critérios de van Griensven *et al.* (2006), que empregaram a geração de parâmetros pelo método Hipercubo latino seguida por variação dos parâmetros um fator por vez (LH_OAT). A análise em questão busca reduzir a dimensão do problema a ser otimizado, bem como restringir o intervalo de busca dos parâmetros previamente selecionados.

Uma análise gráfica exploratória do comportamento da função objetivo (Nash) com individualização dos parâmetros encontra-se na Figura 5.26. O exame dos gráficos permite concluir que o efeito individual no parâmetro CN é fortemente associado ao valor da função objetivo, enquanto os demais parâmetros contribuem secundariamente. Isso não significa, contudo, que a função objetivo é insensível aos demais parâmetros.

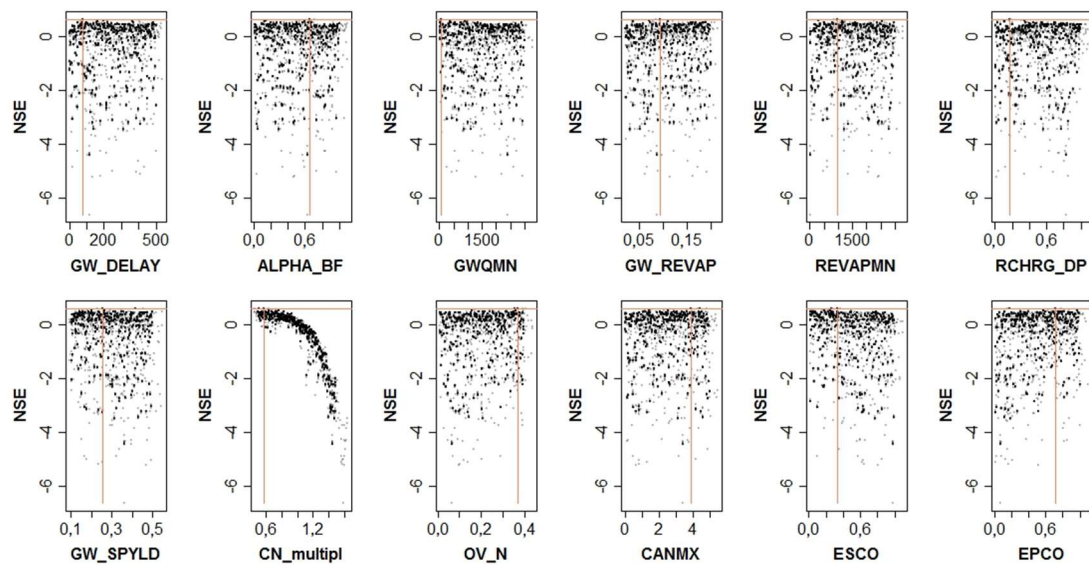


Figura 5.26 - Resultado da amostragem por hipercubo latino: efeito individualizado da função objetivo em resposta às alterações dos parâmetros.

O método proposto por van Griensven *et al.* (2006) adota uma amostragem computacionalmente eficiente, e que ao mesmo tempo é capaz de explorar o domínio do problema em análise para, ao final, computar a sensibilidade média de cada parâmetro ao longo do domínio da função. Dessa forma, embora a análise gráfica acene para um domínio do CN em relação aos demais parâmetros, localmente a sensibilidade de alguns parâmetros eleva sua importância relativa. Isso pode ser constatado com o *ranking* final da análise de sensibilidade, conforme observado na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Ranking de sensibilidade dos parâmetros do modelo para geração de escoamento

| Ranking | Parâmetro | Importância relativa |
|---------|------------|----------------------|
| 1 | CN_multipl | 0,5455 |
| 2 | ESCO | 0,3447 |
| 3 | EPCO | 0,0482 |
| 4 | RCHRG_DP | 0,0457 |
| 5 | GWQMN | 0,0051 |
| 6 | OV_N | 0,0036 |
| 7 | GW_DELAY | 0,0026 |
| 8 | CANMX | 0,0023 |
| 9 | GW_REVAP | 0,0014 |
| 10 | REVAPMN | 0,0007 |
| 11 | ALPHA_BF | 0,0001 |
| 12 | GW_SPYLD | 0,0000 |

Por fim, uma exploração do domínio da função considerando interações entre o CN e os demais parâmetros resultou na escolha do intervalo de busca dos parâmetros para a etapa de calibração do modelo. A Figura 5.27 apresenta as isolinhas do índice de Nash em função do domínio explorado para o CN e demais parâmetros calibrados.

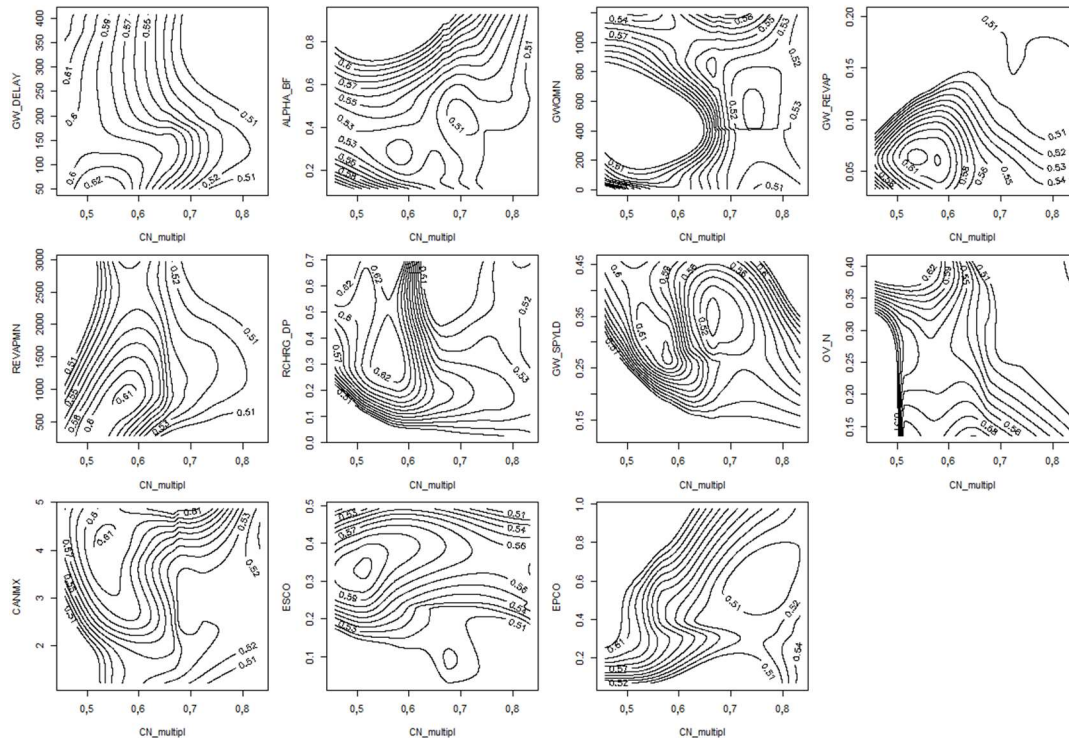


Figura 5.27 - Regiões ótimas dos parâmetros do modelo SWAT.

O processo de calibração, utilizando-se do algoritmo PSO, contou com 10 partículas e 1.000 iterações para cada partícula, objetivando a maximização do Índice de Eficiência - NSE. Para tanto houve um esforço computacional (10 x 1.000 iterações) que totalizou 9,01 dias de processamento, apontando para a necessidade de paralelização do processo de calibração com modelos mais complexos, a exemplo do modelo SWAT.

Observa-se na Figura 5.28 o resultado da calibração do modelo. O índice ótimo de eficiência de Nash encontrado pelo algoritmo ficou em 0.64 com um viés de -1,79%. Moriasi *et al.* (2007) recomendam algumas estatísticas para avaliação do desempenho de simulações hidrológica. Para os autores, uma calibração satisfatória apresenta índice de Nash maior que 0,5 e PBIAS entre $\pm 25\%$, considerando simulações com base mensal.

Embora a presente simulação se dê em passos diários, a adoção dos critérios de Moriasi *et al.* (2007) dão um aspecto mais conservador ao processo de calibração, visto que,

segundo os autores, modelos mensais costumam apresentar melhor aderência em comparação com modelos de base diária.

A despeito da utilização de uma única estatística no processo de calibração (NSE), o indicador (PBIAS) apresentou-se dentro do critério de ajuste de Moriasi *et al.* (2007).

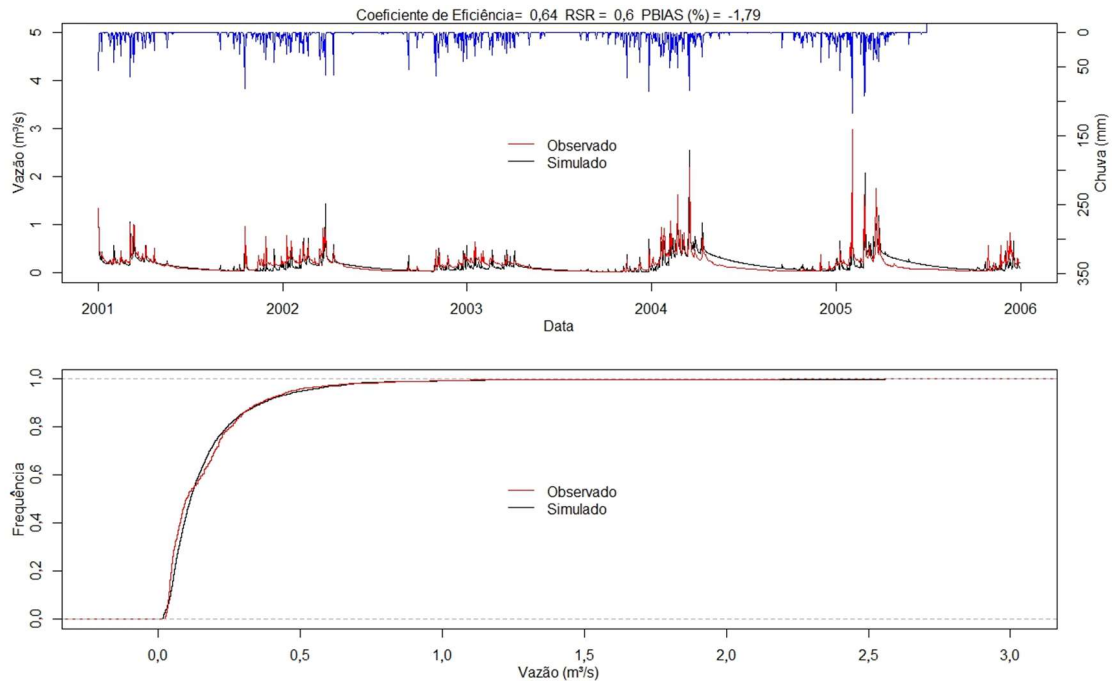


Figura 5.28 - Resultado da calibração de vazão utilizando o método PSO.

No total, 12 parâmetros relativos aos processos hidrológicos foram submetidos ao método PSO. O vetor ótimo sugerido pela otimização encontra-se resumido na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Parâmetros ótimos para o modelo SWAT

| Parâmetro | Valor ótimo | Processo hidrológico |
|------------|-------------|---|
| GW_DELAY | 5 | Tempo de atraso na recarga do aquífero (dias) |
| ALPHA_BF | 0,2 | Constante de recessão do escoamento de base (dias) |
| GWQMN | 460 | Limite do nível de água no aquífero raso para que ocorra contribuição do aquífero para o canal (mm) |
| GW_REVAP | 0,05 | Coefficiente de redistribuição da água subterrânea/solo |
| REVAPMN | 756 | Limite do nível de água no aquífero raso para que ocorra evapotranspiração a partir do aquífero raso (mm) |
| RCHRG_DP | 0,2 | Fração de percolação para o aquífero profundo |
| CN_multipl | 0,1 | Fator multiplicador do valor de CN |
| OV_N | 0,45 | Coefficiente de Manning para o escoamento superficial |
| CANMX | 4,9 | Capacidade máxima de armazenamento do dossel (mm) |
| ESCO | 0,25 | Fator de compensação da evaporação do solo |
| EPCO | 1 | Fator de compensação da evaporação da planta |

A série utilizada para verificação do modelo apresentou piora no desempenho global. Na verificação o modelo apresentou uma subestimativa nas vazões e métricas de aderência abaixo do recomendado por Moriasi *et al.* (2007). Em especial, observam-se deslocamentos no ramo de recessão ao fim de cada período chuvoso. A etapa de verificação foi marcada por superestimativas mais acentuadas para vazões até $0,5\text{m}^3/\text{s}$, com diminuição dessa tendência em vazões mais elevadas.

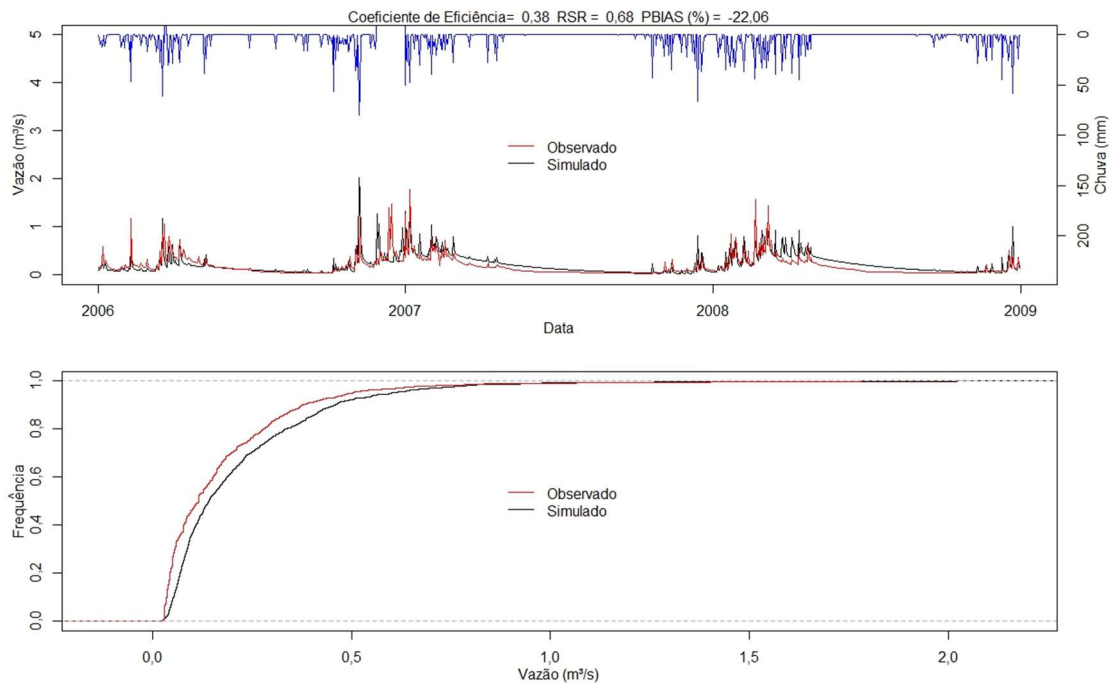


Figura 5.29 - Verificação do modelo pós-calibração.

Do total de 1.000 iterações processadas pelo método PSO, 491 apresentaram um conjunto de parâmetros que resultaram em um índice de eficiência superior a 0,5. Isso apenas reforça o conceito de equifinalidade introduzido por Beven (1993), em que uma solução aceitável pode ser alcançada de diferentes maneiras, seja por diferentes estruturas do modelo ou mesmo diferentes conjuntos de parâmetros. Isso não significa, segundo o autor, que cada simulação seja aceitável como uma simulação do sistema, mas apenas que as previsões dos diferentes conjuntos de parâmetros são equivalentes. Esse efeito pode ser observado na Figura 5.30, que exhibe o histograma dos parâmetros cuja função objetivo superou o valor de 0,5.

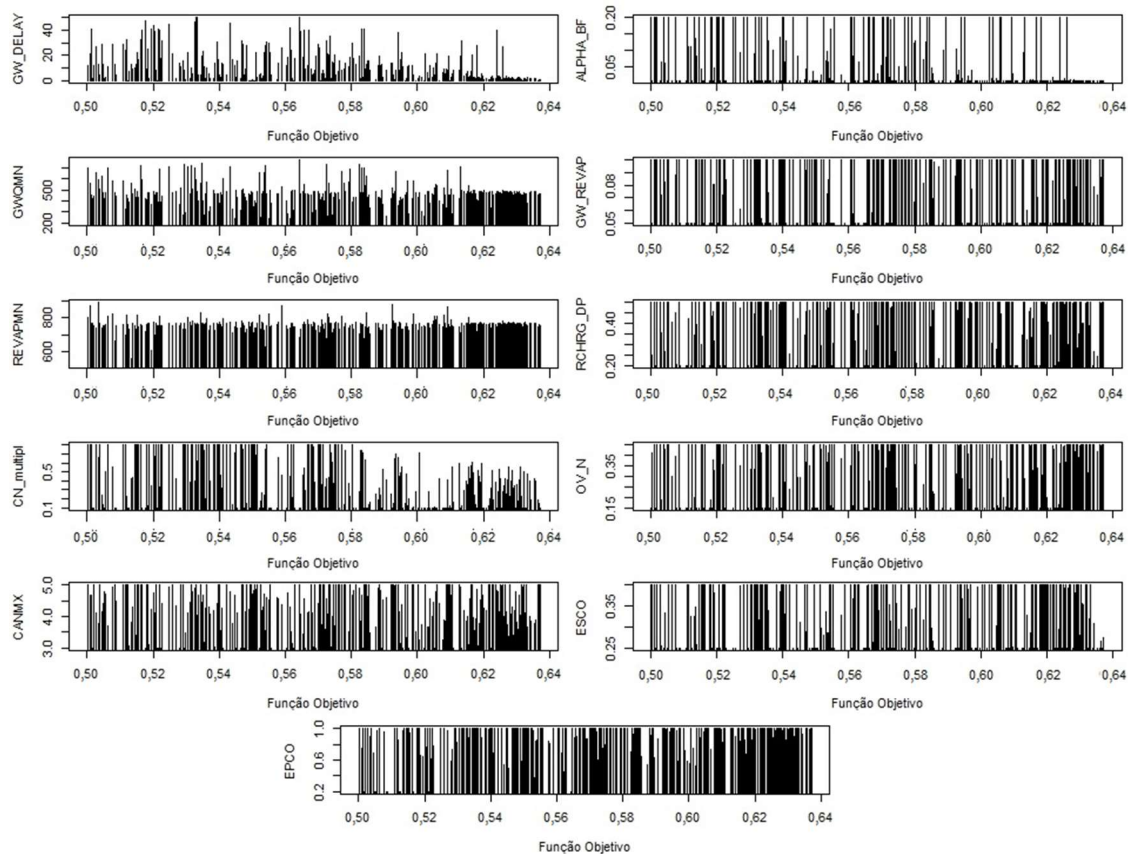


Figura 5.30 - Gráfico de barras da distribuição dos parâmetros ótimos ($NSE > 0,5$)

No que diz respeito aos sedimentos, o esforço de calibração foi inicialmente concentrado nos parâmetros eminentemente relacionados às propriedades físicas do solo e de transporte dos sedimentos. Todavia, percebeu-se baixo desempenho na reprodução do fenômeno.

Autores como White & Chaubey (2005) e Me *et al.* (2015), ao promoverem análise de sensibilidade na geração de sedimentos pelo modelo SWAT, atribuíram importância a parâmetros exclusivamente hidrológicos, como o CNOP, que atualiza o valor de CN para os distintos estágios de crescimento de plantações, e o ESCO, relacionado à evaporação.

É importante ressaltar que esses autores não incluíram deliberadamente tais parâmetros na calibração da resposta de sedimentos, mas sim em uma otimização multicritério, com múltiplas funções objetivo (vazão, sedimentos, nutrientes). Ainda assim, esses resultados convidam a uma reflexão.

Em uma primeira análise a calibração de parâmetros exclusivamente hidrológicos para ajuste de modelo de sedimentos não parece acertada. Todavia, a geração de sedimentos no modelo SWAT se dá em função da capacidade de erosão do escoamento superficial, e não da chuva, como na formulação original da equação universal de perda de solos. Nesses termos, pequenos ajustes em parâmetros relacionados com a geração de escoamento podem contribuir para a correta representação do fenômeno de geração e transporte dos sedimentos na bacia.

Ainda mais acertada seria a inclusão dessa prática em um algoritmo de calibração multi-objetivo para que o modelo de fluxo não se afastasse da realizada hidrológica. No presente trabalho, optou-se pela calibração dos parâmetros AdJ_PKR, PRF_BSN, SPCOND, SPEXP, K_erosion, CN2 e OV_N. No caso do CN2, assim como do OV_N, as alterações consistiram apenas nas HRUs que representam a estrada, como principal fonte de geração de sedimentos. Espera-se dessa forma que a coerência do modelo hidrológico calibrado seja mantida, uma vez que essas HRUs representam apenas 0,13% da área total da bacia, sendo pouco significativas em termos de volume do escoamento, mas bastante significativas em termos de produção de sedimentos.

A análise de sensibilidade do modelo SWAT para geração de sedimentos apontou forte influência no valor do CN das HRUs representativas da estrada não pavimentada, conforme observa-se no *ranking* de sensibilidade apresentado na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - *Ranking* de sensibilidade dos parâmetros do modelo para geração de sedimentos.

| Ranking | Parâmetro | Importância relativa |
|---------|-----------|----------------------|
| 1 | CN2* | 0,81 |
| 2 | OV_N* | 0,09 |
| 3 | USLE_K* | 0,07 |
| 4 | ADJ_PKR | 0,01 |
| 5 | SPEXP | 0,004 |
| 6 | PRF_BSN | 0,0007 |
| 12 | SPCON | 0,0003 |

*relativo apenas às HRUs representativas da estrada

Observa-se outro elemento relacionado à geração do escoamento (OV_N) figurando como segundo parâmetro mais sensível, seguido, em terceiro lugar, pela erodibilidade

do solo (USLE_K), esse último exclusivamente associado ao processo de geração de sedimentos.

Essa dependência de parâmetros de escoamento no modelo SWAT apresenta respaldo no equacionamento utilizado na MUSLE, que, diferentemente da USLE, se utiliza da vazão escoada superficialmente e do pico de escoamento para o cômputo da geração de sedimento, simplificada apresentada na equação:

$$Sed = 11,8(Q_{sup}q_{max}A_{hru})^{0,56} * K_{USLE}LS_{USLE} \quad (12)$$

onde: Sed – produção de sedimento (ton); Q_{sup} – escoamento (mm/ha); q_{max} – índice máximo de escoamento (m^3s^{-1}); A_{hru} – área (ha); K_{USLE} – fator K da USLE ($0,013 \text{ ton}\cdot m^2\text{hrm}^{-3}\text{ton}^{-1}\text{cm}^{-1}$); e LS_{USLE} – fator topográfico (m).

A baixa sensibilidade do modelo aos parâmetros relacionados com a rotina de transporte de sedimentos no canal se deve, possivelmente, ao tempo de concentração da bacia ser inferior ao passo de tempo diário da simulação. Em simulações sub-diárias é possível que esses elementos se tornem mais sensíveis.

O algoritmo de calibração foi eficiente em otimizar o índice de Nash utilizado como função objetivo. Embora a estatística PBIAS tenha indicado baixo viés no modelo, observa-se tendência de superestimar as concentrações até 25mg/L, subestimar concentrações na faixa dos 25mg/L até 75mg/L, tendo apresentado boa concordância para eventos com concentrações de sedimentos superiores à 75mg/L, conforme se observa na distribuição de frequências acumuladas da Figura 5.31. Ao que se percebe, ao se utilizar o índice de Nash como função objetivo, houve priorização na representação do evento de maior monta ocorrido no fim do mês de janeiro de 2016.

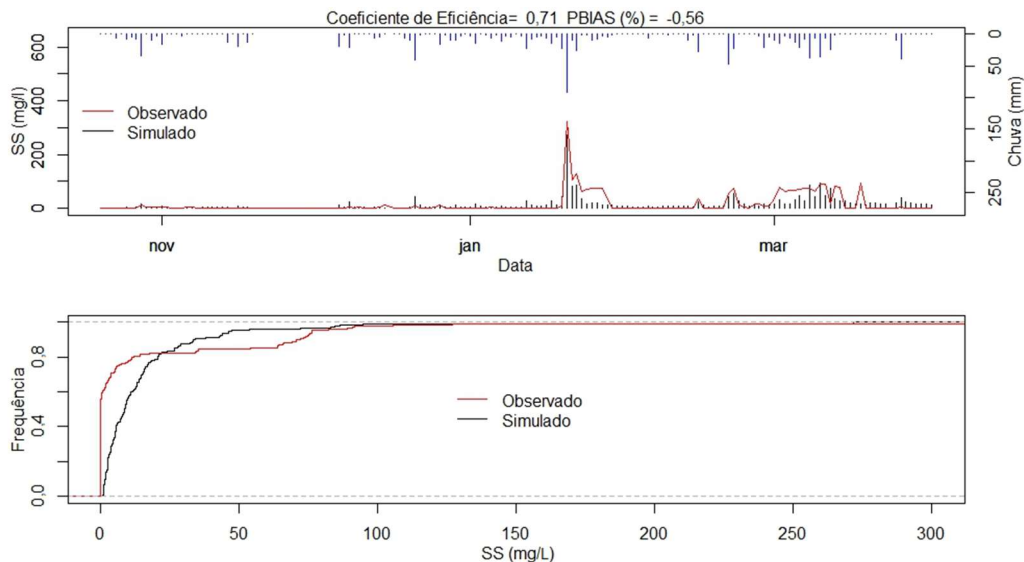


Figura 5.31 - Resultado da calibração de sedimentos utilizando PSO.

Outra possível fonte de erro pode estar relacionada com a série observada. Em especial, observa-se, no início do mês de março, valores persistentes e elevados de sólidos em suspensão ao longo de vários dias, o que não condiz com a resposta rápida da bacia em termos hidrossedimentológicos. Ao longo dos trabalhos de campo constatou-se a necessidade de um esforço maior de limpeza da sonda multiparamétrica. A adoção de sondas autolimpantes possivelmente contornaria o problema da qualidade de dados observados.

O conjunto de valores ótimos encontra-se na Tabela 5.12. Houve redução do valor de CN e do coeficiente Manning nas HRUs representativas da estrada não pavimentada. Essa redução, compelida pelo algoritmo de calibração, favorece o aumento no volume e velocidade do escoamento gerado nessas HRUs e, conseqüentemente, na produção de sedimentos pela MUSLE.

Tabela 5.12 - Parâmetros ótimos para o modelo de sedimentos

| Parâmetro | Valor ótimo | Processo hidrológico/sedimentológico |
|-----------|-------------|--|
| CN2* | 67,13 | Valor de CN na geração de escoamento superficial |
| OV_N* | 0,014 | Coeficiente de Manning para o escoamento superficial Fator de Erodibilidade do solo |
| USLE_K* | 0,63 | 0,013(toneladas métricas m ² hr) / (m ³ toneladas métricas cm) |
| ADJ_PKR | 2,06 | Fator de ajuste do pico de sedimento na sub-bacia |
| SPEXP | 2,94 | Parâmetro relativo à capacidade máxima de transporte de sedimento no canal |
| PRF_BSN | 0,80 | Fator de ajuste do pico de sedimento no canal principal |
| SPCON | 0,0001 | Parâmetro relativo à capacidade máxima de transporte de sedimento no canal |

*relativo apenas às HRUs representativas da estrada

A erodibilidade do solo (USLE_K) obtida a após calibração apresentou-se bastante elevada quando comparada com valores usuais observados na base de dados do Departamento de Agricultura Norte-Americano – USDA. Essa base de dados, denominada Statsgo, acompanha o modelo SWAT e serve para sua parametrização em simulações realizadas naqueles tipos de solos. A Figura 5.32 apresenta o diagrama de caixa composto por 3.716 amostras de solos que acompanham a base de dados do modelo SWAT.

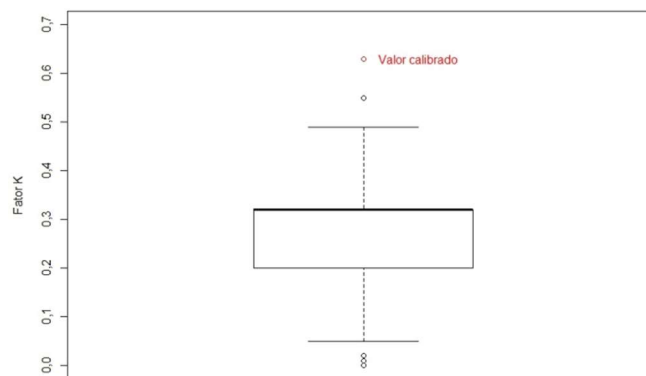


Figura 5.32 - Comparativo entre os valores K da base Statsgo com o valor K calibrado.

Observa-se que o valor calibrado supera o máximo de 0,55 observado na base de dados que acompanha o modelo SWAT. Ainda assim, Wischmeier & Smith (1978), referência utilizada pelo modelo SWAT para parametrização do fator USLE_K, reportam valores máximos de 0,69 experimentalmente determinados para a erodibilidade do solo.

5.7.3- Simulação de cenários de proteção

Aa simulações dos cenários incrementais de APP apresentaram comportamento distinto de atenuação em termos de concentração máxima diária de sólidos suspensos em relação às concentrações médias diárias no período simulado. Diferentemente da tradicional Equação Universal de Perda de Solo – USLE, o modelo SWAT emprega uma modificação que considera a perda de solo pela geração de escoamento superficial e não apenas por erosividade da chuva. Enquanto a atenuação da concentração média se deu a partir de faixas de 5m de APP, observou-se que, para eventos de maior monta, o efeito

do tamponamento só se faz perceptível com maiores faixas (a partir de 25 m), conforme se deprende das Figuras 5.33 e 5.34.

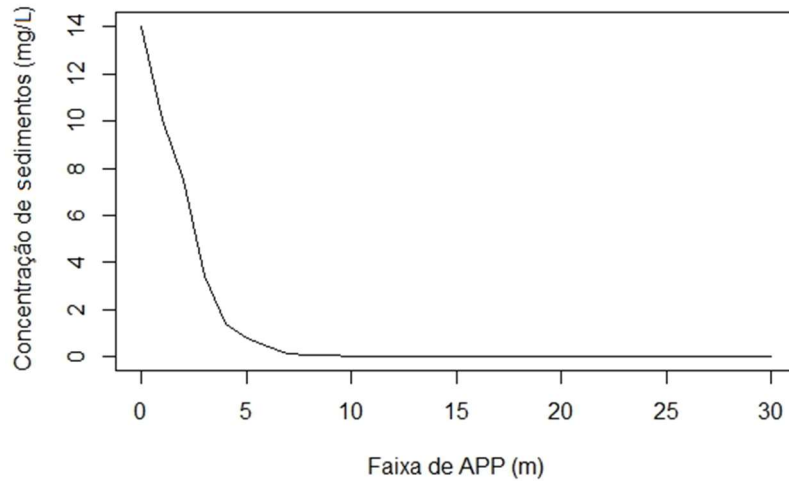


Figura 5.33 - Efeito marginal do incremento da APP sobre a concentração média de sólidos em suspensão ao longo do período simulado.

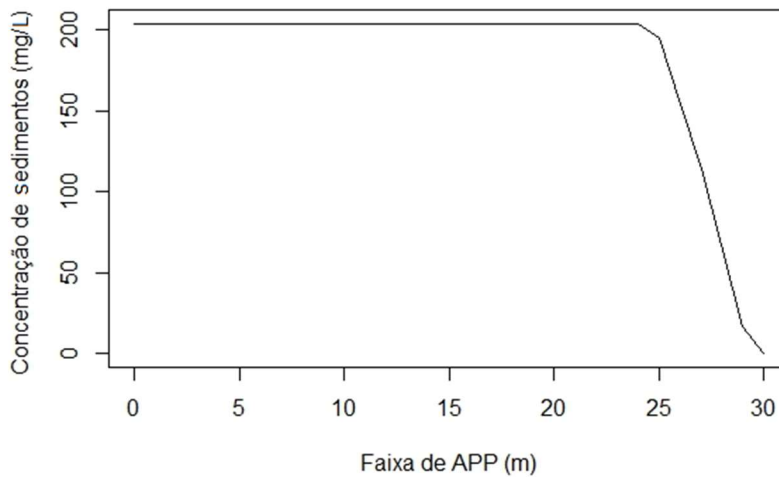


Figura 5.34 - Efeito marginal do incremento da APP sobre a concentração máxima de sólidos em suspensão ao longo do período simulado.

Em ambos os casos, a formulação empregada pelo modelo SWAT impede uma avaliação de efeitos com faixas superiores aos 30 metros legalmente estabelecidos. Isso porque a função de atenuação apresenta máxima remoção (100%) quando a largura atinge esse limiar. Ainda assim, os resultados acenam para a necessidade de maiores faixas de

proteção para atenuação de eventos de maior intensidade. São esses os eventos responsáveis pela maior parte do transporte de sedimentos em bacias.

Nesse sentido, uma análise do ponto de vista das descargas sólidas apresenta um cenário distinto em relação às Figuras 5.33 e 5.34. Essa análise pode ser observada na Figura 5.35, que apresenta a atenuação das descargas sólidas em função do incremento da área de preservação permanente.

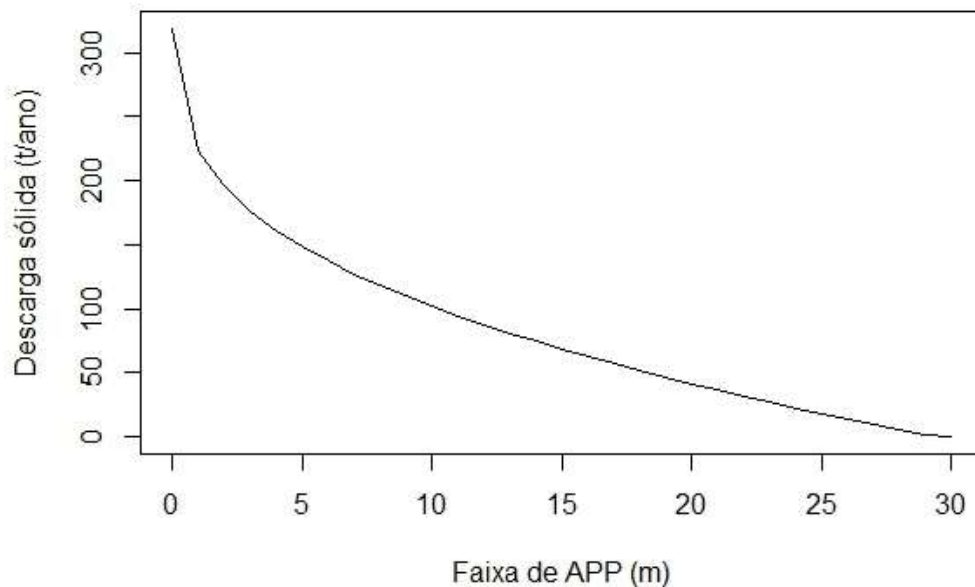


Figura 5.35 - Atenuação das descargas sólidas com incremento da proteção.

A máxima descarga sólida anual, atribuída ao cenário sem proteção, foi de 319 t/ano. Para uma atenuação de 50% desse valor seria suficiente a manutenção de 6 metros de floresta ripária. Todavia, diferentemente do comportamento observado para as concentrações de sólidos em suspensão, para se atingir índices de atenuação da descarga próximos de 90% seriam necessárias faixas mais largas, superiores a 23m.

A Figura 5.36 apresenta o resultado de algumas simulações dos cenários de proteção ripária. As concentrações médias diárias são representadas para o período simulado. Observa-se uma persistência do pico de sólidos em suspensão para eventos mais extremos como, por exemplo, o evento ocorrido no início de 2005. As simulações revelaram que, para esse evento em particular, a atenuação dos efeitos do excedente carregado só seria percebida com faixas de proteção superiores a 25 metros.

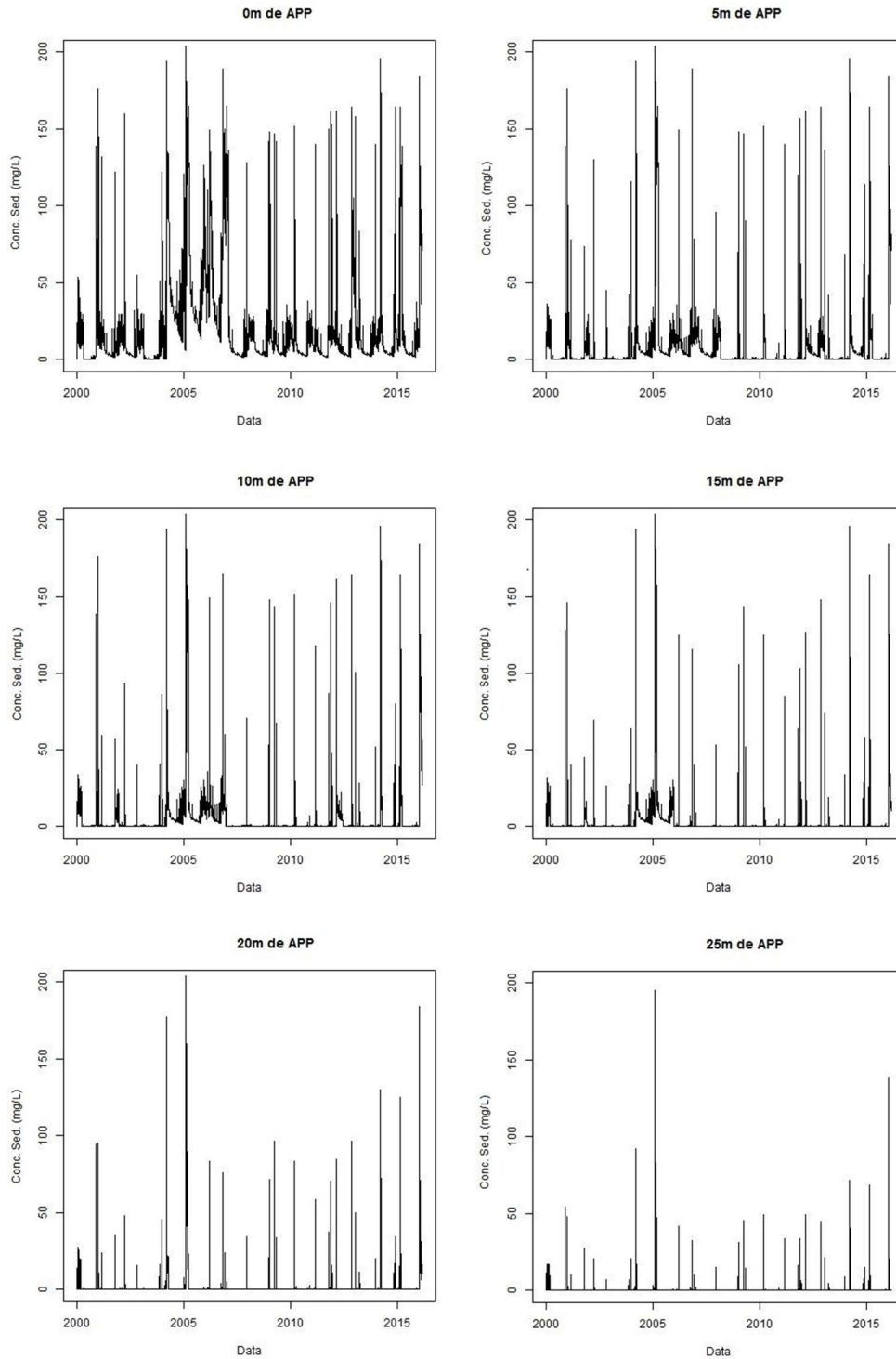


Figura 5.36 - Resultado das simulações de alguns cenários de proteção justafluvial.

Para uma avaliação em termos de tratamento de águas para fins de abastecimento, tomou-se por empréstimo o limiar de 40 NTU adotado pela Resolução Conama 357/05, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de

lançamento de efluentes. Esse é o limite superior para o enquadramento das águas doces como classe 1, caso em que o tratamento simplificado é suficiente para aquela finalidade.

Observa-se na Figura 5.37 que larguras de proteção justafluvial de 5 metros são suficientes para elevar a frequência de aplicação de tratamento simplificado de aproximadamente 70% para mais de 90% dos dias simulados em comparação com o cenário sem APP. Aplicando-se 15 metros de proteção justafluvial atingem-se frequências próximas a 95% do tempo em que a aplicação de técnicas de coagulação e floculação é dispensadas.

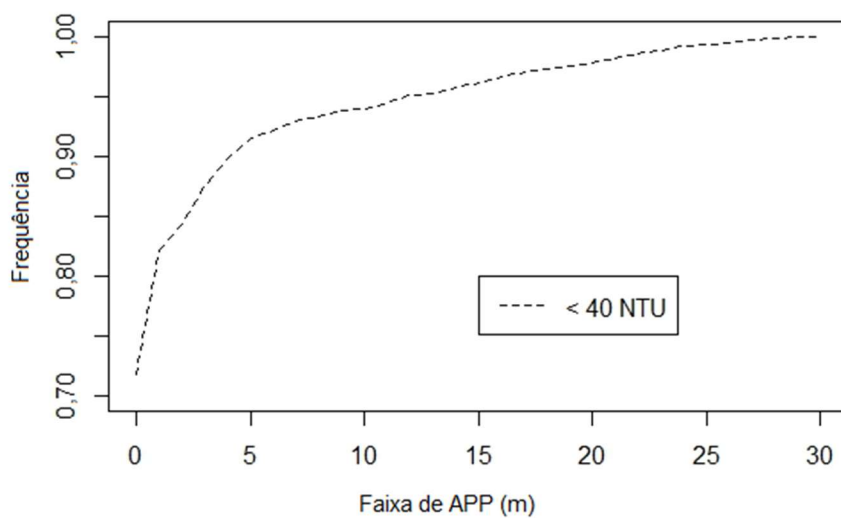


Figura 5.37 - Frequência dos dias com turbidez média inferior a 40 NTU.

Em revisão de literatura sobre o tema, Desbonnet *et al.* (1994) indicaram que um incremento na largura de proteção ripária por um fator de 3,0 provém um incremento de 10% na eficiência de remoção de sólidos totais em suspensão. Os dados trazidos pelos autores revelam que padrões elevados de eficiência de remoção de sólidos em suspensão demandam grandes faixas de vegetação ripária protegidas.

Uma vez que as simulações aqui apresentadas são baseadas em modelo de atenuação não validado para a situação do Cerrado brasileiro, necessário seria um levantamento de dados de campo para o caso em análise com identificação da função mais regionalizada de atenuação. Esse foi o intento inicial quando da propositura de experimentos em escala de vertente. Todavia, o elevado grau de preservação da área experimental não propiciou aportes significativos de sedimentos em parcelas experimentais instaladas.

6- CONCLUSÕES

A presente tese teve como objetivo uma avaliação da função das florestas ripárias do bioma Cerrado em processos hidrossedimentológicos. Os experimentos conduzidos apontam para uma importância dessa fitofisionomia nos processos de interceptação e de atenuação de aportes de sedimentos.

A metodologia empregada, baseada na modelagem de cenários de proteção com uso do modelo SWAT, mostrou-se útil para lastrear tecnicamente o estabelecimento de critérios legais de proteção justafluvial. Ainda assim, não se logrou êxito em promover uma regionalização do modelo de atenuação de sedimentos, sendo empregada, no presente estudo a formulação original trazida no modelo SWAT. As observações hidrossedimentológicas da bacia experimental permitiram a calibração tanto para vazões como para sedimentos. Permitiram, ainda, atestar a eficiência das florestas ripárias na atenuação do aporte de sedimentos. Isso porque, ao longo do período estudado, não se registrou elevação da turbidez no córrego frente aos escoamentos advindos das áreas preservadas.

Os cenários simulados sugerem que faixas laterais de proteção, tão estreitas como 5 metros, já exibem significativa melhoria na qualidade das águas em termos de concentração média de sólidos em suspensão. Observou-se que nessa condição ter-se-ia uma permanência de 90% com valores de turbidez inferiores a 40 NTU, limite para utilização de tratamentos simplificados para tornar potável a água bruta. Todavia, quando se trata do comportamento hidrossedimentológico em termos de descarga sólida, para uma redução de 90% das descargas aportantes no corpo hídricos, faixas superiores à 23 metros devem ser empregadas, considerando-se um cenário de uso agrícola moderado da bacia. Nesse sentido, sobre o prisma do assoreamento de ambientes lóticos e lênticos, essas faixas mínimas devem ser empregadas para redução do problema. Esses resultados são um reforço para a suficiência legal atual, com exigência de 30m de proteção lateral, ao menos sobre o prisma de redução de aportes de sedimentos. Os resultados apontam, ainda, para o risco de degradação por assoreamento caso ocorra uma flexibilização da norma, retrocedendo-se às faixas originalmente trazidas no código florestal de 1965 que defendiam largura mínima de 5m de proteção.

A bacia experimental estudada propiciou importante informação quanto à variabilidade espacial do fenômeno de geração de sedimentos. Os dados sugerem que a quase totalidade das cargas sólidas aportantes apresenta como fonte estradas vicinais não pavimentadas, sendo importante o controle dessas fontes em ambientes rurais e urbanos.

Embora figure como um dos objetivos específicos da presente tese, não foi possível, ao longo do desenvolvimento dos trabalhos, a obtenção de uma função regionalizada de atenuação de aporte de sedimentos pela floresta ripária. Nesse sentido, recomenda-se para futuros trabalhos a montagem de experimento específico para essa finalidade. O monitoramento da vertente com uso do método da eletrorresistividade mostrou-se eficiente em termos de evolução espacial e temporal qualitativa do perfil de umidade. Todavia, os resultados não foram plenamente explorados devido à ausência de monitoramento direto do aquífero, assim como da umidade do solo. Dessa forma, igualmente sugere-se a continuidade dos estudos com instalação de piezômetros e de poços para edição de umidade com sondas TDR ao longo da vertente experimental. A aquisição desses dados poderá subsidiar uma modelagem detalhada bidimensional do comportamento dos fluxos na vertente, auxiliando na discussão dos mecanismos de proteção.

A robustez dos resultados observados no presente trabalho está limitada pelas condições originais em que as curvas de atenuação de aporte de sedimentos foi implementada no modelo SWAT. Para elevar a confiabilidade das simulações aqui empregadas é necessário o levantamento de funções de atenuação para a situação das florestas ripárias de Cerrado.

7- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, M. R. F. (2015). “Análise de cargas sólidas em suspensão na bacia do Córrego Riacho Fundo.” Universidade de Brasília.
- Almeida, C. (1870). *Ordenações Filipinas*. Typ. do Instituto Philomathico, Rio de Janeiro.
- APHA. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., and Neitsch, S. L. (2012). “Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. version 2012.” *Soil & water assessment toll*, TAMU, Austin.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). “Large area hydrologic modeling and assesment Part I: Model development.” *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- Attanasio, C., Gandolfi, S., and Zakia, M. (2012). “A importância das áreas ripárias para a sustentabilidade hidrológica do uso da terra em microbacias hidrográficas.” *Bragantia*, 493–501.
- Baker, M., Wiley, M., and Seelbach, P. (2001). “GIS-based hydrologic modeling of riparian areas: Implications for stream water quality.” ... *of the American Water ...*, 37(6), 1615–1628.
- Baty, F., Ritz, C., Charles, S., Brutsche, M., Flandrois, J.-P., and Delignette-Muller, M.-L. (2015). “A Toolbox for Nonlinear Regression in R : The Package nlstools.” *Journal of Statistical Software*, 66(5), 1–21.
- Betson, R. (1964). “What is watershed runoff?” *Journal of Geophysical research*, 69(8).
- Beven, K. (2006). *Benchmark Papers in hydrology: Streamflow Generation Processes*. (W. Froehlich, J. Gibson, H. Gupta, and A. Gustard, eds.), Oxfordshire.
- Beven, K. J. (1993). “Prophecy, Reality and Uncertainty in Distributed Hydrological Modelling.” *Adv. Water Resour.*, 16, 41–51.
- Blainski, É., Porras, E. A. A., Garbossa, L. H. P., and Pinheiro, A. (2017). “Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model.” *RBRH*, 22.
- Borah, D. K., and Bera, M. (2003). “watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models.” *Transactions of the ASAE*, 46(6), 1553–1566.
- BRASIL. (1935). “Decreto nº 23.793, de 23 de janeiro de 1934.” *Diário Oficial da União*.
- BRASIL. (1965a). “Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965.” *Diário Oficial da União*.
- BRASIL. (1965b). “Projeto nº 2.874: Institui o novo Código Florestal.” *Diário do Congresso Nacional*, Brasília, (Seção I), 4154–4157.
- Bressiani, D. de A., Gassman, P. W., Fernandes, J. G., Garbossa, L. H. P., Srinivasan, R., Bonumá, N. B., and Mendiondo, E. M. (2015). “A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects.” *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(3), 1–27.
- Brutsaert, W. (2010). *Hydrology: An Introduction. 5rd ed. Hydrology: An Introduction*, Cambridge University Press.
- Carvalho, F., Assunção, H. F. da, and Scopel, I. (2013). “Partição Pluviométrica Em Fitofisionomias Do Cerrado.” *Mercator*, 135–147.
- Chambers, J. E., Meldrum, P. I., Wilkinson, P. B., Ward, W., Jackson, C., Matthews, B., Joel, P., Kuras, O., Bai, L., Uhlemann, S., and Gunn, D. (2015). “Spatial monitoring of groundwater drawdown and rebound associated with quarry dewatering using automated time-lapse electrical resistivity tomography and distribution guided clustering.” *Engineering Geology*, 193, 412–420.
- Chen, S., Chen, C., Zou, C. B., Stebler, E., Zhang, S., Hou, L., and Wang, D. (2013). “Application of Gash analytical model and parameterized Fan model to estimate

- canopy interception of a Chinese red pine forest.” *Journal of Forest Research*, 18(4), 335–344.
- Chow, V. Te, Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology. Water Resources and Environmental Engineering*, McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering, (R. Eliassen, P. H. King, and R. K. Linsley, eds.), McGraw-Hill.
- Corrêa, C. M. C., and Dedeczek, R. A. (2009). “Erosão Real E Estimada Através Da Rusle Em Estradas De Uso Florestais , Em Condições De Relevô Plano a Suave Ondulado.” *Floresta*, 39(2), 381–391.
- Cuartas, L. A., Tomasella, J., Nobre, A. D., Hodnett, M. G., Waterloo, M. J., and Múnera, J. C. (2007). “Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years.” *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(1–2), 69–83.
- Desbonnet, A., Pogue, P., Lee, V., and Wolf, N. (1994). *Vegetated Buffers in the Coastal Zone: A Summary Review and Bibliography*. Narragansett, RI.
- Dunne, T., and Black, R. D. (1970). “Partial area contributions to storm runoff in a small new England watershed.” *Water Resources Research*, 6(5), 1296–1311.
- Ferrigo, S. (2014). “Análise de consistência dos parâmetros do modelo SWAT obtidos por calibração automática – Estudo de caso da bacia do Lago Descoberto - DF.” *PTARH*, Universidade de Brasília.
- Frazer, G., Canham, C., and Lertzman, K. (1999). “Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs.” *Program*, Burnaby.
- Gash, J. H., Lloyd, C. R., and Lachaud, G. (1995). “Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model.” *Journal of Hydrology*, 170(1–4), 79–86.
- Germer, S., Elsenbeer, H., and Moraes, J. M. (2005). “Throughfall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, south-western Amazonia (Rondônia, Brazil).” *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(6), 2707–2738.
- Giglio, J. N., and Kobiyama, M. (2013). “Interceptação da Chuva : Uma Revisão com Ênfase no Monitoramento em Florestas Brasileiras.” *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18(2), 297–317.
- van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M., and Srinivasan, R. (2006). “A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models.” *Journal of Hydrology*, 324(1–4), 10–23.
- Hall, M. J. (2001). “How well does your model fit the data?” *Journal of Hydroinformatics*, 3(1), 49–55.
- Helvey, J. D., and Patric, J. H. (1966). “Design criteria for interception studies.” *Hydrological Sciences Bulletin. International Association of Hydrological Sciences*, 67, 131–137.
- Hibbert, A., and Troendle, C. (1988). “Streamflow generation by variable source area.” *Forest hydrology and ecology at Coweeta*.
- Hoover, M., and Hursh, C. (1943). “Influence of topography and soil depth on runoff from forest land.” *Eos Trans. AGU*.
- Horton, R. (1919). “Rainfall Interception.” *Monthly weather review*, 47(9), 608–623.
- Horton, R. E. (1933). “The role of infiltration in the hydrologic cycle.” *Transactions of the American Geophysical Union*, 445–460.
- Jacon, G., and Cudo, K. (1989). “Curva-chave: análise e traçado.” *Brasília: DNAEE*, 273.
- Jackson, I. J. (1971). “Problems of throughfall and interception assessment under tropical forest.” *Journal of Hydrology*, 12, 234–254.

- Jain, S. K., and Sudheer, K. P. (2008). "Fitting of Hydrologic Models: A Close Look at the Nash–Sutcliffe Index." *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(10), 981–986.
- Kimmins, J. P. (1973). "Some Statistical Aspects of Sampling Throughfall Precipitation in Nutrient Cycling Studies in British Columbian Coastal Forests." *Ecology*, 54(5), 1008.
- Krysanova, V., and Srinivasan, R. (2015). "Assessment of climate and land use change impacts with SWAT." *Regional Environmental Change*, 15(3), 431–434.
- Lacerda, M., and Barbosa, I. (2007). "Utilização de sensoriamento remoto para o estabelecimento de relações entre vegetação nativa e classes de solos em mapeamento pedológico, Distrito." ... *de Sensoriamento ...*, 3991–3996.
- Lima, J. E. F. W., Silva, E. M., Strauch, M., and Lorz, C. (2013). "Development of a soil database for applying SWAT model in a catchment of the Brazilian Savanna." *SWAT Conference 2013*, Toulouse, 10.
- Lima, W., and Zakia, M. (2006). "O Papel do Ecossistema Ripário." *As Florestas Plantadas e a Água*, M. Lima, WP; Zakia, ed., RIMA, São Carlos, 77–87.
- Link, T. E., Unsworth, M., and Marks, D. (2004). "The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest." *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3–4), 171–191.
- Lloyd, C. R., Gash, J. H. C., Shuttleworth, W. J., and de O. Marques F, A. (1988). "The measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian rain forest." *Agricultural and Forest Meteorology*, 43(3–4), 277–294.
- Lopes, G. R. (2010). "Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia do córrego do Capão Comprido, DF." Universidade de Brasília.
- Magalhães, J. (2002). *A evolução do direito ambiental no Brasil*. Juarez de Oliveira, São Paulo.
- Marin, C. T., Bouten, W., and Sevink, J. (2000). "Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia." *Journal of Hydrology*, 237(1–2), 40–57.
- Martinez-Mena, M., Rogel, J. A., Albaladejo, J., and Castillo, V. M. (1999). "Influence of vegetal cover on sediment particle size distribution in natural rainfall conditions in a semiarid environment." *Catena*, 38, 175–190.
- McKergow, L. a., Prosser, I. P., Weaver, D. M., Grayson, R. B., and Reed, A. E. (2006a). "Performance of grass and eucalyptus riparian buffers in a pasture catchment, Western Australia, part 1: riparian hydrology." *Hydrological Processes*, 20(11), 2309–2326.
- McKergow, L. a., Prosser, I. P., Weaver, D. M., Grayson, R. B., and Reed, A. E. G. (2006b). "Performance of grass and eucalyptus riparian buffers in a pasture catchment, Western Australia, part 2: water quality." *Hydrological Processes*, 20(11), 2327–2346.
- Me, W., Abell, J. M., and Hamilton, D. P. (2015). "Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand." *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4127–4147.
- Mendiondo, E. M., and Tucci, C. E. M. (1997). "Escalas hidrológicas. II: Diversidade de processos na bacia vertente." *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 2(1), 59–122.
- Monteiro, J. A. F., Kamali, B., Srinivasan, R., Abbaspour, K., and Gücker, B. (2016). "Modelling the effect of riparian vegetation restoration on sediment transport in a human-impacted Brazilian catchment." *Ecohydrology*, 1303(February), 1289–1303.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Binger, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy

- in watershed simulations.” *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Mulvany, T. (1851). “On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rain fall and of flood discharges in a given catchment.” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 18–33.
- Naghetini, M., and Pinto, É. J. de A. (2007). *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte.
- Neitsch, S. ., Arnold, J. ., Kiniry, J. ., and Williams, J. . (2011). “Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009.” *Texas Water Resources Institute*, 1–647.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams., J. R. (2005). “Soil and Water Assessment Tool User’s Manual Version 2005.” *Diffuse Pollution Conference Dublin*, 10, 494.
- Newbold, J. D., Herbert, S., Sweeney, B. W., Kiry, P., and Alberts, S. J. (2010). “Water Quality Functions of a 15-Year-Old Riparian Forest Buffer System.” *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(2), 299–310.
- Oliveira, M. A. M. (2015). “Mensuração de perdas de sedimentos por escoamento superficial em encostas , com uso de parcelas de erosão , em diferentes usos e coberturas do solo no Bioma Cerrado : Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Gama / DF Mensuração de perdas de sedimentos por escoamento.” UnB.
- Osborne, L. L., and Kovacic, D. a. (1993). “Riparian vegetated buffer strips in water-quality restoration and stream management.” *Freshwater Biology*, 29(2), 243–258.
- Poleto, C., and Merten, G. (2006). *Qualidade dos Sedimentos*. ABRH, Porto Alegre.
- Pypker, T. G., Bond, B. J., Link, T. E., Marks, D., and Unsworth, M. H. (2005). “The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest.” *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(1–2), 113–129.
- R Core Team. (2015). “R: A language and environment for statistical computing.” R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Resende, K. M. (2006). “Legislação Ambiental Brasileira: Uma Reconstrução Histórica.” Universidade Federal de Lavras.
- Reynolds, J. M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Geophysics, John Wiley & Sons.
- Ribeiro, G. (2011). “A origem histórica do conceito de Área de Preservação Permanente no Brasil.” *Revista Thema*, 8(1), 13.
- Santos, I., Fill, H., Suga, M., Buda, H., Kishi, R., Marone, E., and Lautert, L. (2001). *Hidrometria Aplicada*. LACTEC, Curitiba.
- Schwartz, B. F., Schreiber, M. E., and Yan, T. (2008). “Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging.” *Journal of Hydrology*, 362, 234–246.
- Silva, C. L. Da. (2003). “Análise estatística das características de vazão do córrego Capetinga.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(2), 311–317.
- Silva Júnior, M. (2001). “Comparação entre matas de galeria no Distrito Federal ea efetividade do código florestal na proteção de sua diversidade arbórea.” *Acta Bot. Bras*, 15(1), 139–146.
- Silva Júnior, M. F. da. (2008). “Eestudo de interceptação da precipitação incidente em uma mata de galeria, no município de Palmas, Tocantins.” Universidade Federal do Tocantins.
- Souza, F. a. O. De, Silva, C. L. Da, Maggiotto, S. R., and Oliveira Júnior, M. P. De. (2012). “Caracterização das vazões em uma pequena bacia hidrográfica do Distrito Federal, Brasil.” *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(61), 10–17.
- Véliz-Chávez, C., Mastachi-Loza, C. A., González-Sosa, E., Becerril-Piña, R., and Ramos-

- Salinas, N. M. (2014). "Canopy Storage Implications on Interception Loss Modeling." *American Journal of Plant Sciences*, 5(September), 3032–3048.
- Viessman, W., Lewis, G. L., and Knapp, J. W. (2002). *Introduction to hydrology*. Harper & Row.
- Vuille, M., Bradley, R., and Keimig, F. (2000). "Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies." *Journal of Climate*, 13(Hastenrath 1981), 2520–2535.
- Wainer, A. (1993). "Legislação ambiental brasileira: evolução histórica." *Revista de Informações Legislativas*, 30(118), 16.
- White, K. L., and Chaubey, I. (2005). "Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model." *Journal of the American Water Resources Association*, 41(5), 1077–1089.
- Wischmeier, W., and Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses- A guide to Conservation Planning*. Beltsville.
- Zambrano-Bigiarini, M., and Rojas, R. (2014). "Particle Swarm Optimisation, with focus on Environmental Models. R package version 0.3-4."
- Ziegler, A. D., Benner, S. G., Tantasirin, C., Wood, S. H., Sutherland, R. A., Sidle, R. C., Jachowski, N., Nullet, M. A., Xi, L. X., Snidvongs, A., Giambelluca, T. W., and Fox, J. M. (2014). "Turbidity-based sediment monitoring in northern Thailand: Hysteresis, variability, and uncertainty." *Journal of Hydrology*, 519(PB), 2020–2039.
- Zimmermann, A., Zimmermann, B., and Elsenbeer, H. (2009). "Rainfall redistribution in a tropical forest: Spatial and temporal patterns." *Water Resources Research*, 45(November), 1–18.
- Zimmermann, B., Zimmermann, A., and Elsenbeer, H. (2010). "Sampling procedures for throughfall monitoring: A simulation study." *Water Resources Research*, 46, 1–15.

APÊNDICES

A – ALGORITMO PARA LEITURA DE SAÍDA DO MODELO SWAT

Leitor_SWAT.R

Bruno E Távora (2015)

```
SWAT_cal <- function(start_day, end_day, rch) {
  Calc<- read.table("watout.DAT", skip= 6, header = FALSE)
  Calc<- subset(Calc, select = c(V1, V2))
  names(Calc)<- c("Year", "Julian_day")
  inicio<- as.Date(paste (min(Calc$Julian_day) , min(Calc$Year), sep = "/"), "%j/%Y")
  # _____ Reading SWAT output _____
  Calc<- read.table("output.RCH", skip= 9, header = FALSE)
  names(Calc)<- c( "x", "RCH", "GIS", "MON", "AREAk2", "FLOW_INcms", "FLOW_OUTcms")
  Calc<- subset(Calc, RCH == rch, select = FLOW_OUTcms)
  names(Calc)<- c("Flow_CMS")
  # _____ Setting dates to SWAT output _____
  n<- length(Calc$Flow_CMS)
  Date<- as.Date(seq(1:n), inicio-1)
  # _____ Setting the SWAT output data frame _____
  Calc<- data.frame(Date, Calc$Flow_CMS)
  names(Calc)<- c("Dia", "Vazao_cal_CMS")
  # _____ Reading observed flow data _____
  Obs<- read.table("vazao_obs.txt", header = TRUE, na.strings = "NA")
  Obs$Dia<- as.Date(Obs$Dia, "%d/%m/%Y")
  names(Obs)<- c("Dia", "Vazao_cal_CMS")
  # _____ matching observed and calculated data _____
  Datas_calc<- match(Obs$Dia, Calc$Dia, nomatch = 0)
  Datas_obs<- match(Calc$Dia, Obs$Dia, nomatch = 0)
  Result<- data.frame(Calc[Datas_calc,], Obs[Datas_obs,])
  names(Result)<- c("Dia", "Vazao_cal_CMS", "Dia", "Vazao_obs_CMS")
  # _____ subsetting observed and calculated data _____
  start_day = as.Date(start_day, format = "%d/%m/%Y")
  end_day = as.Date(end_day, format = "%d/%m/%Y")
  simulado<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec = Vazao_cal_CMS)
  observado<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec = Vazao_obs_CMS)
  dias<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec = Dia)
  # _____ subsetting SWAT rain data _____
  raindata<- read.fwf("pcp1.pcp", c(4, 3, 5), skip = 4,)
  names(raindata)<- c("year", "Julian_day", "pcp")
  raindata$Data<-as.Date(paste(raindata$Julian_day, raindata$year, sep = "/"), "%j/%Y")
  pcp<- subset(raindata, Data >= start_day & Data <= end_day, selec = pcp)
  # _____ Final Data frame _____
  DF_final<- data.frame(simulado, observado, pcp, dias)
  names(DF_final)<- c("sim", "obs", "pcp", "Dia")
  require("hydroGOF")
  ggof(sim = DF_final$sim, obs = DF_final$obs, na.rm = TRUE, DF_final$Dia, date.fmt = "%d/%m/%y",
  pt.style = "ts", ftype = "o", stype="default", gof.leg = TRUE, digits=2,
  gofs=c("ME", "MAE", "RMSE", "NRMSE", "PBIAS", "RSR", "rSD", "NSE", "mNSE",
  "rNSE", "d", "md", "rd", "r", "R2", "bR2", "KGE", "VE"),
  legend, leg.cex=1, tick.tstep = "auto", lab.tstep = "auto", lab.fmt=NULL,
  cal.ini=NA, val.ini=NA, main, ylab=c("Q, (m^3/s)"),
  col = c("black", "red"), cex = c(0.5, 0.5), cex.axis=1.2, cex.lab=1.2,
  lwd = c(1, 1), lty = c(1, 3), pch = c(1, 9))
}
```

B – ALGORITMO PARA GRAVAÇÃO DOS ARQUIVOS DE ENTRADA E EXECUÇÃO DO MODELO SWAT

Calibrador_SWAT.R

Bruno E Távora (2015)

```
#Universidade de Brasília
#Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
#Script para calibração automática de alguns parâmetros do modelo SWAT
#Autor: Távora, B.E (2017)
#Importante: Para utilizar o código é necessário executar o modelo SWAT
#uma vez para geração da pasta TxtInOut. Copie o arquivo SWAT.exe para
#a pasta TxtInOut. Defina essa pasta como diretório de trabalho do R.
#É necessário criar um arquivo de vazões observadas igualmente salvo na
#pasta de trabalho. O arquivo (nomeado: vazao_obs.txt) deve apresentar a
#data(formato "%d/%m/%Y") e vazões observadas em m³/s, separados por um
#espaço.
#Exemplo do arquivo de vazões observadas:
#
#Dia Q
#10/10/1996 0.044
#11/10/1996 0.044
#12/10/1996 0.044
#13/10/1996 0.044
#14/10/1996 0.044
#15/10/1996 0.044
#16/10/1996 0.044
#17/10/1996 0.044
#
#
#
#           Esse código foi escrito para o SWAT2012 Rev. 635.
#


---


SWAT_optim<- function(par) {
start_day<- "01/01/2007" #Entre com a data inicial da calibração
end_day<- "30/06/2009"   #Entre com a data final da calibração
#           Parâmetros a serem calibrados


---


SHALLST<- par[1]
DEEPST<-  par[2]
GW_DELAY<- par[3]
ALPHA_BF<- par[4]
GWQMN<-   par[5]
GW_REVAP<- par[6]
REVAPMN<- par[7]
RCHRG_DP<- par[8]
GWHT<-    par[9]
GW_SPYLD<- par[10]
CN_multipl<- par[11]
OV_N<-    par[12]
CANMX<-   par[13]
ESCO<-    par[14]
EPCO<-    par[15]

#Continua na próxima página...
```

```

# _____ Modificando as entradas do SWAT _____
wd<- getwd()
GWfiles<- list.files(wd, pattern = ".gw")
for (i in 1:length(GWfiles)){

  gwfile<-file(GWfiles[i],"r+")
  text<-readLines(gwfile)
  close(gwfile)

##### Parâmetros do aquífero #####
  text[2]<- c(paste(" ",SHALLST ," | SHALLST : Initial depth of
water in the shallow aquifer [mm]"))
  text[3]<- c(paste(" ",DEEPST ," | DEEPST : Initial depth of
water in the deep aquifer [mm]"))
  text[4]<- c(paste(" ",GW_DELAY," | GW_DELAY : Groundwater
delay [days]"))
  text[5]<- c(paste(" ",ALPHA_BF," | ALPHA_BF : Baseflow alpha
factor [days]"))
  text[6]<- c(paste(" ",GWQMN ," | GWQMN : Threshold depth of
water in the shallow aquifer required for return flow to occur [mm]"))
  text[7]<- c(paste(" ",GW_REVAP," | GW_REVAP : Groundwater
revap coefficient"))
  text[8]<- c(paste(" ",REVAPMN," | REVAPMN: Threshold depth
of water in the shallow aquifer for revap to occur [mm]"))
  text[9]<- c(paste(" ",RCHRG_DP," | RCHRG_DP : Deep aquifer
percolation fraction"))
  text[10]<- c(paste(" ",GWHT," | GWHT : Initial groundwater
height [m]"))
  text[11]<- c(paste(" ",GW_SPYLD," | GW_SPYLD : Specific yield
of the shallow aquifer [m3/m3]"))

  gwfile<-file(GWfiles[i],"w+")
  writeLines(text,gwfile)
  close(gwfile)
}

GWfiles<- list.files(wd, pattern = ".hru")

for (i in 1:length(GWfiles)){
  gwfile<-file(GWfiles[i],"r+")
  text<-readLines(gwfile)
  close(gwfile)

##### Parâmetros da HRU #####
  text[5]<- c(paste(" ",OV_N ," | OV_N : Manning's n value for
overland flow"))
  text[9]<- c(paste(" ",CANMX ," | CANMX : Maximum canopy
storage [mm]"))
  text[10]<- c(paste(" ",ESCO," | ESCO : Soil evaporation
compensation factor"))
  text[11]<- c(paste(" ",EPCO," | EPCO : Plant uptake
compensation factor"))

  gwfile<-file(GWfiles[i],"w+")
  writeLines(text,gwfile)
  close(gwfile)
}
#Continua na próxima página...

```

```

##### Alterando o CN pelo multiplicador #####
MGTfiles<- list.files(wd, pattern = ".mgt")
for (i in 1:length(MGTfiles)) {
  CN_multipl<- 1.1
  MGTfile<-file(MGTfiles[i],"r+")
  text<-readLines(MGTfile)
  CN2<-
as.numeric(unlist(regmatches(text[11],gregexpr("[:digit:]]+\\..*[:digit
:]**",text[11])))
  CN2<- round(CN_multipl*CN2[1], digits = 2)
  CN2<- format(CN2, nsmall = 3)
  close(gwfile)
  text[11]<- c(paste ("", CN2," | CN2: Initial SCS CN II
value"))
  MGTfile<-file(MGTfiles[i],"w+")
  writeLines(text,MGTfile)
  close(MGTfile)
}
# Executando o SWAT

system("SWAT_64debug.exe")
##### Alterando o CN para o valor original #####
MGTfiles<- list.files(wd, pattern = ".mgt")

for (i in 1:length(MGTfiles)) {

  MGTfile<-file(MGTfiles[i],"r+")
  text<-readLines(MGTfile)
  CN2<-
as.numeric(unlist(regmatches(text[11],gregexpr("[:digit:]]+\\..*[:digit
:]**",text[11])))
  CN2<- round(CN2[1]/CN_multipl, digits = 2)
  CN2<- format(CN2, nsmall = 3)
  close(gwfile)
  text[11]<- c(paste ("", CN2," | CN2: Initial SCS CN II
value"))
  MGTfile<-file(MGTfiles[i],"w+")
  writeLines(text,MGTfile)
  close(MGTfile)
}
# Lendo os arquivos de saída
Calc<- read.table("watout.DAT", skip= 6, header = FALSE)
Calc<- subset(Calc, select = c(V1, V2, V4))
names(Calc)<- c("Year", "Julian_day", "Flow_CMS")
inicio<- as.Date(paste (min(Calc$Julian_day) , min(Calc$Year), sep =
"/"), "%j/%Y")

# Selecionando os arquivos de saída

n<- length(Calc$Flow_CMS)
Date<- as.Date(seq(1:n), inicio-1)
Calc<- data.frame(Date, Calc$Flow_CMS)
names(Calc)<- c("Dia", "Vazao_cal_CMS")

#Continua na próxima página...

```

```

# _____Lendo valores observados_____

Obs<- read.table("vazao_obs.txt", header = TRUE, na.strings = "NA")
Obs$Dia<- as.Date(Obs$Dia, "%d/%m/%Y")
names(Obs)<- c("Dia", "Vazao_obs_CMS")

# _____Tabulando valores observados e calculados_____

Datas_calc<- match(Obs$Dia, Calc$Dia, nomatch = 0)
Datas_obs<- match(Calc$Dia, Obs$Dia, nomatch = 0)
Result<- data.frame(Calc[Datas_calc,], Obs[Datas_obs,])
names(Result)<- c("Dia", "Vazao_cal_CMS", "Dia", "Vazao_obs_CMS")

# _____Selecionando valores observados e calculados pela data_____

start_day = as.Date(start_day, format = "%d/%m/%Y")
end_day = as.Date(end_day, format = "%d/%m/%Y")

simulado<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec =
Vazao_cal_CMS)
observado<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec =
Vazao_obs_CMS)
dias<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec = Dia)

# _____Base da dados final_____

DF_final<- data.frame(simulado, observado,dias)
names(DF_final)<- c("sim", "obs","Dia")

# _____Indice de Nash_____

DF_NSC<- DF_final[complete.cases(DF_final),]
size<- length(DF_NSC$Dia)
obs_mean<- mean(DF_NSC$obs)
NSC_up<- data.frame(((DF_NSC$obs - DF_NSC$sim)^2))
NSC_down<- data.frame(((DF_NSC$obs - obs_mean)^2))
NSC<- (1 - (sum(NSC_up)/sum(NSC_down)))
NSC<- round(NSC, digits = 2)

return(NSC)

}

# _____Otimização_____

install.packages("hydroPSO")
require('hydroPSO')
Lower<- c(#Entrar com o vetor de valores mínimos dos parâmetros)
Upper<- c(#Entrar com o vetor de valores máximos dos parâmetros)
hydroPSO(fn=SWAT_optim,lower=Lower, upper=Upper,
control=list(npart=20, maxit=100, MinMax='max'))

```

C – ALGORITMO PARA CALIBRAÇÃO DE SEDIMENTOS DO MODELO SWAT

SWAT_sed.R

Bruno E Távora (2017)

```
#Universidade de Brasília
#Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
#Script para calibração automática de alguns parâmetros do modelo SWAT
#Autor: Távora, B.E (2017)
#Importante: Para utilizar o código é necessário executar o modelo SWAT
#uma vez para geração da pasta TxtInOut. Copie o arquivo SWAT.exe para
#a pasta TxtInOut. Defina essa pasta como diretório de trabalho do R.
#É necessário criar um arquivo de concentrações de sedimentos observadas
#igualmente salva na pasta de trabalho. O arquivo (nomeado: ss_obs.txt)
#deve apresentar a #data(formato "%d/%m/%Y") e sólidos em suspensão em
#mg/l), separados por um espaço.
#Exemplo do arquivo de vazões observadas:
#
#Dia  SS
#10/10/1996 44
#11/10/1996 44
#12/10/1996 44
#13/10/1996 44
#14/10/1996 44
#15/10/1996 44
#16/10/1996 44
#17/10/1996 44
#
#
#
#           Esse código foi escrito para o SWAT2012 Rev. 635.
#


---


SWAT_sed<- function(par){
  start_day<- "01/01/2015" #Entre com a data inicial da calibração
  end_day<- "31/12/2016"  #Entre com a data final da calibração
  #           Parâmetros da calibração
  ADJ_PKR<-format(par[1], nsmall = 3)  #Peak rate adjustment factor for
#sediment routing in the subbasin (tributary channels)
  PRF_BSN<- format(par[2], nsmall = 3) #Peak rate adjustment factor for
#sediment routing in the main channel
  SPCON<- format(par[3], nsmall = 4)   #Linear parameter for
#calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained
#during channel sediment routing
  SPEXP<- format(par[4], nsmall = 3)   #Exponent parameter for
#calculating sediment reentrained in channel sediment routing
  K_erosion<- format(par[5], nsmall = 2) #Soil Erosion k coeficient
  CN2<- format(par[6], nsmall = 3)     #CN of sedment HRU source
  OV_N_sed<- round(par[7], digits = 3)
}
#Continua na próxima página...
```



```

# _____ Alterando os parâmetros do modelo _____
wd<- getwd()
GWfiles<- list.files(wd, pattern = ".bsn")

for (i in 1:length(GWfiles)){

  gwfile<-file(GWfiles[i],"r+")
  text<-readLines(gwfile)
  close(gwfile)

##### _____ Parâmetros da bacia _____ #####
  text[21]<- c(paste("          ",ADJ_PKR,"          | ADJ_PKR : Peak rate
adjustment factor for sediment routing in the subbasin (tributary
channels)")
  text[22]<- c(paste("          ",PRF_BSN,"          | PRF_BSN : Peak rate
adjustment factor for sediment routing in the main channel"))
  text[23]<- c(paste("          ",SPCON  ,"          | SPCON : Linear
parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be
reentrained during channel sediment routing"))
  text[24]<- c(paste("          ",SPEXP,"          | SPEXP : Exponent
parameter for calculating sediment reentrained in channel sediment
routing"))

  gwfile<-file(GWfiles[i],"w+")
  writeLines(text,gwfile)
  close(gwfile)
}

GWfiles<- c("000010009.sol", "000010010.sol", "000010011.sol",
"000010012.sol", "000010013.sol")

for (i in 1:length(GWfiles)){

  gwfile<-file(GWfiles[i],"r+")
  text<-readLines(gwfile)
  close(gwfile)

#### _____ Parâmetros do solo _____ #####
  text[18]<- c(paste(" Erosion K          :          ",
K_erosion))

  gwfile<-file(GWfiles[i],"w+")
  writeLines(text,gwfile)
  close(gwfile)
}

#Continua na próxima página...

```

```

##### _____ Parâmetros da HRU _____ #####

GWfiles<- c("000010009.hru", "000010010.hru", "000010011.hru",
"000010012.hru")

for (i in 1:length(GWfiles)){

  gwfile<-file(GWfiles[i],"r+")
  text<-readLines(gwfile)
  close(gwfile)

  text[5]<- c(paste("      ",OV_N_sed , "      | OV_N : Manning's n
value for overland flow"))

  gwfile<-file(GWfiles[i],"w+")
  writeLines(text,gwfile)
  close(gwfile)
}
# _____ Executando o SWAT _____

system("SWAT_64debug.exe")

# _____ Lendo as saídas do SWAT _____
Calc<- read.table("watout.DAT", skip= 6, header = FALSE)
Calc<- subset(Calc, select = c(V1, V2, V5))
names(Calc)<- c("Year", "Julian_day", "ss_mgl")
inicio<- as.Date(paste(min(Calc$Julian_day) , min(Calc$Year), sep =
"/"), "%j/%Y")

# _____ Selecionado os dados da saída _____

n<- length(Calc$ss_mgl)
Date<- as.Date(seq(1:n), inicio-1)
Calc<- data.frame(Date, Calc$ss_mgl)
names(Calc)<- c("Dia", "SS_cal_mgl")

# _____ Leitura dos dados observados de sedimento _____

Obs<- read.table("ss_obs.txt", header = TRUE, na.strings = "NA")
Obs$Dia<- as.Date(Obs$Dia, "%d/%m/%Y")
names(Obs)<- c("Dia", "SS_obs_mgl")

# _____ Ajustando dados observados e calculados _____

Datas_calc<- match(Obs$Dia, Calc$Dia, nomatch = 0)
Datas_obs<- match(Calc$Dia, Obs$Dia, nomatch = 0)
Result<- data.frame(Calc[Datas_calc,], Obs[Datas_obs,])
names(Result)<- c("Dia", "SS_cal_mgl", "Dia", "SS_obs_mgl")

#Continua na próxima página...

```

```

# _____Selecionando dados observados e calculados_____

start_day = as.Date(start_day, format = "%d/%m/%Y")
end_day = as.Date(end_day, format = "%d/%m/%Y")

simulado<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec =
SS_cal_mgl)
observado<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec =
SS_obs_mgl)
dias<- subset(Result, Dia >= start_day & Dia <= end_day, selec = Dia)

# _____Base de dados final_____

DF_final<- data.frame(simulado, observado, dias)
names(DF_final)<- c("sim", "obs", "Dia")

# _____Índice de Nash_____
DF_NSC<- DF_final[complete.cases(DF_final),]
size<- length(DF_NSC$Dia)
obs_mean<- mean(DF_NSC$obs)
NSC_up<- data.frame(((DF_NSC$obs - DF_NSC$sim)^2))
NSC_down<- data.frame(((DF_NSC$obs - obs_mean)^2))
NSC<- (1 - (sum(NSC_up)/sum(NSC_down)))
NSC<- round(NSC, digits = 2)

return(NSC)

}

# _____Otimização_____

install.packages("hydroPSO")
require('hydroPSO')
Lower<- c(#Entrar com o vetor de valores mínimos dos parâmetros)
Upper<- c(#Entrar com o vetor de valores máximos dos parâmetros)
hydroPSO(fn=SWAT_sed,lower=Lower, upper=Upper,
         control=list(npart=20, maxit=100, MinMax='max'))

```

D - ALGORITMO PARA GERAÇÃO DE CENÁRIOS INCREMENTAIS PARA GERAÇÃO DE CENÁRIOS INCREMENTAIS DE PROTEÇÃO POR APP PARA O MODELO SWAT

buffer_strip.R

Bruno E Távora (2017)

```
#Universidade de Brasília
#Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos
#Script para calibração automática de alguns parâmetros do modelo SWAT
#Autor: Távora, B.E (2017)
#Script para simulação de cenários incrementais de proteção justafluvial
#Considera como parâmetros de entrada a largura mínima e máxima da faixa
#vegetada além do incremento de largura entre simulações de cenários.

buffer_strip<- function(par) {
#_____Model buffer strip parameters_____#
  min_width <- par[1]
  max_width <- par[2]
  width_inc <- par[3]

  for (e in seq(from = min_width, to = max_width, by =width_inc)) {
#####_____Loop for simulation of incremental scenario_____#####
    wd<- getwd()
    MGTfiles<- list.files(wd, pattern = ".mgt")
    e<- format(e, digits = 1, nsmall=0, width = 16)

    for (i in 1:length(MGTfiles)){
      gwfile<-file(MGTfiles[i], "r+")
      text<-readLines(gwfile)
      close(gwfile)
#####_____FILTERW parameter change_____#####
      text[14]<- c(paste( e , " | FILTERW: width of edge of field filter strip (m)")
      gwfile<-file(MGTfiles[i], "w+")
      writelines(text, gwfile)
      close(gwfile)
    }
#####_____Runing SWAT_____#####
    system("SWAT_64debug.exe")
#####_____Reading SWAT output_____#####
    Calc<- read.table("watout.DAT", skip= 6, header = FALSE)
    Calc<- subset(Calc, select = c(V1, V2, V4, V5))
    Calc$Data<- as.Date(paste (Calc[,2], Calc[,1], sep = "/"), "%j/%Y")
    names(Calc)<- c("Year", "Julian_day", "Flow_CMS", "SEDMgl", "Data")
    write.table(Calc, paste("C:/SWAT_TESE/Scenarios/alternativo/TxtInOut/", e, ".csv",
sep = ""), sep=";")
    jpeg(paste(e, ".jpg", sep = ""))
    plot(Calc$Data, Calc$SEDMgl, typ = "l", ylim = c(0, 200),
      main = paste(e, "m", " de APP", sep = ""), xlab = "Data", ylab= "Conc. Sed.
(mg/l)")
    dev.off()
  }
}
```