

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS

TERESA RAQUEL LIMA FARIAS

**PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB
DIFERENTES CONTEXTOS GEOAMBIENTAIS: MEDIDA E MODELAGEM**

FORTALEZA-CE

2008

TERESA RAQUEL LIMA FARIAS

**PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB DIFERENTES
CONTEXTOS GEOAMBIENTAIS: MEDIDA E MODELAGEM**

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos,

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo

FORTALEZA-CE

2008

TERESA RAQUEL LIMA FARIAS

PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS SOB DIFERENTES
CONTEXTOS GEOAMBIENTAIS: MEDIDA E MODELAGEM

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração em Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 28 de março de 2008

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará-UFC

Profa. Dra. Carísia Carvalho Gomes
Universidade Federal do Ceará - UFC

Prof. Dr. Eduardo Eneas de Figueiredo
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida, saúde, oportunidades e por sempre me mostrar caminhos.

Ao Prof. José Carlos de Araújo, pela orientação dispensada na pesquisa, pelas discussões, paciência e por sempre estimular meu crescimento profissional.

À Prof. Carísia Gomes e ao Prof. Eduardo de Figueiredo, por aceitarem o convite para a Banca Examinadora e pelas suas contribuições e sugestões.

Aos amigos do grupo de pesquisa Alexandre Costa e Pedro Medeiros, por toda a ajuda com os trabalhos de campo, pelas discussões e troca de experiências científicas.

Aos nossos colaboradores na realização do monitoramento das áreas de estudo (hidrólogos do campo), moradores das comunidades de Aiuaba, Pai João e Santo Antônio, Sr. Tico, Hozana, Sr. Francisco Gadelha, Clerton, Cléa e suas famílias, pela ajuda indispensável na coleta de dados, hospitalidade e amizade.

Aos amigos do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação, em especial ao Carlos Germano pela eficiência e solicitude sempre que precisei, principalmente nos trabalhos de campo.

Aos integrantes do PROSED, Prof. César Veríssimo, Márcia Marques e Anátolis France pela companhia nos trabalhos de campo, e pela troca de experiências e ao Benjamim Eichert pelo trabalho no mapeamento de usos do solo.

Ao Prof. Adunias Teixeira do DENA, ao técnico Firmino e a amiga Silvia Helena pela contribuição indispensável na instalação e manutenção dos equipamentos de medição hidrológica.

Ao CNPq pelo financiamento desta pesquisa através do projeto PROSED (processo nº 552411/2005-1) e à FUNCAP pela concessão da bolsa de estudos.

Ao IBAMA por permitir a realização de pesquisas na Estação Ecológica de Aiuaba, pelo apoio nas campanhas e à FUNCEME pela disponibilidade de dados hidrológicos.

À Pós-graduação em Engenharia Agrícola e ao Departamento de Engenharia Agrícola por me possibilitarem instalação de trabalho digna para a realização desta dissertação. Aos professores e funcionários pela solicitude e amizade.

À Pós-graduação em Engenharia Civil pela disponibilidade de utilização do micro-molinete para as medições de vazão.

À turma da Pós-graduação em Engenharia Civil: Eloneide, Sílvia, Magno, Orleani, Marcus, Itarciane, Danilo, Charles, pela amizade e por dividirem comigo horas de estudo. Aos estudantes da Pós-graduação em Engenharia Agrícola pela acolhida, solicitude e amizade.

À minha família: minha mãe Maria Ires (em memória) e meu pai José Farias, pelo amor que me foi dedicado, pelo exemplo de caráter, determinação e por sempre apoiarem e respeitarem minhas decisões. À querida Tia Liduína, pelo apoio incondicional e por suas orientações que contribuíram para meu desenvolvimento profissional e à minha avó Maria (em memória), pelo exemplo de amor e tolerância, por sempre acreditar na minha capacidade e incentivar meu crescimento profissional.

RESUMO

Avaliações de produção de sedimentos em bacias hidrográficas são necessárias quando se deseja melhorar a qualidade da análise técnica, contribuindo para uma avaliação consistente da disponibilidade hídrica e, conseqüentemente, para a gestão dos recursos hídricos. O objetivo geral da pesquisa foi avaliar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas sob a influência de diferentes contextos geoambientais. Três pequenas bacias foram monitoradas: a Bacia Experimental de Aiuaba, com área de drenagem de 12,0 km², localizada em uma área de conservação ambiental do bioma caatinga, no sertão dos *Inhamus*, sob clima semi-árido; e as Bacias de Pai João (9,3 km²) e Santo Antônio (6,8 km²), localizadas no maciço de Baturité, sob clima tropical sub-úmido, que se encontram impactadas por ações antrópicas, particularmente agricultura. A caracterização das bacias mostrou que Aiuaba, Pai João e Santo Antônio têm respectivamente, percentual de cobertura vegetal natural de 100%, 86% e 76% e regime predominante de escoamento efêmero, intermitente e perene. Realizou-se monitoramento no ano de 2007, de variáveis hidrossedimentológicas nestas áreas. A estimativa anual de produção de sedimentos foi feita através da determinação de descargas líquidas e sólidas afluentes no exutório, e de equações de curvas-chave de sedimentos a partir destes dados. Nas bacias de Pai João e Santo Antônio, as cargas de leito foram estimadas por meio de simulação com o modelo EB (equações de Einstein e Brown), por não ter sido possível a medição desta parcela. Realizou-se ainda avaliação do modelo HIDROSED2 na estimativa de produção de sedimentos nas áreas. Na bacia de Aiuaba realizou-se simulação para o período de 2003 a 2007 e os resultados foram comparados com os medidos indiretamente (curva-chave). Nas Bacias de Pai João e Santo Antônio o modelo foi apenas calibrado, com base em alguns eventos monitorados em 2007. Na avaliação da produção de sedimentos nas bacias de Aiuaba, Pai João e Santo Antônio, os valores obtidos foram respectivamente 1, 136 e 686 ton.km⁻².ano⁻¹. Observa-se que a ordem de grandeza da produção de sedimentos aumenta com o nível de degradação ambiental. Entretanto, não é possível traçar conclusões unicamente em função do uso do solo, pois outros fatores influenciam a produção de sedimentos. Na avaliação individual de eventos nas três bacias o modelo HIDROSED2 não apresentou resultados satisfatórios para os pequenos eventos. Por outro lado, na estimativa anual e de eventos intensos de produção de sedimentos o modelo apresentou resultados satisfatórios em comparação com as medidas. Os resultados sugerem: (1) foi verificada correlação direta entre a degradação ambiental e a produção de sedimentos quantificada nas bacias estudadas; (2) a modelagem deve ser aprimorada com base na física de processos; (3) ainda há necessidade de monitoramento de variáveis hidrológicas e sedimentológicas com a elaboração de bancos de dados em bacias hidrográficas do Estado do Ceará, contribuindo para a implantação de instrumentos de gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave. Produção de sedimentos, contexto geo-ambiental, bacias hidrográficas

ABSTRACT

Sediment yield assessment is necessary in watersheds when it is desired to improve the quality of analysis, contributing for a consistent evaluation of water availability and, therefore, high-quality water resources management. The general objective was to evaluate the sediment yield in watersheds under different geo-environmental contexts. Three small basins had been monitored: the Aiuaba Experimental Basin, with drainage area of 12.0 km², located in an environmental conservation area of the biome *caatinga*, in the *Inhamus* hinterland, under semi-arid climate; and the Basins of Pai João (9.3 km²) and Santo Antônio (6.8 km²), located in the Baturité mountain, under tropical sub-humid climate, which are impacted by anthropogenic actions, particularly agriculture. The basins characterization showed that Aiuaba, Pai João and Santo Antônio have, respectively, 100%, 86% and 76% of natural vegetation cover; and predominant fluvial regimes are ephemeral, intermittent and perennial. In the year of 2007, Hydrological and sedimentological variables were measured in these areas. The annual sediment yield estimate was made using liquid and solid discharges recorded in the basin outlet and the determination of sediment rating curves with these data. In the catchments Pai João and Santo Antônio, the bed load were simulated with model EB (Einstein and Brown equations), for not being possible the direct measurement of this parcel. The performance of model HIDROSED2 was assessed concerning sediment yield. In the Aiuaba basin the model was calibrated and validated using the monitored events. Simulations for 2003 to 2007 were carried out and the results had been compared with the measured ones using rating curves. In the Pai João and Santo Antônio basins the model only was calibrated, on the basis of some events monitored in 2007. The research provided the following results for Aiuaba, Pai João and Santo Antônio basins, respectively: the sediment yield was 1, 136 and 686 ton.km⁻².year⁻¹. It is observed that the order of magnitude of sediment yield increases with the level of environmental degradation. It is not possible to trace final conclusions solely in function of the soil use, because other factors influence sediment yield. In the event evaluation of the three basins, model HIDROSED2 did not present satisfactory results for the small events. On the other hand, in the annual estimate and of intense events of sediment yield, the model presented satisfactory results in comparison with the measurements. The results suggest: (1) there was a direct correlation between environmental degradation and sediment yield, quantified in the studied basins; (2) the improvement of modeling based on the physical processes is needed; and (3) hydrological and sedimentological measurements in catchments with the elaboration of data bases are still necessary for the State of Ceará. This should contribute for the implantation of management instruments of the water resources.

Key-words. Sediment yield, geo-environmental context, watersheds

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Caracterização da granulometria do sedimento acumulado nos microbarramentos de contenção da bacia de Pai João. Fonte: Silva (2007).....	40
Tabela 3.2 – Resumo das características das áreas de estudo	43
Tabela 5.1 – Comparação entre os valores de Carga de Sedimentos em suspensão observados e calculados pela equação da curva-chave.	65
Tabela 5.2 – Resultado por eventos da validação do Modelo HIDROSED2 na Bacia Experimental de Aiuaba (2006-2007)	67
Tabela 5.3 – Síntese da produção de sedimentos estimada no período de 2003 a 2007	69
Tabela 5.4 – Características dos eventos monitorados e cargas de sedimentos em suspensão na Bacia de Pai João, no ano de 2007	76
Tabela 5.5 – Carga de Sedimentos dos eventos monitorados em 2007 na Bacia de Pai João. Avaliação das descargas sólidas em suspensão e de leito através de medida e modelagem.	76
Tabela 5.6 – Balanço de sedimentos na Bacia de Pai João no ano de 2007.....	80
Tabela 5.7 – Comparação entre os dois métodos de estimativa de Carga de Sedimentos.	82
Tabela 5.8 – Características dos eventos monitorados e cargas de sedimentos em suspensão na Bacia de Santo Antônio, no ano de 2007.....	87
Tabela 5.9 – Cargas de Sedimentos dos eventos monitorados em 2007, na Bacia de Santo Antônio. Avaliação das descargas sólidas em suspensão e de leito através de medida e modelagem.	88
Tabela 5.10 – Comparação entre os dois métodos de estimativa de Carga de Sedimentos para os eventos avaliados na Bacia de Santo Antônio.	92
Tabela 5.11 – Resumo dos resultados obtidos nas bacias de Aiuaba, Pai João e Santo Antônio comparação entre os diferentes contextos geoambientais.	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Amostragem de sedimentos em suspensão e zona não amostrada em rios com respectivos perfis de velocidade de fluxo e concentração de sedimentos em suspensão. Fonte: Adaptado de Chang (1988).....	8
Figura 2.2 – Esquema de filtragem de amostras para a determinação das concentrações de sólidos em suspensão, separação entre cargas em suspensão (retidas no filtro) e cargas dissolvidas que ficam misturadas a parte líquida das amostras, que passam pelo filtro. Fonte: Carvalho (1994).....	9
Figura 2.3 – Esquema de definição de variáveis do modelo HIDROSED2. Fonte: Adaptado de Araújo, (2007).....	20
Figura 2.4 - Variação do parâmetro de transporte K_v como uma função do fator combinado CP (USLE) para três bacias de clima tropical e duas de clima temperado. Fonte: Araújo (2007)	23
Figura 3.1 - Localização da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) em relação ao Estado do Ceará e ao Município de Aiuaba.	24
Figura 3.2 – Precipitação média mensal, Posto Aiuaba (1978-2007), Fonte: série histórica FUNCEME (2008)	25
Figura 3.3 – Mapa topográfico da Bacia Experimental de Aiuaba.	26
Figura 3.4 – Mapa de solos da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Adaptado de Creutzfeldt (2006)	27
Figura 3.5 – Mapa de geologia da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Adaptado de Araújo, L. (2005).....	28
Figura 3.6 – Mapa de vegetação da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Adaptado de Lemos (2006).....	30
Figura 3.7 - Mapa de Localização das Bacias de Pai João e Santo Antônio em relação ao Estado do Ceará.	31
Figura 3.8 – Distribuição anual de precipitação pluviométrica nas Bacias de Pai João (Posto Pai João, 2000-2007) e Santo Antônio, (Posto Aratuba, 1974-2007), médias mensais. Fonte: séries históricas FUNCEME.....	33
Figura 3.9 - Mapa topográfico das Bacias de Pai João e Santo Antônio.....	33

Figura 3.10 – Mapa de solos das Bacias de Pai João e Santo Antônio. Fonte: Adaptado de Silva (2007) e Nascimento (2007).....	34
Figura 3.11 – Mapa de geologia das Bacias de Pai João e Santo Antônio. Fonte: Adaptado de Silva (2007) e Nascimento (2007).....	36
Figura 3.12 – Mapa de vegetação, uso e ocupação do solo das bacias de Pai João e Santo Antônio. Fonte: Eichert (2008).....	38
Figura 3.13 - Esquema do sequenciamento de barragens de contenção de sedimentos. Fonte: Ceará (2001).	39
Figura 3.14 – Aspectos gerais da Bacia de Pai João	41
Figura 3.15 – Aspectos gerais da Bacia de Santo Antônio.....	42
Figura 4.1 - Localização da instrumentação na Bacia Experimental de Aiuaba	44
Figura 4.2 – Equipamentos de medição hidrológica na Bacia Experimental de Aiuaba	45
Figura 4.3 – Discretização da área em sub-bacias para aplicação do modelo HIDROSED2 .	48
Com relação aos parâmetros relacionados aos eventos, a estimativa destes foi realizada como explicado a seguir.	48
Figura 4.4 – Localização de equipamentos de medição hidrológica nas bacias de Pai João e Santo Antônio.....	51
Figura 4.5 – Pluviômetros instalados nas Bacias de Pai João e Santo Antônio	52
Figura 4.6 – Medição de vazão utilizando micro-molinete.....	52
Figura 4.7 – Avaliação da relação de Einstein – Brown para estimativa da taxa de transporte de fundo, resultado de vários experimentos em bacias. Fonte: Bogárdi (1974).....	56
Figura 4.8 - Discretização da Bacia de Pai João em sub-bacias para aplicação do modelo HIDROSED2.....	59
Figura 4.9 - Discretização da Bacia de Santo Antônio em sub-bacias para aplicação do modelo HIDROSED2.....	62
Figura 5.1 – Curva-chave de sedimentos da Bacia Experimental de Aiuaba.....	64
Figura 5.2 – Comparação da carga acumulada de sedimentos observada, estimada com base na curva-chave e simulada com HIDROSED2 na Bacia Experimental de Aiuaba. Eventos monitorados em 2006 e 2007	66
Figura 5.3 – Carga de sedimentos por evento (2003-2007), pelo método da curva-chave e pela simulação com o modelo HIDROSED2 na BEA.	68
Figura 5.4 –Carga de sedimentos acumulada na Bacia Experimental de Aiuaba, para o período em estudo (2003-2007), estimada pela curva-chave e simulada pelo modelo HIDROSED2.....	68

Figura 5.5 – Histogramas da taxa de transporte difuso (SDR) para o período em estudo (2003-2007) na Bacia Experimental de Aiuaba	70
Figura 5.6 – Produção acumulada de sedimentos na BEA segundo curva-chave e quatro modelos de SDR, resultado anual para o período de 2003 a 2007	71
Figura 5.7 – Comparação entre os diferentes métodos de avaliação de produção de sedimentos (resultado anual) para a BEA entre 2003 e 2007.....	71
Figura 5.8 – Curva-chave de vazões da Bacia de Pai João, ano de 2007.....	72
Figura 5.9 – Fotos do riacho principal da Bacia de Pai João e apresentada por Chow (1959) com a finalidade de comparar os valores do coeficiente de Manning.....	73
Figura 5.10 – Pluviometria e profundidade de nível d’água medidos diariamente na Bacia de Pai João (período de 18/04/07 a 07/08/07).....	74
Figura 5.11 – Hietograma e hidrograma diários da Bacia de Pai João (período de 18/04/07 a 07/08/07).....	74
Figura 5.12 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da Bacia de Pai João, baseada em dados do ano de 2007	75
Figura 5.13 – Relação entre a descarga líquida e o percentual da descarga sólida em suspensão em relação à descarga sólida total	77
Figura 5.14 – Curva S de sedimentos para os eventos de 2007: monitorados na Bacia de Pai João e modelados por HIDROSED2 (parâmetro Kv calibrado para o período)	81
Figura 5.15 – Curva-chave de vazões da seção de controle da bacia de Santo Antônio, no ano de 2007	83
Figura 5.16 – Fotos do riacho principal da Bacia de Santo Antônio e de rio com semelhante coeficiente de Manning, conforme apresentado por Chow (1959)	84
Figura 5.17 – Hietograma e hidrograma diários da Bacia de Santo Antônio (período de 01/01/07 a 31/12/07).....	85
Figura 5.18 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da Bacia de Santo Antônio para dados do ano de 2007. O ponto em destaque (bola preta) representa dado excluído por ter apresentado concentração com ordem de grandeza superior às demais, obtidas em condições semelhantes.....	86
Figura 5.19 – Curva S de sedimentos para os eventos de 2007 monitorados na Bacia de Santo Antônio, calibração do Modelo HIDROSED2	91
Figura 5.20 – Relação entre concentração de sólidos totais e sólidos suspensos presentes nas amostras de escoamento superficial coletadas nas Bacias de Aiuaba, Pai João e Santo Antônio	93

Figura 5.21 – Curvas granulométricas do material de leito coletado nos rios principais das três bacias Aiuaba, Pai João e Santo Antônio	97
Figura 5.22 – Relação entre K_v , parâmetro de transporte (modelo HIDROSED2) e CP, fator combinado (USLE) para bacias de clima tropical semi-árido (Aiuaba, Sumé-PB); temperado (Länenbachtal e Nünzenberg, Suíça); e tropical sub-úmido (Pai João e Santo Antônio)	100

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - Área da bacia hidrográfica
- B - Razão de bifurcação da bacia.
- c - Concentração de sólidos suspensos
- C - Fator que representa a vegetação e usos do solo
- CP - Fator combinado que representa a vegetação, usos do solo e práticas conservacionistas
- d - Diâmetros representativos da partícula
- d_{10} - Diâmetro de 10% do que passa
- d_{30} - Diâmetro de 30% do que passa
- d_{50} - Diâmetro de 50% do que passa
- d_{70} - Diâmetro de 70% do que passa
- d_{90} - Diâmetro de 90% do que passa
- $dq_s^{(i)}$ - Produção de sedimentos da faixa de largura
- DR - Probabilidade média 'F' de uma partícula chegar ao sistema de drenagem
- f - Adimensional para velocidade de sedimentação
- F - Probabilidade de o material erodido chegar ao sistema de drenagem
- F_R - Desnível entre a cota média do divisor e a cota do exutório
- g - Aceleração a gravidade
- K - Fator de erodibilidade do solo
- K_v - Parâmetro de transporte
- L - Fator topográfico que representa o comprimento de rampa
- L_M - Máxima distância de viagem
- L_m - Maior comprimento na bacia paralelo ao rio principal
- L_0 - Comprimento de encosta
- \dot{M}_e - Massa de sedimentos que entra no sistema
- \dot{M}_s - Massa de sedimentos que sai do sistema
- n - Coeficiente de rugosidade de *Manning*
- p - Função densidade de probabilidade que representa $F(x,w)$
- P - Fator que representa as práticas conservacionistas
- q_B - Descarga de sedimento de fundo por unidade de largura
- Q_L - Descarga líquida média

Q_{LI} - Descarga líquida instantânea
 Q_S - Descarga sólida
 Q_{SF} - Descarga sólida de fundo
 Q_{SOL} - Descarga sólida total
 Q_{SS} - Descarga sólida em suspensão
 R - Fator de erosividade da chuva
 R^2 - Coeficiente de determinação
 R_H - Raio hidráulico da seção molhada
 S - Fator topográfico que representa a declividade
 S_f - Declividade da linha de energia
 S_N - Declividade média do rio principal
 S_0 - Declividade longitudinal do rio
 w - Largura do leito do canal
 w_0 - Comprimento da rede de drenagem
 x - Divisor de águas
 x_0 - Posição inicial da erosão efetiva
 γ - Peso específico do fluido
 γ_s - Peso específico da partícula
 $\Delta M/\Delta t$ - Variação da massa de sedimentos no tempo
 ε - Erosão bruta
 $\bar{\varepsilon}$ - Erosão bruta média
 λ_1 - Adimensional originado da restrição de probabilidade
 λ_2 - Adimensional originado da restrição de conservação de massa
 ν - Coeficiente de viscosidade cinemática do fluido
 ρ - Massa específica da água
 ρ_s - Massa específica do sedimento
 τ_0 - Tensão de atrito da água sobre o leito
 Φ - Parâmetro de intensidade de transporte de Einstein
 Φ' - Parâmetro de intensidade de transporte de Brown
 Ψ - Parâmetro adimensional de intensidade de fluxo
 ω - Velocidade de sedimentação
 Ω - Potência de corrente

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Problema do Sedimento	2
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Estrutura da Dissertação	3
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Erosão, transporte e produção de sedimentos	4
2.2. Estudos sobre sedimentos em regiões semi-áridas.....	5
2.3. Medição de transporte de sedimentos.....	6
2.3.1. <i>Amostragens de sedimentos em suspensão e análises de laboratório.....</i>	<i>8</i>
2.3.2. <i>Descargas sólidas em rios e curva-chave de sedimentos.....</i>	<i>9</i>
2.3.3. <i>Contribuição da carga de leito para a descarga sólida total de sedimentos.....</i>	<i>11</i>
2.4. Classificação de Modelos.....	13
2.5. Modelagem de produção de sedimentos	14
2.5.1. <i>Modelos na Literatura</i>	<i>15</i>
2.5.2. <i>Modelo HIDROSED2</i>	<i>19</i>
3. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	24
3.1. Bacia Experimental de Aiuaba (BEA)	24
3.1.1. <i>Localização e Características Gerais</i>	<i>24</i>
3.1.2. <i>Características Físicas e Climáticas da Bacia</i>	<i>25</i>
3.1.3. <i>Solos</i>	<i>27</i>
3.1.4. <i>Geologia</i>	<i>28</i>
3.1.5. <i>Vegetação</i>	<i>30</i>
3.2. Bacias de Pai João (BPJ) e Santo Antônio (BSA).....	31
3.2.1. <i>Localização e Características Gerais</i>	<i>31</i>
3.2.2. <i>Características Físicas e Climáticas das Bacias</i>	<i>32</i>
3.2.3. <i>Solos</i>	<i>34</i>
3.2.4. <i>Geologia</i>	<i>35</i>
3.2.5. <i>Vegetação, Uso e Ocupação da Área.....</i>	<i>37</i>
3.4. Comparação entre as áreas.....	43
4. MATERIAL E MÉTODOS	44
4.1. Bacia Experimental de Aiuaba.....	44
4.1.1. <i>Instrumentação e Monitoramento</i>	<i>44</i>
4.1.2. <i>Medição da Carga de Sedimentos</i>	<i>46</i>
4.1.3. <i>Modelagem da Produção de Sedimentos com o HIDROSED2</i>	<i>47</i>
4.1.4. <i>Equações Empíricas de Avaliação de SDR.....</i>	<i>50</i>

4.2. Bacias de Pai João e Santo Antônio	51
4.2.1. <i>Instrumentação e Monitoramento</i>	51
4.2.2. <i>Medição e Estimativa de Vazões Afluentes</i>	52
4.2.3. <i>Medição da Descarga Sólida em Suspensão.....</i>	54
4.2.4. <i>Modelagem da Taxa de Transporte de Fundo.....</i>	54
4.2.5. <i>Avaliação da Produção de Sedimentos na Bacia de Pai João.....</i>	57
4.2.6. <i>Simulação com HIDROSED2 na Bacia de Pai João</i>	59
4.2.7. <i>Avaliação da Produção de Sedimentos na Bacia de Santo Antônio</i>	61
4.2.8. <i>Simulação com HIDROSED2 na Bacia de Santo Antônio</i>	61
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1. Bacia Experimental de Aiuaba (BEA)	64
5.1.1. <i>Medição da Carga de Sedimentos</i>	64
5.1.2. <i>Modelagem da Carga de Sedimentos com HIDROSED2.....</i>	65
5.1.3. <i>Avaliação da Produção de Sedimentos no Período 2003 - 2007</i>	67
5.2. Bacia de Pai João	72
5.2.1. <i>Estimativa de Vazões Afluentes</i>	72
5.2.2. <i>Estimativa da Descarga Sólida em Suspensão.....</i>	74
5.2.3. <i>Estimativa da Taxa de Transporte de Fundo</i>	76
5.2.4. <i>Avaliação da Produção de Sedimentos</i>	78
5.2.5. <i>Modelagem da Produção de Sedimentos com HIDROSED2</i>	80
5.3. Bacia de Santo Antônio	83
5.3.1. <i>Estimativa de Vazões Afluentes</i>	83
5.3.2. <i>Estimativa da Descarga Sólida em Suspensão.....</i>	86
5.3.3. <i>Estimativa da Taxa de Transporte de Fundo</i>	88
5.3.4. <i>Avaliação da Produção de Sedimentos</i>	89
5.3.5. <i>Modelagem da Produção de Sedimentos com HIDROSED2</i>	90
5.4. Comparação Entre os Diferentes Contextos Geoambientais.....	93
5.4.1. <i>Descarga Sólida em Suspensão.....</i>	93
5.4.2. <i>Descarga Sólida de Fundo</i>	96
5.4.3. <i>Resumo dos Resultados das Três Bacias.....</i>	98
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1. INTRODUÇÃO

A erosão, o transporte e a deposição de sedimentos são questões ambientais que afetam a sociedade através do decréscimo da produtividade agrícola, da diminuição da capacidade dos reservatórios, da intensificação das inundações e da redução da disponibilidade hídrica, entre outros.

No Ceará, as barragens suprem mais de 90% da demanda hídrica do Estado. Entretanto, a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas tem afetado a disponibilidade de água através do assoreamento e conseqüente redução da capacidade de armazenamento de água e vida útil dos reservatórios (ARAÚJO *et al.*, 2005; 2006).

Um dos processos com grande dificuldade de modelagem é o impacto dos diferentes usos do solo sobre o sistema hidro-sedimentológico, uma vez que isso afeta a erosão bruta, o transporte difuso de sedimentos e o balanço hídrico do solo. No caso do Ceará, a dificuldade dessa avaliação é agravada pela carência de dados primários.

Dentro deste contexto se insere o desenvolvimento desta pesquisa, que visa à realização de medidas e modelagem de processos erosivos em bacias hidrográficas sob diferentes condições geoambientais.

Dessa forma, para que modelos de processos erosivos sejam ajustados e validados é necessário o levantamento de dados em áreas monitoradas. Esta aplicação visa melhorar a qualidade da análise técnica necessária para que sejam propostas medidas mitigadoras sobre a produção de sedimentos, de forma a contribuir para uma avaliação consistente da disponibilidade hídrica, o que é fundamental para o planejamento e gestão dos recursos hídricos no estado.

Esta pesquisa realizou-se no âmbito do projeto PROSED (processo nº 552411 / 2005-1 - Edital MCT / CNPq / CT-HIDRO nº 13 / 2005), que visou avaliar a produção de sedimentos e verificar o desempenho de modelos hidro-sedimentológicos para a previsão de produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas.

1.1. Problema do Sedimento

A erosão hídrica, seja de forma natural (geológica) ou induzida pelo antropismo, promove a desagregação e o deslocamento de partículas sólidas, através da energia de impacto da gota de chuva no solo e das forças geradas devido à ação do escoamento das águas depositando-os geralmente nas áreas topograficamente mais planas.

As conseqüências indesejáveis da erosão incluem a desestabilização e movimentos de massa nas encostas e a perda gradual de fertilidade dos solos, esta última trazendo prejuízos diretos às atividades agrícolas (CARVALHO, 1994).

O excesso de sedimentos transportado na água causa impactos negativos em sua qualidade, aumentando a turbulência e o transporte de poluentes, assim como reduzindo a zona fótica e, conseqüentemente, a produção primária de oxigênio. Outro impacto negativo ocorre em decorrência do assoreamento de rios e de reservatórios.

O assoreamento de reservatórios causa impactos negativos na disponibilidade hídrica, referentes aos aspectos qualitativos (comprometimento da qualidade da água principalmente em períodos secos) e quantitativos. Araújo *et al.* (2006) avaliaram o impacto do assoreamento na disponibilidade hídrica do Ceará, concluindo que a vazão regularizável com 90% de garantia decai cerca de $380 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ anualmente no estado somente por causa do assoreamento dos reservatórios.

1.2. Objetivos

Objetivo Geral

O objetivo central desta dissertação é avaliar a influência dos contextos geoambientais na produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas.

Objetivos Específicos

São objetivos específicos do trabalho:

- i. Medir, em três bacias hidrográficas sob diferentes contextos geoambientais, a produção de sedimentos.

- ii. Avaliar o desempenho de um modelo hidro-sedimentológico para previsão de produção de sedimentos nas bacias;
- iii. Analisar os resultados experimentais e compará-los com os resultados do modelo de base física;
- iv. Comparar a estimativa de produção de sedimentos das três bacias, de forma a avaliar a influência dos diferentes níveis de ocupação humana e usos do solo.

1.3. Estrutura da Dissertação

Além deste primeiro capítulo de introdução, com a colocação do problema de pesquisa, seguido dos objetivos a serem atingidos, esta dissertação está estruturada em mais cinco capítulos. O segundo apresenta a base conceitual e revisão de literatura sobre o tema: erosão, transporte e produção de sedimentos. No terceiro capítulo faz-se uma breve caracterização das áreas estudadas, destacando aspectos relacionados à fisiografia, clima, solos, litologia, vegetação, uso e ocupação das bacias hidrográficas. No quarto capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa. No quinto capítulo são apresentados os resultados obtidos, relacionados aos aspectos de medição e modelagem da produção de sedimentos, além da discussão acerca destes. Por fim, no sexto capítulo são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros na área.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Erosão, transporte e produção de sedimentos

Carvalho (1994) define erosão como o fenômeno de desgaste das rochas e solos com desagregação, deslocamento ou arraste das partículas por ação da água e outros agentes.

A erosão ocorre por condições naturais, sendo a superfície topográfica resultado do processo de erosão e deposição que formou o local ao longo das eras geológicas. Este fenômeno é variável em termos de tempo e espaço, varia também com a litologia, condições climáticas e de cobertura vegetal sobre uma área em particular. Entretanto, essas condições aplicam-se à erosão natural, que é um processo contínuo. As condições que afetam a erosão podem ser modificadas como resultado da interferência humana, principalmente pelo desmatamento e atividades agrícolas, acelerando desse modo a taxa de erosão (BOGÁRDI, 1974).

O transporte de sedimentos é um processo que envolve remoção, transporte e deposição de material e faz parte da evolução da paisagem, originando as formas geomorfológicas (SANTOS *et al.*, 2001).

Por sua vez, a produção de sedimentos é definida, segundo De Vente *et al.* (2007), como a parte do material erodido, originado de processos de erosão de solo, que são transportados além de um ponto de referência em uma bacia, usualmente o exutório.

A produção de sedimentos é resultado de uma série de processos de erosão e deposição e, assim, é dependente das variáveis que afetam a erosão e o transporte difuso e/ou concentrado. A erosão de solo depende da topografia local, das propriedades do solo, do clima e da cobertura vegetal, enquanto que o transporte é influenciado pela morfologia da bacia, por características da rede de drenagem e pelo uso do solo (VERSTRAETEN e POESEN, 2001).

Estimativas de produção de sedimentos são chaves para a compreensão das relações entre variabilidade natural e mudanças antropogênicas, e como esses fatores influenciam o transporte de água e sedimento em bacias hidrográficas (RESTREPO *et al.*, 2006).

2.2. Estudos sobre sedimentos em regiões semi-áridas

O transporte de sedimentos é bem documentado em rios perenes de climas úmidos e temperados, mas tem sido menos estudado em rios do semi-árido, apesar de estes serem conhecidos por sua alta eficiência de transporte (REID E LARONNE, 1995 *apud* ACHITE E OUILLON, 2007).

Segundo Onda *et al.* (2007), em regiões semi-áridas os solos têm baixo teor orgânico e grande percentual de silte, o que resulta em alta susceptibilidade à erosão. Dessa forma, a erosão acelerada em áreas cultivadas do semi-árido pode conduzir a um processo de desertificação, que é um problema chave no que diz respeito ao ambiente global.

Alguns estudos sobre erosão e transporte de sedimentos têm sido conduzidos em zonas semi-áridas, como os citados nos parágrafos seguintes.

Cantón *et al.* (2001), apresentaram síntese de seis anos de monitoramento de erosão e escoamento em microbacias de uma área experimental instrumentada no semi-árido Espanhol. Concluíram que o processo de erosão nas áreas estudadas é limitado pela escassez de eventos de chuva com energia suficiente para gerar escoamento e transporte de sedimentos, o que resultou em baixas taxas de erosão, mas que não é possível generalizar este resultado para áreas semi-áridas do Mediterrâneo com outras litologias, que apresentam altas taxas de erosão.

Zhu *et al.* (2002), monitoraram água e sedimentos em uma bacia Experimental (0,22 Km²) de primeira ordem, localizada no semi-árido da China. Avaliaram variações nas descargas de sedimentos de 15 eventos monitorados em um período de 2 anos. Destacam que o monitoramento da resposta de eventos naturais em regiões áridas e semi-áridas é sempre problemático devido à baixa frequência desses eventos.

Srinivasan *et al.* (2003), apresentaram estudos de medição de escoamento superficial e erosão de solo durante duas décadas na Bacia Experimental de Sumé, localizada na região semi-árida da Paraíba. Destacam a necessidade de uma base longa e confiável de dados da região, que exige a continuidade desse tipo de trabalho e instalação de novas bacias experimentais, bem como o aprimoramento de técnicas de modelagem para a previsão de escoamento e erosão.

Navas *et al.* (2005), em estudo na bacia do Rio Ebro (Espanha), caracterizada pela grande diversidade fisiográfica, analisaram dados de erosão utilizando o método de traçadores naturais (radio isótopo ^{137}Cs) em três áreas caracterizadas como: árida (precipitação anual < 250 mm), semi-árida (precipitação anual 400-450 mm) e temperada (precipitação anual 900-1100 mm). Avaliaram a influência do solo e da fisiografia afetando a erosão e processos de sedimentação e seus resultados mostram que as maiores erosões e deposições foram encontradas na área semi-árida.

Achite e Ouillon (2007), quantificaram o transporte de sedimentos em uma bacia (2.480 Km²) do semi-árido da Argélia. Analisaram a variabilidade temporal de sedimentos transportados com base em dados de mais de 22 anos de monitoramento de concentrações de sedimentos em suspensão e descargas líquidas, obtendo curvas-chave de sedimentos a partir de 702 medições e produção de sedimentos média de 136 ton. km⁻². ano⁻¹.

Onda *et al.* (2007), apresentaram dados de monitoramento de água e sedimento de um período de dois anos em duas pequenas bacias experimentais com diferentes percentuais de cobertura vegetal em áreas semi-áridas da Mongólia. A produção de sedimento para o período em estudo foi contabilizada como resultado de apenas seis eventos chuva-deflúvio. Destacam que a degradação da terra pelo excesso de pastagens e a perda da cobertura vegetal tem contribuído para o aumento da superfície de erosão na Mongólia.

2.3. Medição de transporte de sedimentos

Segundo Verstraeten e Poesen (2001), medições de cargas de sedimentos podem ser feitas por vários métodos como, por exemplo, monitorando cargas de sedimentos em suspensão e descargas de água; utilizando curvas-chave; medindo a carga total de sedimentos erodidos e depositados, no caso de microbacias; medindo a massa de sedimentos assoreados em reservatórios e lagos.

Entre os métodos citados, refere-se nesta dissertação a apenas os métodos de monitoramento de descargas sólidas e líquidas em rios e estabelecimento de curvas-chave, por serem estes utilizados nesta pesquisa com a finalidade de estimar a produção de sedimentos nas bacias hidrográficas estudadas.

Segundo Chella *et al.* (2005), a quantificação da descarga sólida em um rio é o passo inicial para prevenir e controlar problemas causados pela deposição de sedimentos. Dessa forma, para determinação da descarga sólida em um rio, ou seja, a quantidade de sedimentos que passa em uma seção transversal por unidade de tempo, amostragens de sedimentos são necessárias.

Faz-se, abaixo, um resumo dos principais conceitos apresentados por Santos *et al.* (2001), para melhor compreensão do processo de amostragem e medição de sedimentos transportados em rios.

A carga total de sedimentos é composta por materiais fornecidos pelos processos químicos, físicos e biológicos que governam a erosão. No processo fluvial de transporte de sedimentos podem-se distinguir três tipos de cargas: dissolvida, em suspensão e do leito. Embora não exista uma separação clara entre as cargas de leito (arraste e saltação) e as cargas em suspensão, divide-se a descarga sólida total em descarga sólida de leito, descarga sólida em suspensão e descarga sólida dissolvida.

Carga dissolvida – A carga dissolvida dos cursos d'água é composta pelos constituintes intemperizados das rochas, transportados em solução química principalmente pelo escoamento subterrâneo. Entretanto, existem situações em que o escoamento superficial pode contribuir para a carga dissolvida (por exemplo, carreamento de fertilizantes) por meio de um processo conhecido como poluição difusa.

Carga em suspensão – As partículas de granulometria reduzida, como silte, argila e algumas granulometrias de areia são pequenas o suficiente para que sejam transportadas pelo fluxo turbulento, misturadas à água na forma de uma solução heterogênea, constituindo a carga de sedimentos em suspensão. A distinção entre carga em suspensão e carga de leito baseia-se mais no mecanismo de transporte do que no tamanho da partícula. É a parte do transporte mais bem estudada, em função de sua importância relativa à carga dissolvida, e pela facilidade de medição em campo, em comparação aos métodos de medição de carga de leito.

Carga de leito – é composta por sedimentos de granulometria maior, como as areias e cascalhos, que permanecem junto ao fundo do canal e são transportados por meio de

saltitamento e arraste. De uma maneira geral, quanto maior a carga transportada pelo rio e maior a granulometria do material, maior será o volume transportado junto ao leito.

2.3.1. Amostragens de sedimentos em suspensão e análises de laboratório

As coletas de sedimentos em suspensão são realizadas com amostradores que capturam uma mistura de água e sedimentos, causando distúrbios mínimos nas condições naturais de escoamento no canal. Um amostrador de sedimentos como o apresentado na Figura 2.1, possui garrafas removíveis que são transportadas ao laboratório para serem realizadas as análises que determinam a concentração de sedimentos presente nas amostras e dessa forma estimar as descargas sólidas em suspensão ou transporte de sedimentos em rios. O sedimento transportado entre o bocal do amostrador e a superfície da água é denominado de carga medida, enquanto que a parte entre o bocal amostrador e o leito do canal é a carga não medida, que corresponderia à zona de transporte de fundo, com aproximadamente 10 cm de altura (CHANG, 1988).

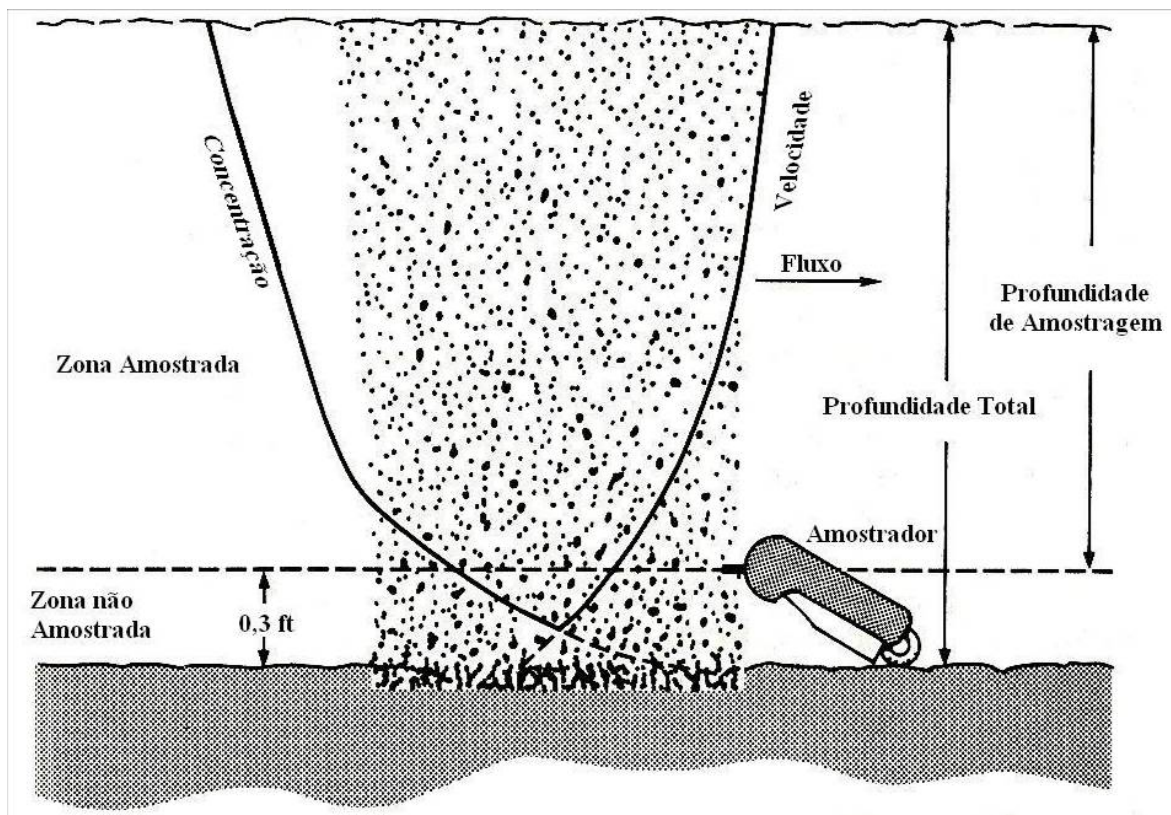


Figura 2.1 – Amostragem de sedimentos em suspensão e zona não amostrada em rios com respectivos perfis de velocidade de fluxo e concentração de sedimentos em suspensão. Fonte: Adaptado de Chang (1988).

Em análises de concentração de sedimentos em laboratório, muitas vezes determina-se a partir da amostra a soma da carga de sedimentos em suspensão e carga dissolvida, designada como “sólidos totais”. Isto é realizado evaporando-se toda a água da amostra e pesando-se o resíduo sólido. A razão entre a massa desse resíduo e a massa da amostra constitui a “concentração de sólidos totais”. Para obter apenas a concentração relativa à carga em suspensão, designada como “sólidos suspensos totais” a separação da água e dos sólidos deve ser feita por filtragem, pois a carga dissolvida não é retida pelo filtro, segundo Santos *et al.* (2001). Esta é a fração considerada na estimativa de produção de sedimentos em bacias. O esquema do ensaio para a determinação da carga em suspensão é apresentado na Figura 2.2.

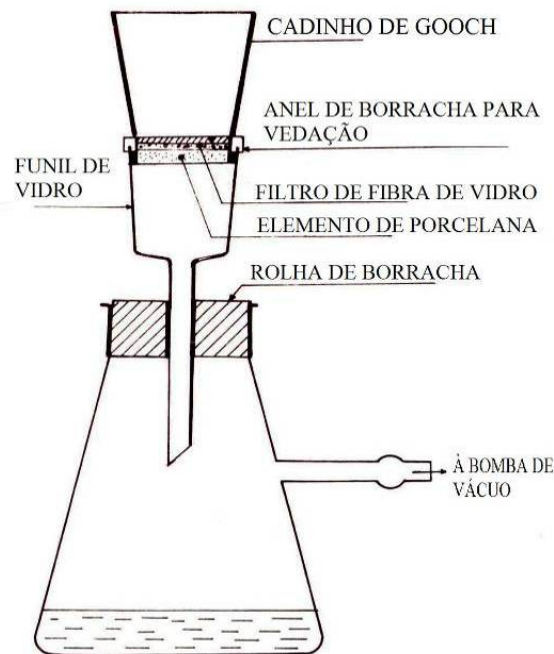


Figura 2.2 – Esquema de filtragem de amostras para a determinação das concentrações de sólidos em suspensão, separação entre cargas em suspensão (retidas no filtro) e cargas dissolvidas que ficam misturadas a parte líquida das amostras, que passam pelo filtro. Fonte: Carvalho (1994).

2.3.2. Descargas sólidas em rios e curva-chave de sedimentos

A distribuição dos sedimentos no tempo está relacionada ao comportamento da vazão, ou seja, os maiores volumes de sedimentos são transportados pelas maiores vazões. Embora não seja linear e sofra grandes variações no espaço e no tempo, esta relação permite associar a massa

de sedimentos transportados na unidade de tempo, ou descarga sólida, às vazões líquidas ocorridas na estação de medição, originando a “curva-chave de sedimentos” ou “curva de descarga sólida” (SANTOS *et al.*, 2001).

Vários fatores devem ser conhecidos e considerados ao aplicar-se a curva-chave de sedimentos. A curva-chave de sedimentos correlaciona a descarga de sólidos em suspensão unicamente à vazão, mas na realidade esse transporte não depende somente da capacidade do fluxo em transportar sólidos, mas de outros fatores, tais como a disponibilidade de material mobilizado, que irá depender de eventos anteriores, usos do solo. Além da dispersão normalmente observada nas curvas-chave de sedimento, há ainda a não estacionaridade da curva, já que esta pode mudar periodicamente para uma seção (BICALHO, 2006).

Segundo Vanlierde *et al.* (2005), múltiplas curvas-chave para um mesmo local têm sido utilizadas para compreender a questão da sazonalidade e/ou para estudar as diferentes partes de um hidrograma de eventos.

Apesar de todas as restrições e limitações do método, observam-se vários trabalhos em que a utilização do método chegou a resultados satisfatórios, o que o levou a ser bastante utilizado para determinação de descargas sólidas em rios e estimativa de produção de sedimentos em bacias.

Rastrepo e Kjerfve (2000), em um monitoramento na bacia do Rio Madalena (Colômbia) obtiveram uma relação entre descargas de água e cargas de sedimentos em suspensão, baseada em 55 dados a partir de medidas diárias de concentração de sedimentos em suspensão, apresentando coeficiente de determinação R^2 igual a 0,76.

Rovira *et al.* (2005), em estudo sobre transporte de sedimentos na bacia do rio Tordera (Espanha) obtiveram para uma seção monitorada três diferentes relações entre descargas líquidas e concentração de sedimentos em suspensão: para fluxo de base, para cheias primárias (aquelas que ocorrem depois de um longo período com baixos fluxos) e para cheias secundárias (aquelas que ocorrem depois de uma sucessão de cheias), além de uma curva-chave entre vazões líquidas e descargas de sedimentos de leito, objetivando com estas correlações minimizar os erros na estimativa de produção de sedimentos.

Chella *et al.* (2005), através do monitoramento sistemático de sedimentos na Bacia do Rio Barigüi (Paraná), determinaram relações entre descargas sólidas e líquidas, obtendo assim curvas-chave de sedimentos para quatro postos fluviométricos localizados na área, com coeficientes de determinação R^2 que variaram de 0,28 a 0,93. Destacam que, apesar de os dados fluviométricos nestas estações serem obtidos por meio de sensores automáticos, os dados relativos ao transporte de sedimentos eram praticamente inexistentes.

Vanlierde *et al.* (2005), monitoraram sedimentos em diferentes subbacias em uma área de 590 km² na Bélgica. Nesse estudo, para uma seção de medição de descargas de água e sedimento, foram obtidas duas curvas-chave, uma para fluxo de base e outra para eventos, a partir dos valores médios diários de descargas de água e concentrações de sedimentos.

Mao *et al.* (2005), determinaram uma curva-chave de sedimentos entre descargas de água e descargas sólidas de leito, para uma bacia Experimental (5 km²) localizada nos Alpes Italianos. A curva foi obtida a partir de medições de 22 eventos apresentando coeficiente de determinação R^2 igual a 0,78.

Chen *et al.* (2006), em estudo sobre produção de sedimentos em uma bacia (421 km²) monitorada de Taiwan em um período de seis anos, obtiveram correlações entre descargas de sedimentos em suspensão e descargas de água para várias faixas de concentração (variando de 10 mg.L⁻¹ a valores maiores que 10.000 mg.L⁻¹), os coeficientes de determinação R^2 obtidos variaram de 0,54 a 0,96. Estes resultados também foram utilizados para avaliação do modelo PSED (*Physiographic Soil Erosion-Deposition Model*) na área.

Achite e Ouillon (2007), obtiveram relações entre os valores médios diários de descargas de água e concentração de sedimentos em suspensão com base em 138 eventos. Foram determinadas quatro curvas com respectivos coeficientes de determinação, uma para todos os eventos ($R^2 = 0,578$), para eventos intermediários ($R^2 = 0,829$), para eventos extremos ($R^2 = 0,746$) e para eventos menores que a média ($R^2 = 0,970$).

2.3.3. Contribuição da carga de leito para a descarga sólida total de sedimentos

Na literatura alguns estudos relatam sobre a contribuição da carga de leito para o transporte total de sedimentos em rios, através de monitoramento desta parcela transportada, além de

estimativas realizadas por modelagem. Os resultados encontrados por diversos autores sugerem que esta parcela é bastante variável em função das características da bacia. Os valores encontrados variaram de 3% (como no caso da bacia do rio Salado, na Argentina) chegando a 83% (no caso da bacia de Tordera, na Espanha). Dessa forma, citam-se alguns trabalhos que fazem referência à carga de leito transportada em rios.

Szupiany *et al.* (2005), em avaliação sobre o transporte de sedimentos de fundo no Rio Salado (Argentina), através de medições em campo de 14 seções transversais monitoradas em um trecho de 7,3 km e aplicação de modelagem, concluíram que o transporte de fundo representa de 3% a 9% do transporte total nesta área.

Rovira *et al.* (2005), realizaram uma estimativa do balanço de sedimentos em um rio da bacia de Tordera (894 km²) na Espanha, através de medições da carga de leito e em suspensão em seções monitoradas, durante um período de três anos (1997-1999). Os resultados obtidos em campo indicaram que a carga de sedimentos que entra no rio corresponde a 80% de carga de leito e 20% em suspensão e que o sedimento exportado do rio para o mar Mediterrâneo corresponde a 83% de carga de leito e 17% em suspensão, ou seja, a maior parte do sedimento é transportado como carga de leito, mais de $\frac{3}{4}$ da carga total.

Mateos e Giráldez (2005) avaliaram metodologia de medição de sedimentos em suspensão e de fundo em canais de irrigação por sulcos, em lotes experimentais na Espanha. Concluíram que a carga de sedimentos é maior nas primeiras irrigações e diminuem com irrigações sucessivas, e ainda, que a carga de fundo representa uma pequena fração da carga total (cerca de 5%). Este fato tende a simplificar o processo de amostragem e pode ser levado em conta na modelagem de processos erosivos nestes sistemas.

Vericat e Batalla (2006), realizaram estudo sobre transporte de sedimentos no baixo Rio Ebro (Península Ibérica), entre os anos de 2002 e 2004. O transporte total de sedimentos (incluindo as cargas em suspensão e de leito) foi medido a montante e a jusante de dois reservatórios, com especial atenção durante as cheias. Com relação à carga total anual a montante das barragens, cerca de 99% é transportada em suspensão, enquanto que a jusante o estimado foi 60% de transporte em suspensão e 40% de transporte de leito.

Restrepo *et al.* (2006), avaliaram a produção de sedimentos na bacia do rio Madalena (área de drenagem igual a 257.438 Km²), localizada na Colômbia, com base em medidas diárias de descarga de água e sedimentos em suspensão em mais de 40 pontos. Em seu estudo não foi considerada a carga de leito transportada, uma vez que a contribuição desta para carga total de sedimentos foi menor que 15%, em análise realizada.

Ali e De Boer (2007), em estudo sobre a variação da produção de sedimentos na bacia do rio Indus, no Paquistão, relatam que há pouca informação sobre avaliações de transporte de fundo nesta área, entretanto, quando não há medição de cargas de leito é recomendado uma correção de 10% a 15% nas cargas de sedimento em suspensão, para estimativa de produção de sedimentos no rio Indus e seus tributários.

2.4. Classificação de Modelos

Tucci (1998), define modelo como a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Por sua vez, um modelo hidrológico é uma ferramenta desenvolvida para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas.

Para uma melhor compreensão em relação à estrutura dos modelos hidrológicos, é feita uma síntese de alguns conceitos apresentados por Tucci (1998), para a classificação destes:

- *Conceitual e empírico*. Um modelo é dito conceitual, quando as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Os modelos empíricos são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções que não têm relação com os processos físicos envolvidos. Esta definição de modelo conceitual é artificial, uma vez que funções empíricas também são usadas em sua elaboração, mesmo estando relacionadas com a física do sistema.

- *Estocástico e determinístico*. Quando o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. De outro modo, se a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada, e o modelo segue uma

lei definida que não a lei das probabilidades, o modelo e os processos são ditos determinísticos.

- *Concentrado e distribuído*. Um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial. Em geral estes modelos utilizam somente o tempo como variável independente. Um modelo é dito distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo.

2.5. Modelagem de produção de sedimentos

Segundo Santos *et al.* (2001), uma bacia hidrográfica constitui um sistema físico extremamente complexo. Dessa forma, tentativas de representá-la por um modelo matemático, por mais detalhado que este seja, constitui em uma aproximação da realidade e a adequação deste ao problema estudado só pode ser julgada pelo confronto dos resultados calculados com observações de campo.

Quando um modelo é selecionado para aplicação em uma bacia, existem pelo menos dois pontos de incertezas relacionados a este. A primeira incerteza esta associada ao próprio modelo, com relação à representação dos processos que ocorrem na bacia. A segunda fonte de incerteza está associada com os valores de parâmetros usados na modelagem (HAAN *et al.*, 1994).

Dessa forma, medidas hidrológicas são realizadas para se obter dados dos processos hidrológicos. Estes dados são úteis na compreensão destes processos, assim como para direcionar a entrada nas simulações de modelos hidrológicos para projetos, análises e tomadas de decisão (CHOW *et al.*, 1988).

Segundo Kalin *et al.* (2003), para a estimativa de escoamento e produção de sedimentos o uso de modelos hidrológicos distribuídos tem ganhado larga aceitação em relação aos modelos concentrados, por causa da sua habilidade em reconhecer a variabilidade espacial dos parâmetros topográficos e climáticos. Entretanto, os modelos distribuídos tendem a ser mais complexos e necessitar de um grande número de parâmetros a serem estimados ou medidos.

A espacial variabilidade da produção de sedimentos é um reflexo da espacial variabilidade das propriedades da bacia, bem como dos diferentes usos do solo. Além disso, diferentes regimes pluviométricos causam respostas diferentes nos processos sedimentométricos. Dessa forma, modelos de erosão e de transporte de sedimentos espacialmente distribuídos são necessários para avaliar esses problemas. Entretanto, extensas séries de dados de produção de sedimentos são necessárias para validar esses modelos (VERSTRAETEN e POESEN, 2001).

2.5.1. Modelos na Literatura

Segundo Santos *et al.* (2001) os modelos erosivos são particularmente úteis por: permitir localizar espacialmente as áreas com processos erosivos mais acentuados, favorecendo a tomada de decisões com medidas locais mais eficientes; estimar o transporte de sedimentos quantitativamente no espaço e no tempo, facilitando o planejamento da rede de monitoramento sedimentométrico; permitir estimativa de variações na carga de sedimentos devido a alterações no uso do solo previstas para o futuro, seja com a finalidade de manejo de bacias ou avaliar impactos de determinados usos agrícolas.

Apresenta-se alguns modelos encontrados na literatura, desenvolvidos para a estimativa de erosão e produção de sedimentos em bacias, alguns de caráter empírico, outros desenvolvidos a partir de bases físicas:

USLE

A Equação Universal de Perdas do Solo (USLE) foi desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978) e estabelecida com base em dados estudados em mais de 10.000 lotes com distintas características de clima, solo, relevo e cultivo, de dimensões reduzidas, e, portanto, submetidos exclusivamente, a processos de erosão hídrica superficial tipo laminar. Portanto, este é um modelo para estimativa de erosão de solo, e não de produção de sedimentos em bacias.

Entre os modelos de estimativa de erosão de origem hídrica este é o mais conhecido. É um modelo empírico, mas seu equacionamento é bastante didático para compreensão dos fatores envolvidos no processo erosivo de encostas. A Equação Universal de Perdas do Solo (2.1) é expressa por:

$$\varepsilon = R.K.L.S.C.P \quad (2.1)$$

em que: ε = taxa de erosão bruta (ton.ha^{-1}); R é o fator de erosividade da chuva em ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$); K o fator de erodibilidade do solo em ($\text{ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$); os demais fatores são adimensionais. Há dois fatores topográficos: L, que representa o comprimento de rampa e S que representa a declividade. O fator C representa a vegetação e usos do solo e o fator P representa as práticas conservacionistas. A obtenção dos parâmetros dessa equação é descrita com maiores detalhes em Haan *et al.* (1994).

MUSLE

A USLE sofreu várias modificações levando em conta suas limitações, dando origem a modelos como a MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) desenvolvida por (Williams, 1975) em que o índice de erosividade da chuva é substituído por informações do hidrograma produzido por uma chuva isolada, originando como resultado o aporte de sedimentos no exutório da bacia por eventos pluviométricos, e assim permite estimar a carga de sedimentos diretamente.

Modelo SHETRAN

O modelo SHETRAN (*Système Hydrologique Européen*) foi desenvolvido por um consórcio europeu de institutos de hidrologia (Bathurst *et al.*, 1995). É um modelo de base física, espacialmente distribuído, simula fluxo de água, transporte/deposição de sedimentos e migração de poluentes. Representa o fluxo de água em uma bacia, incorporando os principais elementos do ciclo hidrológico (interceptação, evapotranspiração, fluxo superficial e em canais, zonas saturadas e não saturadas de fluxo). A bacia é representada através de malhas. Utiliza equações de balanço de massa e energia que são resolvidas através do método de diferenças finitas, além de equações empíricas obtidas de processos experimentais.

Nos estudos de Lukey *et al.* (2000), o modelo SHETRAN foi aplicado em uma bacia no sudeste da França para avaliar o impacto do reflorestamento no escoamento e erosão de solo em áreas degradadas. Nos estudos de Figueiredo e Bathurst (2005), foi aplicado em bacias experimentais no semi-árido da Paraíba com o objetivo de avaliar diferentes níveis de degradação da vegetação e o efeito de escala na modelagem de produção de sedimentos.

Modelo WESP

O modelo WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*), desenvolvido por Lopes (1987), é um modelo distribuído e orientado a eventos, semi-conceitual, baseado na física dos processos de infiltração, escoamento superficial, erosão e deposição. A discretização da bacia é realizada na forma de planos e canais e deve ser baseada nas características de solo, topografia e cobertura vegetal. O escoamento superficial e o transporte de sedimentos são representados por equações de continuidade que são resolvidas pelo método numérico de diferenças finitas. A aplicação do modelo para simulação de escoamento superficial e produção de sedimentos se restringe a pequenas bacias hidrográficas em condições semi-áridas, onde o fluxo superficial se dá predominantemente de forma Hortoniana. Foi utilizado por Lopes (2003), em áreas experimentais do semi-árido da Paraíba, em que realizou investigação sobre o efeito de escala dos parâmetros do modelo na geração de escoamento superficial e erosão de solo.

Modelo WEPP

O WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) é um modelo para estimativa de erosão em encostas e bacias hidrográficas, de simulação contínua e parâmetros distribuídos que incluem precipitação e intensidade, textura e umidade do solo, e ainda parâmetros relacionados à cobertura vegetal e a fisiografia da área. Para aplicação em encostas é dividido em componentes conceituais de: geração climática, irrigação, hidrologia, solos, decomposição residual, hidráulica, fluxo superficial e erosão. É capaz de simular destacamento, deposição e transporte de sedimentos (FLANAGAN & LIVINGSTON, 1995). Foi utilizado, por exemplo, nos estudos de Sparovek *et al.* (2005) para estimativa de processos de erosão e deposição em uma área de mata ciliar, com o objetivo de avaliar a influência desta na retenção de sedimentos. Nos estudos de Klik *et al.* (2005), este foi utilizado para avaliar transporte de sedimentos em 24 lotes com diferentes culturas em uma pequena bacia agrícola (16 ha).

Modelos MOFIPE e MODFIPE

O MOFIPE (Modelo de Base Física para Simulação de Escoamento e Erosão do Solo em Pequena Escala) é um modelo concentrado e foi desenvolvido para simular escoamento e erosão de solo em pequenas bacias. No modelo, os processos envolvidos (precipitação, evapotranspiração, infiltração, escoamento e erosão) são simulados com base nas suposições de que o sistema da bacia é homogêneo, a precipitação não varia no espaço, e o sistema de

drenagem não é considerado. Considera as condições físicas através de parâmetros mensuráveis, não necessariamente calibráveis (DAVI, 2004 *apud* SOUSA, 2007).

O modelo MODFIPE (Modelo Distribuído de Base Física para Simulação de Escoamento e Erosão do Solo em Pequena Escala), foi desenvolvido a partir da reestruturação do MOFIPE e considera os aspectos não abordados neste modelo, tais como: a distribuição espacial das características da bacia (solo, relevo, vegetação) em planos e canais, a propagação do escoamento em duas direções ortogonais e a implementação de métodos para cálculo da evaporação. A geração de hidrogramas e sedigramas dos eventos é realizada de forma contínua (SOUSA, 2007).

Modelo KINEROS2

O KINEROS2 (*Kinematic runoff and erosion model*) é um modelo orientado a evento, de base física, que descreve os processos de infiltração, escoamento superficial e erosão para pequenas bacias agrícolas e urbanas. Descreve a bacia como uma rede de planos e canais e utiliza a técnica das diferenças finitas na solução de equações diferenciais que descrevem o fluxo superficial, a erosão e transporte de sedimentos (WOOLHISER *et al.*, 1990).

Alguns estudos relatam a aplicação deste modelo, como por exemplo, Kalin *et al.* (2003), que avaliaram o efeito de diferentes resoluções geomorfológicas na modelagem de escoamento e erosão em pequenas bacias experimentais. Martínez-Carreras *et al.* (2007), simularam escoamento e erosão de solos em áreas degradadas de uma bacia experimental na Espanha, com base em três anos de monitoramento, com o referido modelo.

Modelo WASA-SED

O modelo hidrológico WASA (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments*), foi especificamente desenvolvido para simular geração de escoamento e disponibilidade hídrica em grandes bacias de ambientes semi-áridos. É um modelo determinístico, baseado em processos, aplicável a uma discretização espacial semi-distribuída. Os processos hidrológicos são representados por rotinas individuais de interceptação, evaporação, infiltração, escoamento superficial e subsuperficial, transpiração e recarga de água subterrânea, além de lateral distribuição de água entre as diferentes unidades espaciais. Além disso, o modelo pode

contabilizar o armazenamento nos reservatórios em uma bacia (GÜNTNER, 2002; GÜNTNER E BRONSTERT, 2003).

No projeto SESAM (*Sediment Export from large Semi-Arid Catchments: Measurement and Modelling*) o modelo WASA foi estendido para novas rotinas que descrevem o transporte de sedimentos em três diferentes níveis de trabalho: nas encostas, na rede de drenagem e em reservatórios, denominado então WASA-SED. A rotina de transporte de sedimentos em encostas, introduzida no modelo hidrológico, foi baseada na MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), e testada pela primeira vez no estudo de Appel (2006), (ver também MAMEDE, 2008).

2.5.2. Modelo HIDROSED2

O modelo HIDROSED2 é descrito com maiores detalhes, por ser objeto de estudo nesta dissertação. A aplicação do modelo nesta pesquisa visa à avaliação deste para a estimativa da produção de sedimentos na Bacia Experimental de Aiuaba, e para a previsão de produção de sedimentos de alguns eventos monitorados nas bacias de Pai João e Santo Antônio.

O HIDROSED2, desenvolvido por Araújo (2004), é um modelo de cálculo da taxa de transporte difuso de sedimentos em encostas, híbrido, de base física e probabilística para avaliação de produção de sedimentos em eventos. Dessa maneira, o modelo permite avaliar a variação da taxa de transporte difuso em uma bacia de forma temporal e espacial.

Segundo Haan *et al.* (1994), a taxa de transporte difuso (*Sediment Delivery Ratio – SDR*) é definida como a relação entre a produção de sedimentos de uma bacia e a erosão bruta nesta área.

Neste modelo a taxa de retenção difusa de sedimentos é abordada em termos de probabilidade, através de uma função densidade de probabilidade que é resolvida pelo princípio da máxima entropia. Com relação às variáveis físicas são consideradas a distância de viagem, a potência de corrente, a velocidade de sedimentação e a erosão bruta (ARAÚJO, 2007).

- *Formulação do Modelo*

As principais equações do modelo são descritas em seguida, segundo Araújo (2007):

A produção de sedimentos, em uma infinitesimal faixa de uma encosta, pode ser descrita pela equação:

$$dq_s^{(i)}(x, w) = \left[\int_{x_0}^{L_0} \varepsilon(x, w) \cdot F(x, w) \cdot dx \right] \cdot dw \quad (2.2)$$

Em que: $dq_s^{(i)}$ é a produção de sedimentos da faixa de largura ' dw ', em ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); no lado (i) do rio; ' x ' e ' w ' são as coordenadas ortogonais do sistema; ' L_0 ' é o comprimento da faixa (m); ' ε ' é a erosão bruta por unidade de área ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$); ' F ' é a probabilidade de o material erodido chegar ao sistema de drenagem saindo da distância ' x ' do divisor de águas; e ' x_0 ' é a posição inicial da erosão efetiva. Na Figura 2.3 é apresentado um esquema com a definição de variáveis do modelo.

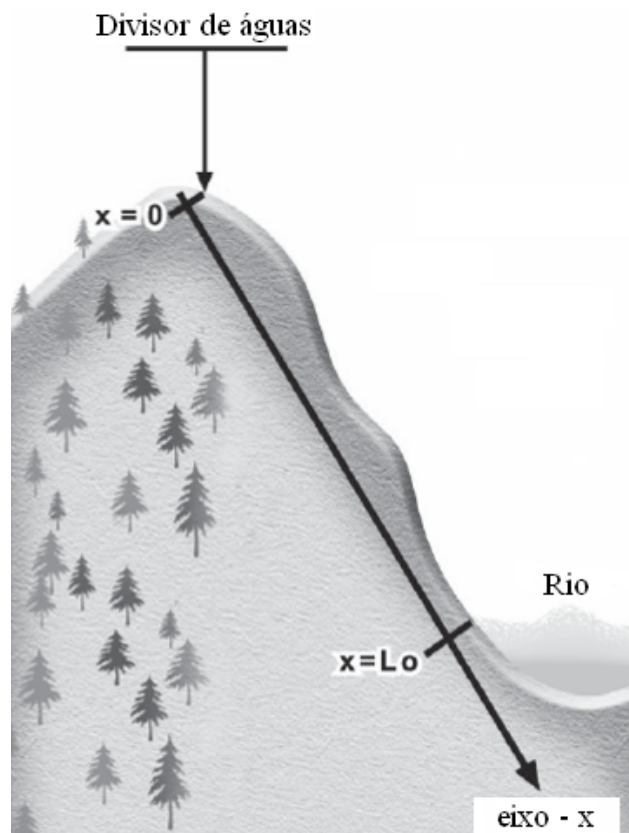


Figura 2.3 – Esquema de definição de variáveis do modelo HIDROSED2. Fonte: Adaptado de Araújo, (2007).

Para um evento hidraulicamente fraco, a maior distância de viagem $L_M < L_0$ e somente as partículas erodidas em $x \geq x_0 = L_0 - L_M$ podem chegar ao sistema de drenagem. Se o evento for hidraulicamente forte $L_M \geq L_0$ e a contribuição de sedimentos, começa do divisor de águas, portanto, $x_0 = 0$. O parâmetro L_M é função do evento hidráulico, ou seja, do poder do fluxo, assim como das características da bacia.

Integrando-se a equação (2.2) e admitindo-se as hipóteses de que a bacia é simétrica e homogênea em relação à erosão e que o conceito de retângulo equivalente é válido, chega-se à equação (2.3),

$$q_s = 2 \cdot \bar{\varepsilon} \cdot w_0 \cdot \int_{x_0}^{L_0} \left[\int_{0-x}^{L_M} p(x) \cdot dx \right] dx \quad (2.3)$$

Em que: ' w_0 ' é o comprimento da rede de drenagem; ' p ' é uma função densidade de probabilidade que representa $F(x,w)$; a multiplicação do fator '2' é devido à contribuição das encostas de ambas as margens que chega ao rio. No caso de a bacia ser admitida homogênea, a distribuição da erosão bruta $\varepsilon(x,w)$, pode ser representada por um valor médio $\bar{\varepsilon}$.

Para a aplicação em grandes e médias bacias, estas devem ser subdivididas em subbacias ou células, que não transferem sedimento para nenhuma outra célula, exceto através do sistema de drenagem. Aplicando-se o conceito de taxa de transporte difuso de sedimentos, determina-se a equação (2.4)

$$q_s = \bar{\varepsilon} \cdot A \cdot DR \quad (2.4)$$

em que, A corresponde à área da bacia.

O termo DR pode ser interpretado como a probabilidade média 'F' de uma partícula, uma vez em movimento, chegar ao sistema de drenagem. Dessa forma, para se calcular o termo DR, faz-se necessário conhecer a função densidade de probabilidade, mencionada na equação (2.3), ainda não identificada.

Para determinar a função densidade de probabilidade, Araújo (2007), utilizou o princípio da entropia máxima. A função de entropia foi então maximizada sob duas restrições: a primeira

restrição refere-se à propriedade fundamental da função probabilidade e a segunda restrição refere-se ao princípio da conservação de massa.

A função densidade de probabilidade obtida foi (2.5):

$$p(x) = e^{\lambda_1 - 1} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot x} \quad (2.5)$$

em que: λ_1 (adimensional) foi originado da restrição de probabilidade e λ_2 (m^{-1}) foi originado da restrição de conservação de massa (referido posteriormente apenas como λ).

Aplicando-se na equação (2.3) a função densidade de probabilidade obtida e resolvendo esta, obtém-se, a equação de entropia para produção de sedimentos (2.6) em encostas ou células com área 'A', comprimento de encosta ' L_0 ', para um evento que produz uma erosão bruta média $\bar{\varepsilon}$, e com máxima distância de viagem ' L_M '.

$$q_s = \bar{\varepsilon} \cdot A \cdot \frac{e^{\lambda \cdot L_M} \cdot (L_0 - x_0) \cdot \lambda - (e^{\lambda \cdot (L_0 - x_0)} - 1)}{\lambda \cdot L_0 \cdot (e^{\lambda \cdot (x_0 + L_M)} - 1)} \quad (2.6)$$

A equação (2.6) tem dois parâmetros (λ e L_M), que são calculados com base nas variáveis físicas potência de corrente, velocidade média de sedimentação e a erosão bruta. As equações para determinação dessas variáveis são descritas com maiores detalhes por Araújo (2007).

- Parâmetro K_v

Neste modelo foi gerado um único parâmetro a ser calibrado, denominado parâmetro de transporte K_v . Segundo Araújo (2007), este parâmetro está diretamente relacionado à distância de viagem do sedimento e inversamente relacionado à eficiência de retenção de sedimento pela encosta devido à cobertura vegetal e a morfologia, de acordo com a equação 2.7.

$$\int_0^{L_0} x \cdot p(x) = K_v \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho} \right) \cdot \frac{\Omega \cdot L_0}{g \cdot \bar{\varepsilon} \cdot \omega} \quad (2.7)$$

em que: Ω = potência de corrente ($W \cdot m^{-2}$); ρ = massa específica da água ($kg \cdot m^{-3}$); ρ_s = massa específica do sedimento ($kg \cdot m^{-3}$); e ω = velocidade de sedimentação ($m \cdot s^{-1}$).

O modelo assume que só há produção de sedimentos nas encostas, despreza o que é produzido no sistema de drenagem, sendo, portanto, aplicável somente em sistemas em que as erosões e deposições na rede de drenagem se compensam. A aplicação do modelo consiste então, no seguinte procedimento: seleção de eventos pluviométricos com geração de deflúvio; divisão da bacia em sub-bacias quando for necessário, dependendo de características como solo, vegetação e fisiografia da área; cálculo da erosão bruta para cada evento e sub-bacia; determinação do sedimento produzido nas encostas e estimativa da produção de sedimentos da área.

Para a aplicação em bacias não monitoradas, em que não é possível calibrar o parâmetro K_v , Araújo (2007) apresentou correlações obtidas entre este parâmetro e o fator CP combinado (representa a vegetação, usos do solo e práticas conservacionistas) da USLE para bacias de clima tropical e clima temperado (Figura 2.4).

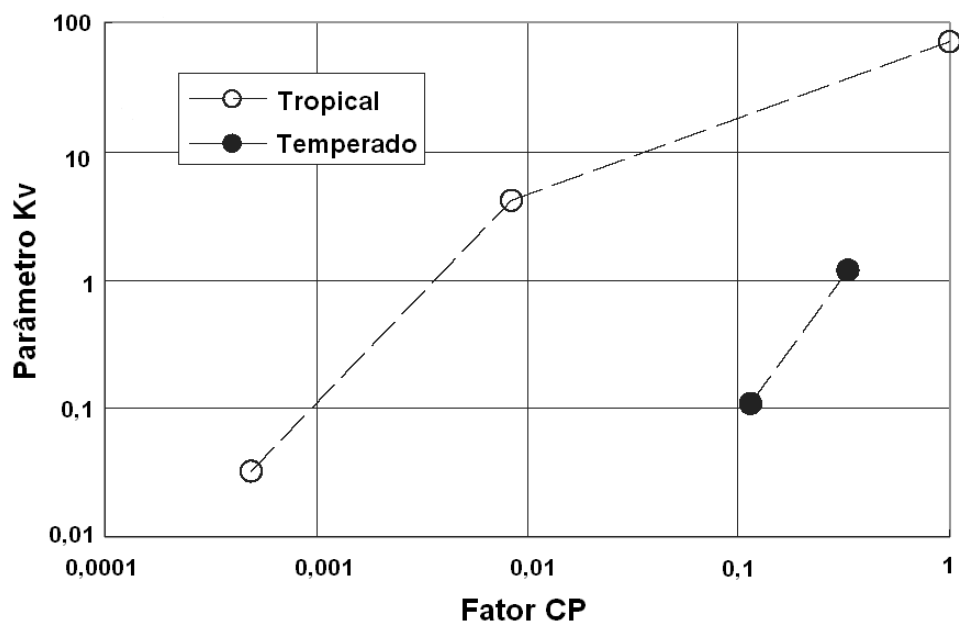


Figura 2.4 - Variação do parâmetro de transporte K_v como uma função do fator combinado CP (USLE) para três bacias de clima tropical e duas de clima temperado. Fonte: Araújo (2007)

3. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO

3.1. Bacia Experimental de Aiuaba (BEA)

3.1.1. Localização e Características Gerais

A bacia Experimental de Aiuaba está situada na Estação Ecológica (ESEC) do Município de Aiuaba – CE, a sudoeste do Estado do Ceará, na região Inhamuns (Figura 3.1), sob administração do IBAMA. O Município de Aiuaba tem uma área de 2.597 Km², uma população estimada em 20.937 habitantes e está localizado a aproximadamente 430 km de Fortaleza. A área de estudo dista cerca de 40 km da sede do município com acesso através de via vicinal.

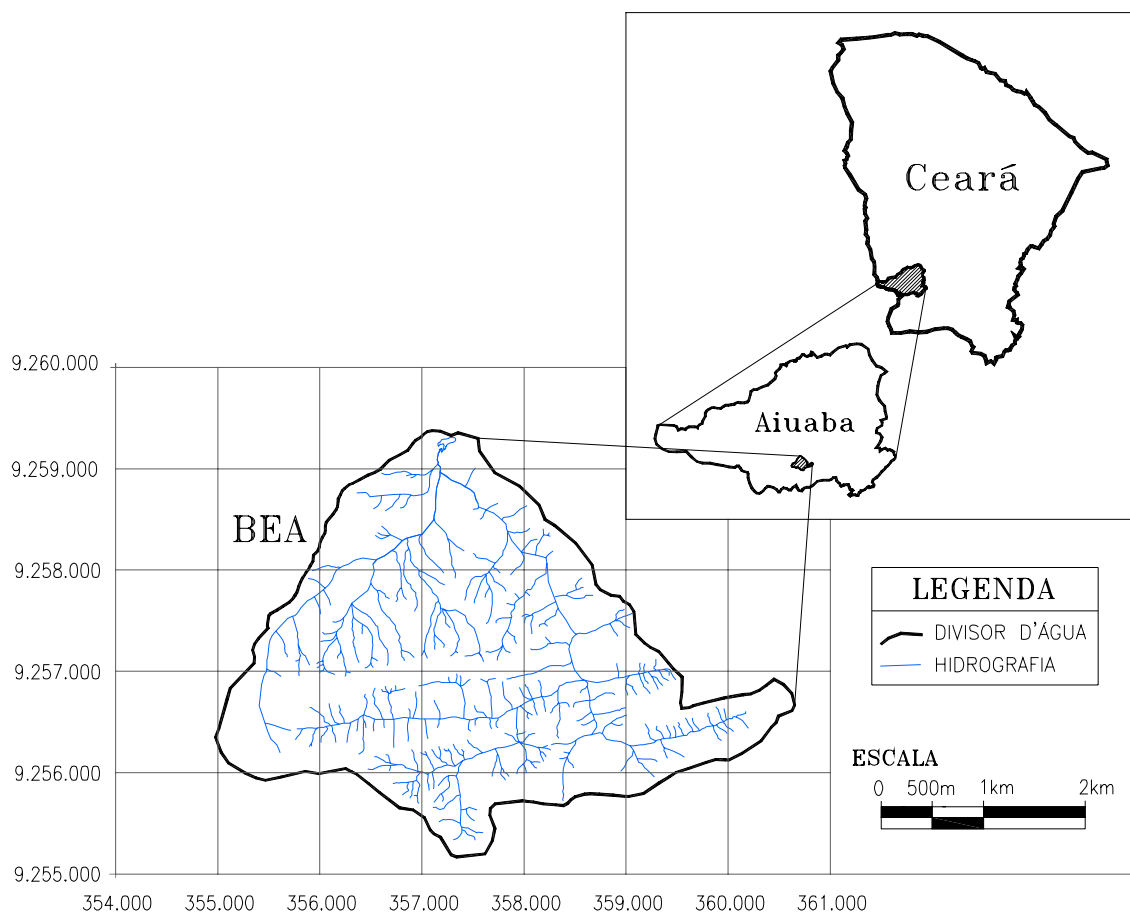


Figura 3.1- Localização da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) em relação ao Estado do Ceará e ao Município de Aiuaba.

A ESEC possui área de 11.525 ha, destacando-se em importância por ser a maior Unidade de Conservação Federal do bioma caatinga, coberta integralmente com floresta de caatinga-arbórea densa. A Estação está associada à manutenção da biodiversidade florística e faunística do bioma caatinga e representa um importante papel para o ciclo hidrológico da região devido à sua cobertura florestal densa (ARAÚJO *et al.*, 2004).

A Bacia Experimental de Aiuaba tem sido monitorada desde janeiro de 2003. Inicialmente, através do Projeto IBESA (Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido), foram instalados instrumentos para medição hidrológica. Desde então, nessa área tem sido realizado além da medição e análise de variáveis hidrológicas como precipitação, evaporação e escoamento superficial, um estudo de perdas por interceptação em um sítio experimental (Medeiros, 2005; Medeiros e Araújo, 2005), estudos sedimentológicos e hidrogeológicos.

3.1.2. Características Físicas e Climáticas da Bacia

Situada numa das áreas mais secas, a sudoeste do Estado do Ceará, Aiuaba apresenta uma média de precipitação pluviométrica de 570 mm (série histórica de 1978 a 2007, Posto Aiuaba, FUNCEME, 2008). A variação anual da precipitação é apresentada na Figura 3.2, pelas médias mensais.

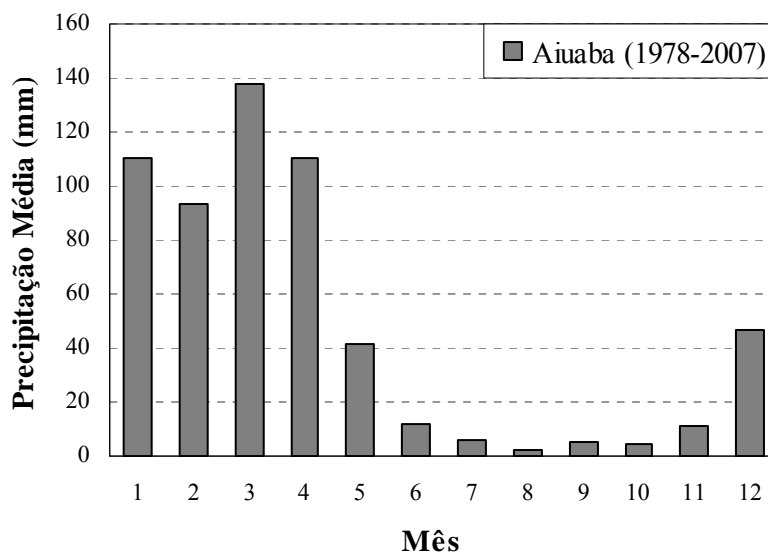


Figura 3.2 – Precipitação média mensal, Posto Aiuaba (1978-2007), Fonte: série histórica FUNCEME (2008)

Dados climatológicos foram medidos em Tauá no período de 1961-1990. Registrou-se temperatura média anual de 26,6°C com baixa amplitude entre os meses (até 2°C); temperatura máxima média anual de 31,6°C; temperatura mínima média anual de 21°C; umidade relativa do ar média anual de 61,6%, com máxima em abril de 78% e mínima em setembro de 44%; e insolação total média anual de 2.540 horas, com máxima em agosto de 310 horas e mínima em março de 148 horas (DNMET, 1992 *apud* COSTA, 2007).

A Bacia Experimental de Aiuaba tem área de drenagem de 12,0 km², possui um único reservatório localizado em seu exutório, com capacidade máxima de acumulação de 59.700 m³, além de dois riachos principais intermitentes. A área é composta por serras baixas, apresentando um relevo acidentado em certos trechos e suavemente acidentado ou aplainado em outros. As altitudes variam de 530 m a 660 m, compondo um relevo de 130 m, com declividade média de 19,4%. O mapa topográfico da área é apresentado na Figura 3.3, em escala de 1:10.000, com curvas de nível a cada 5 m. É uma bacia de drenagem de 5ª ordem e alta densidade de drenagem (4,4 km.km⁻²), com tempo de concentração de 1,1 h.

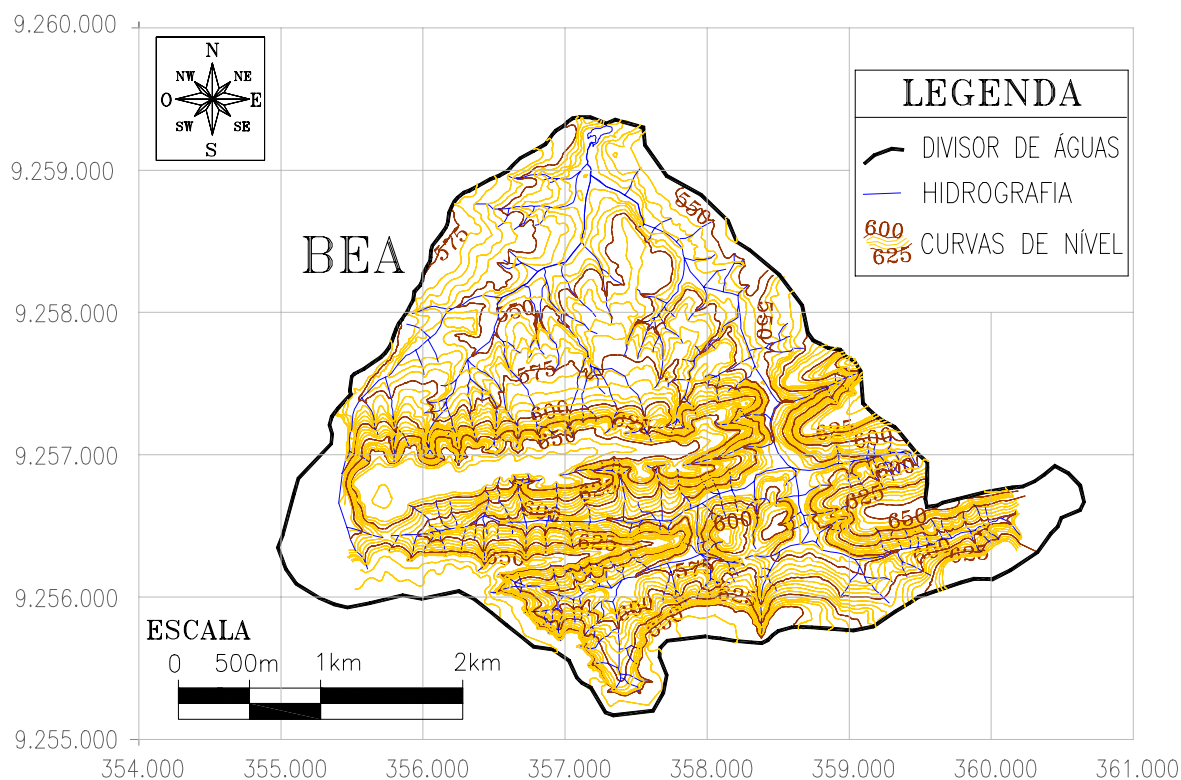


Figura 3.3 – Mapa topográfico da Bacia Experimental de Aiuaba.

3.1.3. Solos

Tres tipos de solos podem ser encontrados na Bacia Experimental de Aiuaba, segundo Creutzfeldt (2006) com base em estudo de Pereira (1982): Podzólico vermelho-amarelo, Planossolo solódico e Bruno não cálcico. A Figura 3.4 apresenta o mapa temático com os solos da BEA.

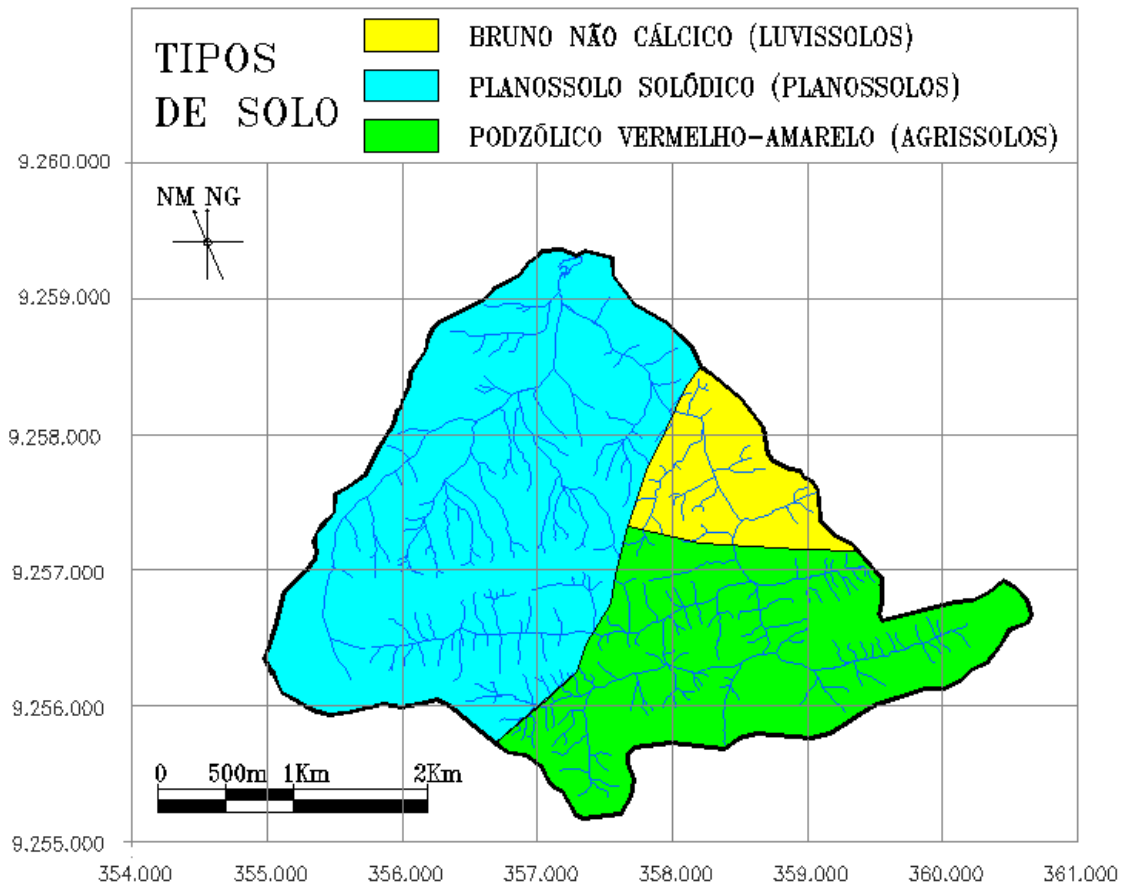


Figura 3.4 – Mapa de solos da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Adaptado de Creutzfeldt (2006)

As características desses três tipos de solos, segundo Araújo, L. (2005), são descritas em resumo: os planossolos solódicos são solos moderadamente profundos a rasos, mas raramente profundos, tendo, de modo geral, seqüência de horizontes A, B_t e C; os podzólicos vermelho-amarelos rasos, caso da BEA, possuem profundidade não superior a 60 cm com seqüência de horizontes também A, B_t e C; os solos brunos não cálcicos são solos moderadamente profundos a rasos, tendo, de modo geral, seqüência de horizontes A, B_t e C, e a sua ocorrência na área está sempre aliada à presença de pedregosidade superficial, constituída por calhaus e até matacões, que caracterizam um pavimento desértico e encontram-se associados com solos litólicos e afloramentos de rocha.

A partir de 6 amostras coletadas na bacia, nos estudos de Cavalcante *et al.* (2003), foram avaliados parâmetros físicos do solo, a classificação textural predominante foi silte arenosa, a condutividade hidráulica saturada média obtida foi 10 mm.h⁻¹ (moderada), a massa específica variou de 2,68 g.cm⁻³ a 2,52 g.cm⁻³, e a erodibilidade média 0,047 (ton.h.MJ⁻¹.mm⁻¹).

3.1.4. Geologia

A litologia da Bacia Experimental de Aiuaba é descrita em resumo, com base nos trabalhos de Araújo, L. (2005) e Veríssimo (2007) desenvolvidos na área. Os principais tipos geológicos são apresentados no mapa da Figura 3.5.

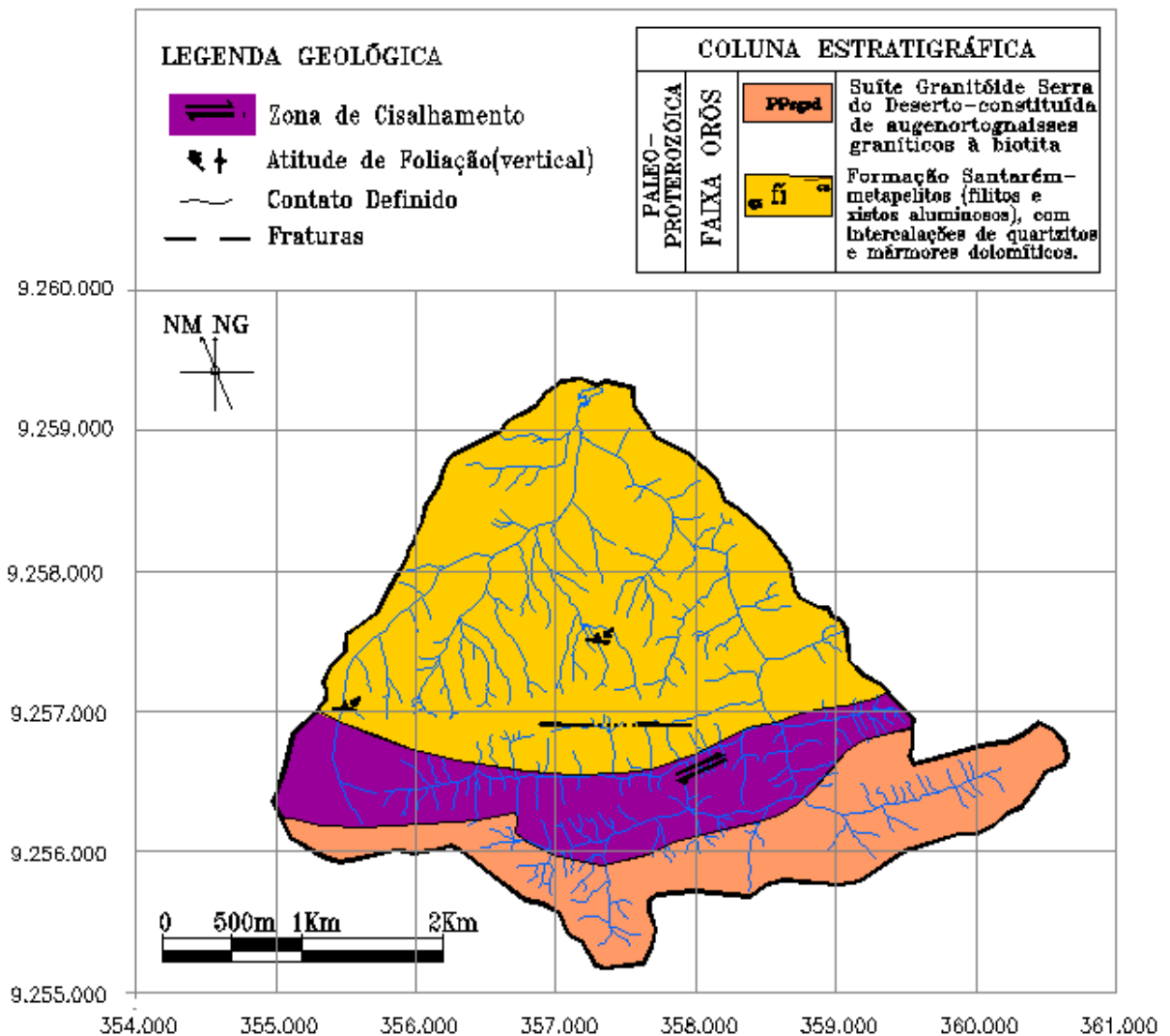


Figura 3.5 – Mapa de geologia da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Adaptado de Araújo, L. (2005)

No extremo sul da Bacia Experimental de Aiuaba ocorrem gnaisses acinzentados de textura fina a média contendo megacristais de feldspato. O bandamento composicional deste litotipo, intercala bandas claras constituídas de quartzo, feldspato e muscovita com bandas escuras compostas essencialmente de biotita e minerais opacos. Essas rochas encontram-se limitadas a norte por uma zona de cisalhamento dúctil de alto ângulo que separa os gnaisses de outra unidade metassedimentar denominada de Formação Santarém.

Nas porções central e norte da bacia ocorrem rochas metassedimentares as quais constituem o prolongamento para oeste da Faixa Orós constituída, sobretudo, por metapelitos (filitos e xistos aluminosos), com intercalações de quartzito e mármores dolomíticos, sendo renomeada recentemente como Formação Santarém (CPRM, 2003 *apud* VERÍSSIMO, 2007).

Os quartzitos ocorrem ao longo de uma faixa aproximadamente E-W, na porção central da área sustentando uma serra, a qual se destaca na topografia local e constitui importante divisor de setores estruturais da bacia. Ao norte predomina um padrão de drenagem retangular, fortemente estruturado e condicionado pelas estruturas dúcteis e rúpteis de orientação E-W e N-S, enquanto a sul o padrão desenvolvido sobre filitos é predominantemente dendrítico.

Os quartzitos caracterizam-se pelas cores cinza-esbranquiçadas e possuem granulação fina, são compactos e por vezes micáceos (muscovita), quando exibem aspecto sedoso. A mineralogia é representada essencialmente por grãos de quartzo, muscovita e minerais opacos concentrados em finas faixas escuras.

Os filitos representam os litotipos dominantes na área da BEA. Possuem coloração cinza-escura, com tonalidades cinza-esverdeadas, granulação fina e foliação marcante, às vezes exibindo uma alternância de faixas claras e escuras bem nítidas. A mineralogia é constituída por quartzo, micas (sericita), observam-se ainda pontuações de minerais opacos, principalmente magnetita mostrando grau variado de alteração para hematita. São comuns a presença de dobras em meso e microescala destacadas pela variação composicional das bandas claras (quartzo e sericita) e escuras (biotita e opacos).

3.1.5. Vegetação

Com base no estudo realizado por Lemos (2006) sobre florística, estrutura e mapeamento da cobertura vegetal da ESEC de Aiuaba, duas classes principais de vegetação são encontradas na Bacia Experimental de Aiuaba: caatinga arbustiva-arbórea alta densa e caatinga arbustiva-arbórea alta aberta. A caatinga arbustiva-arbórea alta densa possui elementos arbóreos de até 8,5 m, a caatinga arbustiva-arbórea alta aberta apresenta árvores emergentes e esparsas com alturas entre 8 e 10 m. Ambas possuem espécies arbustivas altas entre 5 e 7 m, entretanto, a primeira apresenta-se de forma mais densa.

O mapa de vegetação apresentado na Figura 3.6 foi obtido por Lemos (2006) através de análise geográfica computadorizada, em que foram associados dados cartográficos, imagens de satélite e levantamentos em campo. A análise foi realizada com base na quantidade de folhas verdes presentes em imagens de satélite CBERS-2, convertidas em imagem NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), e validadas com resultados levantados em campo. Dessa forma, as classes de vegetação da ESEC de Aiuaba, encontram-se acompanhadas de perfis-diagramas específicos para cada fisionomia encontrada na Estação.

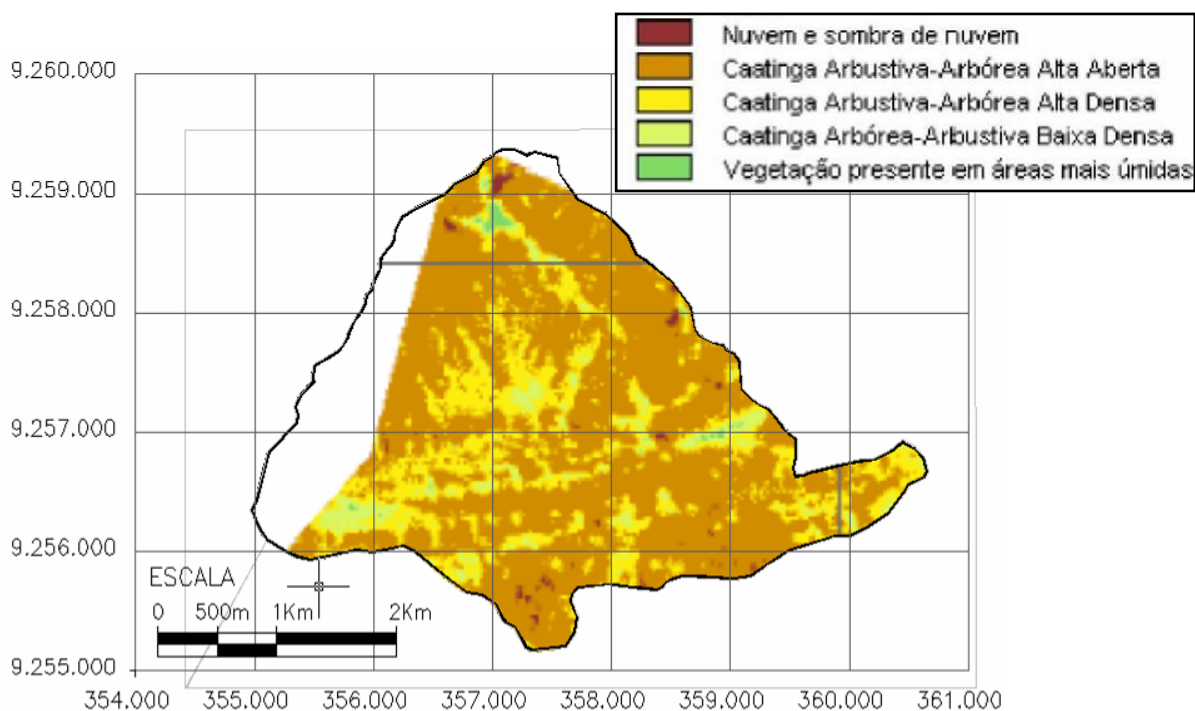


Figura 3.6 – Mapa de vegetação da Bacia Experimental de Aiuaba. Fonte: Adaptado de Lemos (2006)

3.2. Bacias de Pai João (BPJ) e Santo Antônio (BSA)

3.2.1. Localização e Características Gerais

As bacias de Pai João e Santo Antônio são sub-bacias do rio Pesqueiro, localizam-se no município de Aratuba-Ce e no Maciço de Baturité (Figura 3.7), a aproximadamente 100 km de Fortaleza, sendo que as áreas de estudo distam cerca de 12 km da cidade de Capistrano, com acesso através de estrada vicinal.

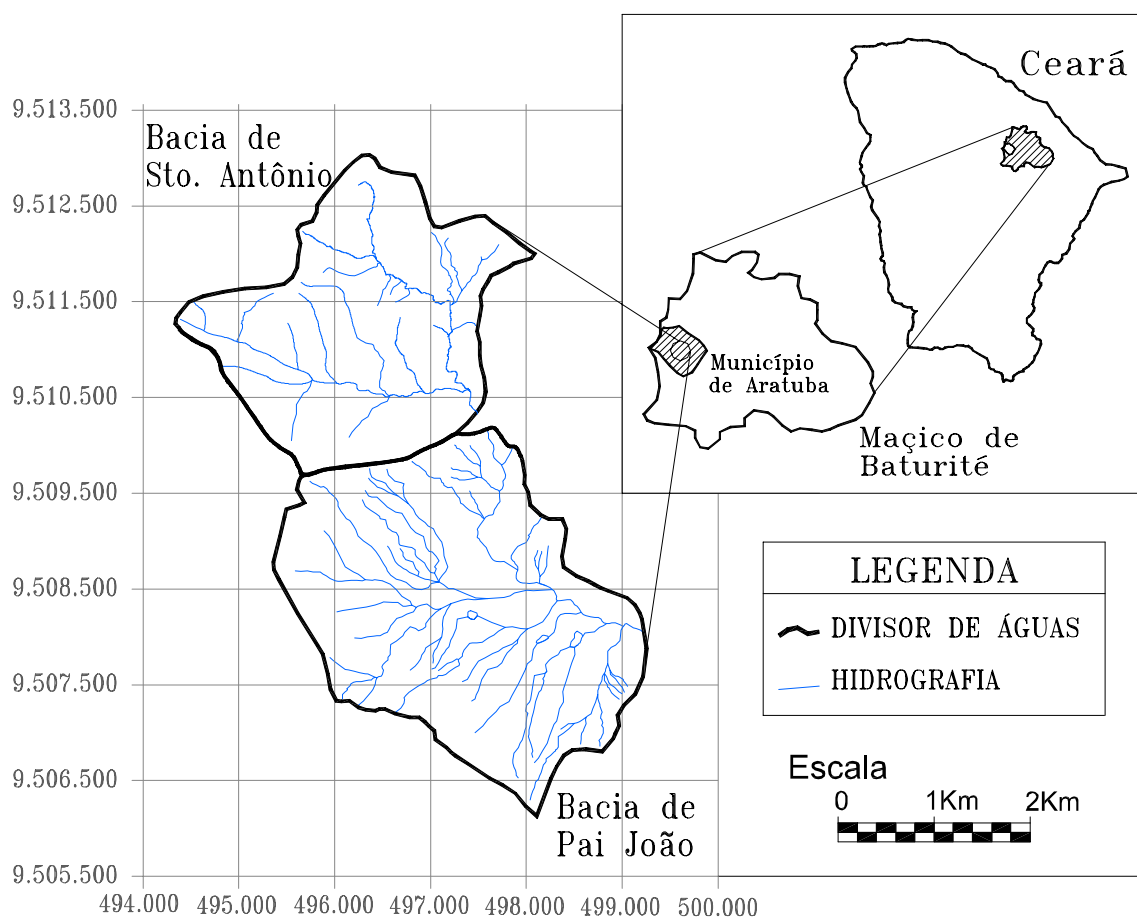


Figura 3.7 - Mapa de Localização das Bacias de Pai João e Santo Antônio em relação ao Estado do Ceará.

O Maciço de Baturité é considerado um geossistema importante, tendo em vista seu papel na recarga dos mananciais das bacias hidrográficas metropolitanas e sua tradição na produção de alimentos como feijão, milho, café, cana-de-açúcar e hortifrutigranjeiros. Vários impactos ambientais negativos ameaçam o equilíbrio ecológico e os recursos naturais da região. A exploração predatória das terras, aliada às condições de relevo acidentado e a carência de

práticas conservacionistas têm intensificado os processos de degradação dos solos em décadas recentes (BALE *et al.*, 1997 *apud* SOUZA FILHO, 2006).

O Maciço de Baturité é uma área de relevo acidentado, com vales encaixados em V, ou formando planícies alveolares, cujos solos predominantes são do tipo Argissolos Vermelho-Amarelo Eutróficos, profundos, nas encostas a oeste, e Neossolos Litólicos Eutróficos, nos topos, e na sua face leste. As temperaturas médias anuais nas altas altitudes atingem 23°C, chegando a 21°C em janeiro, enquanto nas baixas são de 27°C (MANTOVANI, 2007).

3.2.2. Características Físicas e Climáticas das Bacias

A Bacia de Pai João apresenta uma média de precipitação pluviométrica de 870 mm anuais (série histórica de 2000 a 2007, Posto Pai João, FUNCEME, 2008). A variação anual da precipitação é apresentada na Figura 3.8, pelas médias mensais. Tem área de drenagem de 9,3 km², possui três pequenos reservatórios localizados em sítios e fazendas da área, com respectivas capacidades de acumulação de 40.900 m³, 15.400 m³ e 11.400 m³, além de rede de drenagem intermitente, com a presença de escoamento de base durante alguns meses do ano.

É composta de unidades de relevo que correspondem a morros e morrotes, com predominância de vales fechados em forma de V, e planícies aluvionares restritas a área da drenagem principal. As altitudes variam de 230 m a 850 m, compondo um relevo de 620 m, com declividade média de 40,2 %. O mapa topográfico da área é apresentado na Figura 3.9. É uma bacia de drenagem de 4ª ordem e alta densidade de drenagem (4,4 km.km⁻²), com tempo de concentração de 40 min (equação de Kirpich).

A Bacia de Santo Antônio apresenta uma média de precipitação pluviométrica de 1.190 mm anuais (série histórica de 1974 a 2007, Posto Aratuba, FUNCEME, 2008). A variação anual da precipitação é apresentada na Figura 3.8, pelas médias mensais. Tem área de drenagem de 6,8 km², possui dois riachos principais, perenes, ou seja, nesta bacia há a presença de escoamento de base (interação rio aquífero) durante todo o ano, incluindo os períodos sem precipitação.

É composta de serras, morros e morrotes, com morfologia em V fechado. As altitudes variam de 410 m a 910 m, compondo um relevo de 500 m, com declividade média de 47,6 %. O

mapa topográfico da área é apresentado na Figura 3.9. É uma bacia de drenagem de 3ª ordem densidade de drenagem ($2,9 \text{ km.km}^{-2}$), com tempo de concentração de 30 min.

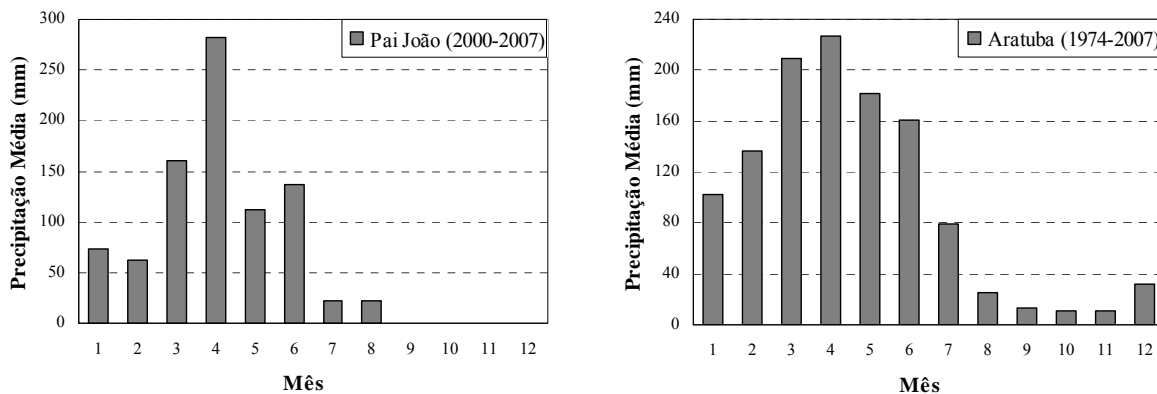


Figura 3.8 – Distribuição anual de precipitação pluviométrica nas Bacias de Pai João (Posto Pai João, 2000-2007) e Santo Antônio, (Posto Aratuba, 1974-2007), médias mensais. Fonte: séries históricas FUNCEME.

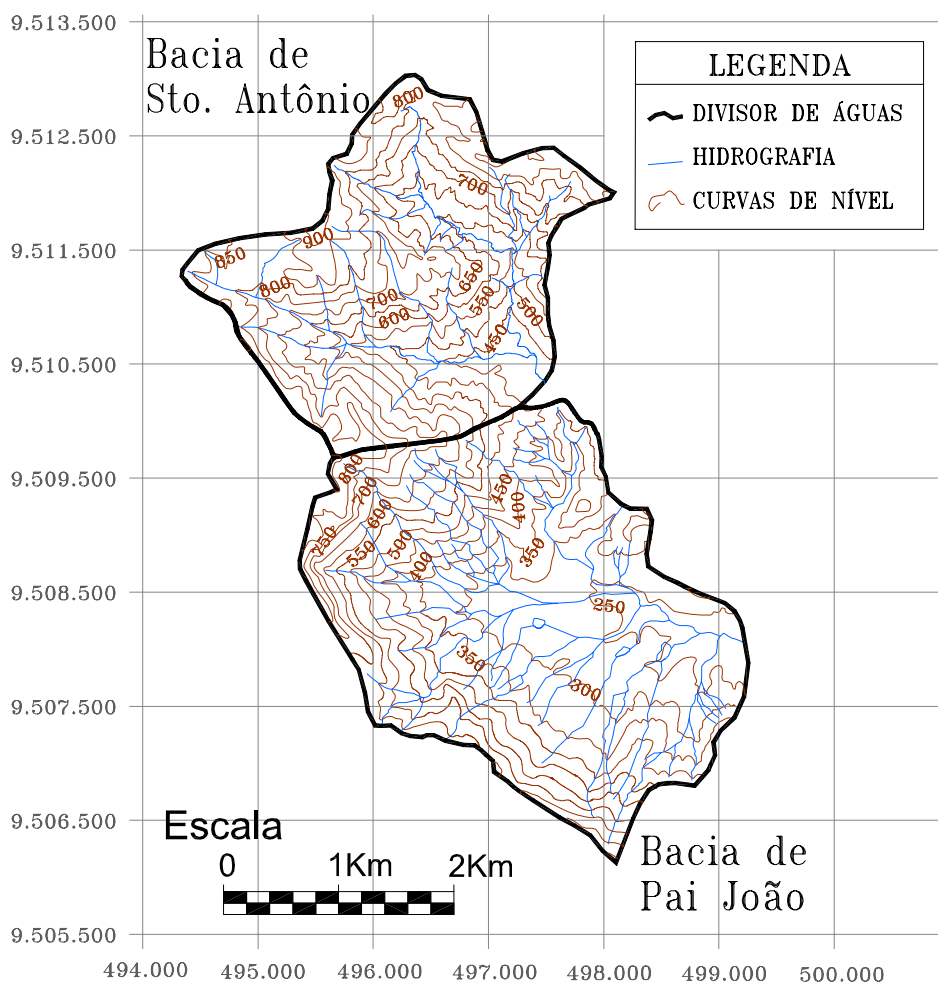


Figura 3.9- Mapa topográfico das Bacias de Pai João e Santo Antônio

Nestas áreas, através de recursos do projeto PROSED (Produção de Sedimentos em Pequenas Bacias Hidrográficas sob Diferentes Contextos Geoambientais), no ano de 2006 realizou-se a instrumentação para monitoramento de variáveis hidrológicas. Foram instalados dois pluviômetros para registro diário de chuva, réguas linimétricas na seção do exutório para controle de nível d'água e estimativa de vazões em cada bacia. Além de treinamento de pessoal para contínua coleta de dados desses instrumentos, assim como para coleta de amostras de sedimentos.

3.2.3. Solos

A classificação de solos é apresentada de acordo com o mapa (Figura 3.10) elaborado por Silva (2007) e Nascimento (2007). Este mapa foi baseado no levantamento semi-detalhado de solos de Aratuba realizado pela FUNCEME (2001) e em determinações de campo realizadas por aqueles autores.

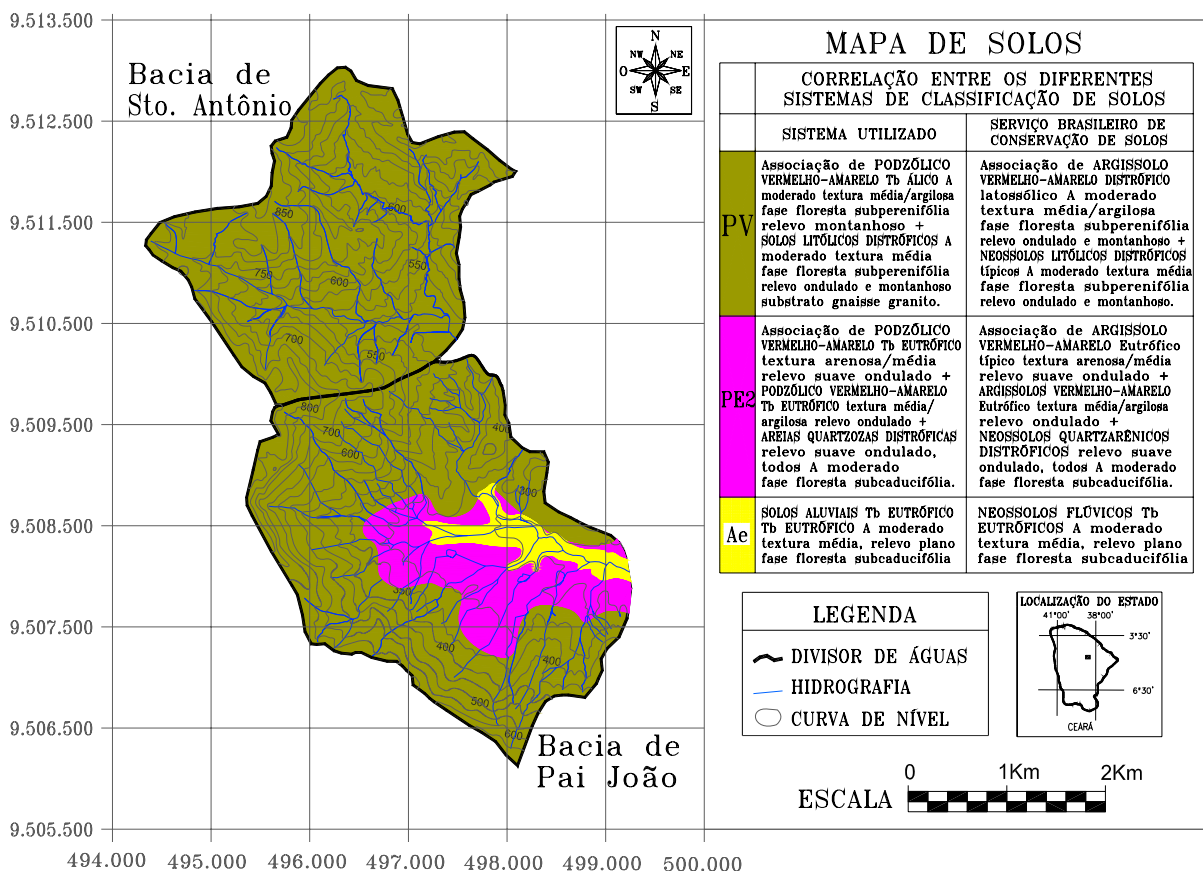


Figura 3.10 – Mapa de solos das Bacias de Pai João e Santo Antônio. Fonte: Adaptado de Silva (2007) e Nascimento (2007).

De acordo com a Figura 3.10, os solos podzólicos predominam nas duas bacias. Possuem espessura variada, o horizonte A possui cor acinzentada e textura areno-argilosa, sendo poroso, permeável e friável; o horizonte B inferior tem coloração avermelhada e textura mais argilosa. O horizonte C guarda registro de estruturas da rocha mãe e espessuras variáveis.

Os latossolos ocorrem como pequenas manchas no interior dos solos podzólicos que são predominantes na área. São solos argilosos, muito profundos e bem estruturados, apresentam mosqueamento branco, amarelo e vermelho gerado pela individualização de argilo-minerais (caulinita) e óxidos de ferro.

Os solos litólicos estão associados com as vertentes mais íngremes, onde a declividade é bem acentuada. São solos rasos com espessura variando de 40 a 60 cm de profundidade. Originam-se de diferentes tipos litológicos, como os migmatitos e os gnaisses.

Os solos aluviais ocorrem nas porções mais baixas do relevo associadas às áreas de influência dos principais rios na bacia de Pai João, configurando as planícies aluvionares e alveolares. São compostos por sedimentos arenosos e areno-argilosos, de cor cinza escura. São bastante utilizados em decorrência da boa fertilidade, condições hidrológicas favoráveis e topografia plana.

A partir de nove amostras de solos coletadas na área, no estudo de Nascimento (2007), foram determinados parâmetros físicos do solo, a classificação textural predominante foi areia franca e a condutividade hidráulica saturada média foi avaliada 180 mm.h^{-1} (rápida).

3.2.4. Geologia

Segundo levantamento geológico realizado por Silva (2007) e Nascimento (2007), a área das bacias de Pai João e Santo Antônio é composta por um conjunto dominante de gnaisses e xistos, que inclui faixas e lentes menores de quartzitos. São encontrados, também, depósitos aluvionais somente na bacia de Pai João, por se tratar de uma área mais plana (Figura 3.11). Com base no levantamento realizado por estes autores são apresentadas a seguir, em resumo, as principais características da área em termos de litologia.

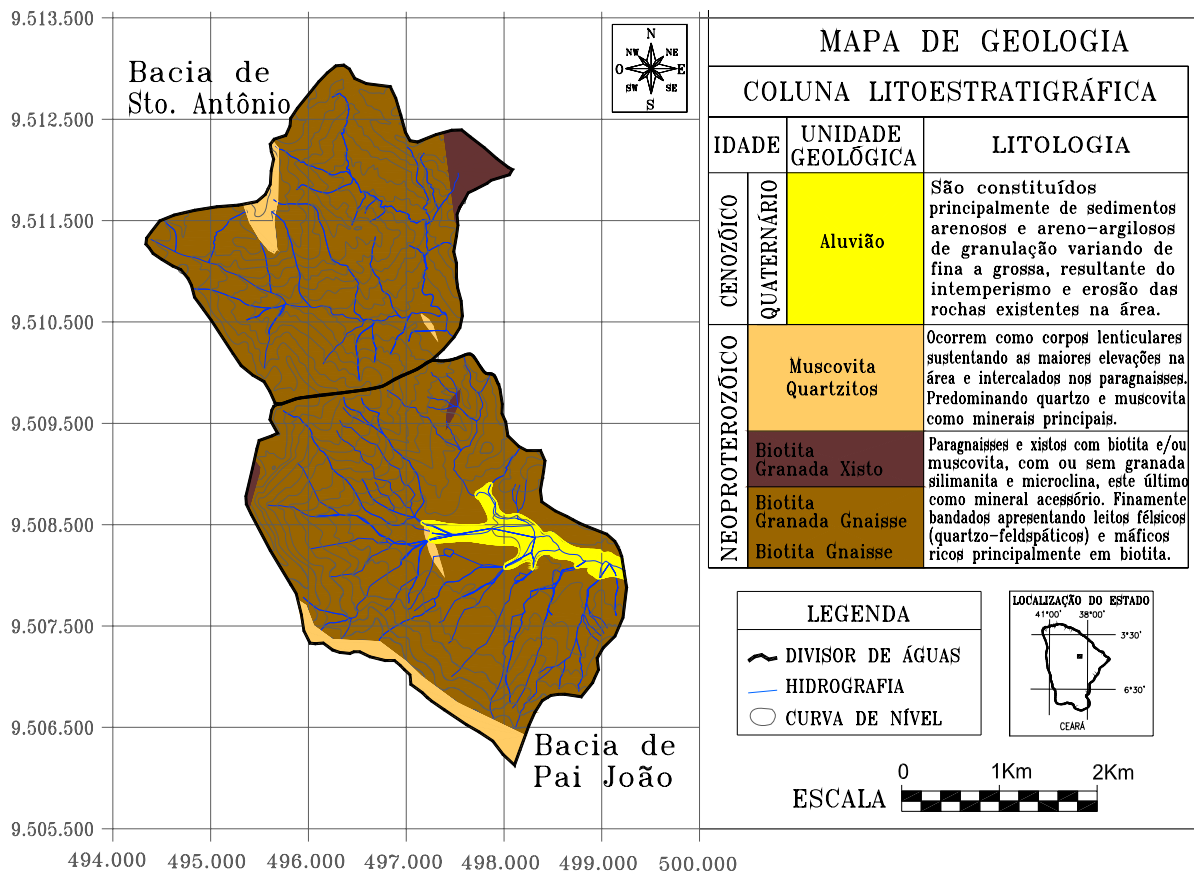


Figura 3.11 – Mapa de geologia das Bacias de Pai João e Santo Antônio. Fonte: Adaptado de Silva (2007) e Nascimento (2007).

Biotita Granada Gnaisses são as rochas mais comumente encontradas nas bacias, o brandamento composicional é composto por quartzos e feldspatos, predominantemente biotita, além de granada, e em menor quantidade muscovita. Esses litotipos apresentam uma coloração cinza escura com foliação bem marcada, gradando com feições mais xistosas.

Os Biotita-Gnaisses apresentam-se em pequenas porções. Apresentam cor cinza-escuro e bandamento definido pela alternância de bandas félsicas, quartzo feldspáticas e bandas ricas em biotita sem a presença de minerais aluminosos. Caracterizam-se por granulação variando de fina a média e xistosidade.

Biotita Granada Xistos são rochas que apresentam uma coloração que varia de cinza claro a escuro, xistosidade bem desenvolvida e granulação variando de fina a média. Algumas vezes, é observada a presença de pequenas bandas félsicas (quartzo) preservadas no xisto.

Muscovita quartzitos são litotipos que, devido à sua estabilidade em relação ao intemperismo, ocorrem nos pontos mais elevados da área, como pequenas lentes intercaladas nos xistos e biotita gnaisses. Apresentam cor amarelada ou esbranquiçada, com granulação fina a média.

Os depósitos aluviais e terraços ocupam as áreas planas, dispendo-se no leito dos principais rios da bacia de Pai João. São constituídos por sedimentos arenosos e areno-argilosos de granulação variando de fina a grossa, como resultado do intemperismo e erosão das rochas existentes na área.

3.2.5. Vegetação, Uso e Ocupação da Área

As florestas na Serra de Baturité são áreas consideradas fragmentos de florestas em meio à Caatinga. Entretanto, essa vegetação foi profundamente modificada pela ação antrópica, tendo em vista a implantação de culturas agrícolas. Na área de estudo estabelecem-se dois tipos de formações florestais (SOUZA FILHO, 2006; MANTOVANI, 2007): (1) Floresta Ombrófila Densa Montana (Floresta Tropical Subperenifólia), em condição de umidade constante, caracterizada por vegetação densa e de alto porte, muito rica em espécies localizada na parte mais elevada da área, a partir de 600 m de altitude; e (2) Floresta Estacional Semidecidual Submontana (Floresta Tropical Subcaducifólia), onde a distribuição de chuvas é sazonal, genericamente denominadas de matas de brejo, em todo o domínio da Caatinga. É caracterizada por vegetação menos densa e de menor porte, localizada abaixo de 600 m de altitude.

As bacias de Pai João e Santo Antônio encontram-se impactadas por ações antrópicas, particularmente agricultura. Foi realizado por Eichert (2008) estudo sobre usos e ocupação do solo nestas áreas. O mapa temático de vegetação e usos do solo (Figura 3.12) foi desenvolvido com base em imagens de satélite e validado através de levantamentos de campo.

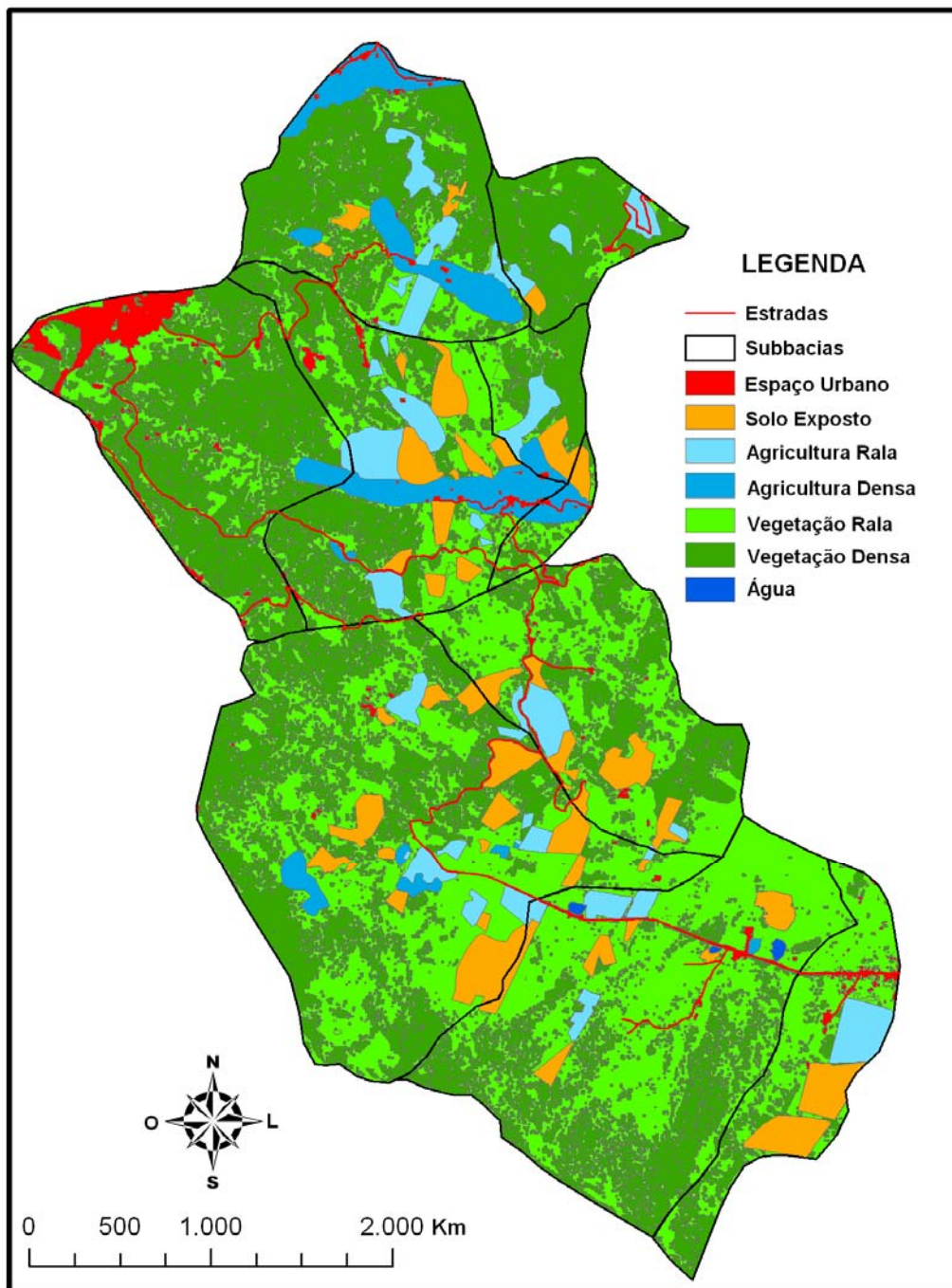


Figura 3.12 – Mapa de vegetação, uso e ocupação do solo das bacias de Pai João e Santo Antônio. Fonte: Eichert (2008).

A bacia de Santo Antônio possui 53% da área coberta por vegetação densa e 23% por vegetação rala, ou seja, 76% da área da bacia possui cobertura vegetal natural, com predominância de vegetação densa. Enquanto que a área utilizada para agricultura, sem práticas de conservação, corresponde a 15%; 5% da área corresponde a terras degradadas, com a presença de solo descoberto e vegetação queimada; 4% da área da bacia compreende os espaços urbanos, representados por pequenos povoados e pela sede do Município de Aratuba.

A bacia de Pai João possui 36% da área coberta por vegetação densa e 50% por vegetação rala, ou seja, 86 % da área da bacia possui cobertura vegetal natural, com a predominância de vegetação rala; a área utilizada para agricultura, sem práticas de conservação, corresponde a 5% da bacia; 8% corresponde a terras degradadas, com a presença de solo descoberto e vegetação queimada; 1% da área da bacia compreende a área urbanizada no povoado de Pai João e edificações existentes em sítios e fazendas.

- Barragens de contenção de sedimentos – Particularidade da Bacia de Pai João

As barragens de contenção de sedimentos são constituídas por enrocamento sem argamassa arranjado sobre o leito de pequenos riachos ou em encostas e funcionam como uma barreira sedimentológica em trechos de pequenos talwegues, forçando a deposição de sedimentos transportados pela corrente de água, cuja alternância de fluxos permite uma composição de partículas multivariadas em sua granulometria, impedindo o desgaste do solo provocado pela exportação de sedimentos, nutrientes e matéria orgânica (Silva, 2007).

Com o passar do tempo, no espaço localizado imediatamente a montante do barramento, gera-se um terraço de solo (Figura 3.13) que, por sua vez, também retém água mediante umidade intersticial. Dessa maneira, o solo que seria depositado nos rios e reservatórios é retido nas áreas altas, podendo ser aproveitado para a produção agrícola (Araújo, 2006).



Figura 3.13- Esquema do sequenciamento de barragens de contenção de sedimentos. Fonte: Ceará (2001).

Como medida de compensação ambiental, na Bacia de Pai João, foram construídas com o objetivo de minorar o efeito negativo do excesso na produção de sedimentos, no âmbito do Programa Hidro-Ambiental do Ceará (PRODHAM), conduzido pelo Governo do Estado, um

total de 88 barragens do tipo marco zero, das quais 37 ainda com capacidade de acumulação no ano de 2007, de acordo com levantamento realizado na área no período antecedente as chuvas desse ano.

Entretanto, apesar da utilização das barragens e cordões de pedra como medida de compensação ambiental no sentido de mitigar os efeitos da erosão na Bacia de Pai João, verifica-se ao mesmo tempo a utilização de práticas inadequadas de manejo de solos, como é o caso das queimadas, muito freqüentes em áreas de plantio de culturas de subsistência, causando o empobrecimento e a degradação do solo, aumentando o escoamento superficial e o transporte de sedimentos (Figura 3.14 b).

Foram realizadas por Silva (2007), análise granulométrica do sedimento acumulado em cinco nos microbarramentos da Bacia de Pai João, as classificações texturais foram areia, areia franca a franco-arenosa, com a predominância de areia. Os percentuais correspondentes a cada fração granulométrica são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Caracterização da granulometria do sedimento acumulado nos microbarramentos de contenção da bacia de Pai João. Fonte: Silva (2007).

Microbarramento	Fração granulométrica (%)				Classificação Textural
	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
PJ 17	61	24	8	7	Areia Franca
PJ 21	85	11	2	2	Areia
PJ 26	84	10	2	4	Areia
BA 01	22	36	32	10	Franco Arenosa
BA 04	60	28	8	4	Areia

As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam aspectos gerais das Bacias de Pai João e Santo Antônio, que compreendem vegetação, usos do solo, áreas degradadas com solo exposto e queimadas, microbarramentos de contenção de sedimentos e barragens de acumulação de água.



(a) Microbarragem de contenção de sedimentos



(b) Queimada da vegetação



(c) Barragem de acumulação de água



(d) Vista geral da bacia



(e) Vegetação densa



(f) Vegetação e solo exposto

Figura 3.14 – Aspectos gerais da Bacia de Pai João



(a) Plantio em altas declividades



(b) Ocupação na área



(c) Queimadas da vegetação



(d) Solo exposto



(e) Lançamento de esgoto na drenagem



(f) Exutório

Figura 3.15 – Aspectos gerais da Bacia de Santo Antônio

3.4. Comparação entre as áreas

Para efeito de comparação entre as três bacias no que se refere aos diferentes contextos geoambientais, na Tabela 3.2 apresenta-se um resumo das principais características dessas áreas relacionadas aos aspectos de clima, fisiografia, solo, litologia, usos e ocupação da área, já descritas com maiores detalhes anteriormente. O conhecimento dessas características e particularidades de cada área torna-se necessário para a compreensão da influência destas no processo de erosão e transporte de sedimentos nessas áreas.

Tabela 3.2 – Resumo das características das áreas de estudo

Característica	Aiuaba (BEA)	Pai João (BPJ)	Sto Antônio (BSA)
Área de drenagem (Km ²)	12,0	9,3	6,8
Precipitação anual média (2000-2007)	582	998	1.304
Elevação (m)	530-660	230-850	410-910
Relevo (m)	130	620	500
Declividade média (%)	19,4	40,2	47,6
Tempo de Concentração (h)	1,1	0,6	0,5
Coefficiente de Compacidade	1,3	1,2	1,2
Fator de Forma	0,7	0,6	0,6
Densidade de drenagem (km/km ²)	4,4	4,4	2,9
Escoamento predominante no curso d'água	Efêmero	Intermitente	Perene
Ordem da Bacia	5 ^a	4 ^a	3 ^a
Litologia Predominante	Filitos e Gnaisse	Biotita Gnaisse	Biotita Gnaisse
Classificação textural do solo	Silte arenoso	Areia franca	Areia franca
Cobertura Vegetal (%)	100% vegetação densa	86%, sendo 36% vegetação densa e 50% vegetação rala	76%, sendo 53% vegetação densa e 23% vegetação rala

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Bacia Experimental de Aiuaba

4.1.1. Instrumentação e Monitoramento

A Bacia Experimental de Aiuaba foi instrumentada em 2002-2003, inicialmente com recursos do Projeto IBESA (Implantação de Bacias Experimentais no Semi-Árido). Desde então, nesta bacia, os seguintes dados têm sido levantados: precipitação em três estações pluviométricas (medidas a cada 5 minutos), umidade do solo (três estações), nível do açude de controle, permitindo o cálculo da vazão em toda a bacia, vazão em uma sub-bacia através de calha Parshall, medição da produção de sedimentos de eventos através de coletas manuais e de uma torre coletora de sedimentos instalada no riacho principal da bacia, evaporação diária em um tanque tipo classe A, além de um lote experimental, onde se realizam medidas de perdas por interceptação vegetal. São realizadas ainda, campanhas sistemáticas, intensificadas no período de chuvas, para coleta de dados dos equipamentos automáticos e dos dados manuais registrados por moradores da região. A Figura 4.1 mostra a localização de equipamentos de medição hidrológica na BEA.

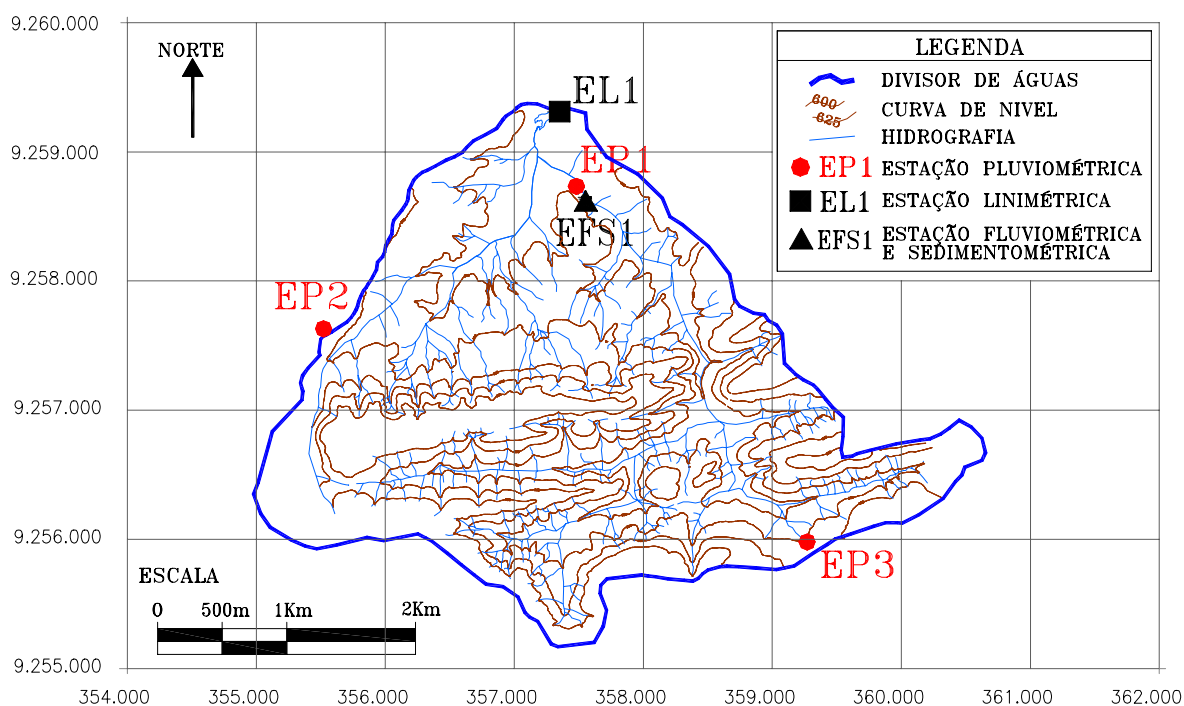


Figura 4.1 - Localização da instrumentação na Bacia Experimental de Aiuaba



(a) Amostrador automático de sedimentos para o ramo ascendente do hidrograma.



(b) Garrafas de 250 ml dispostas a cada 10 cm, no total de dezesseis (16).



(d) Calha Parshall



(e) escoamento no riacho principal da bacia, detalhe da Calha Parshall



(e) Estação pluviométrica automática



(f) Reservatório localizado no exutório da bacia

Figura 4.2 – Equipamentos de medição hidrológica na Bacia Experimental de Aiuaba

4.1.2. Medição da Carga de Sedimentos

A produção de sedimentos foi avaliada com base em medidas de descarga sólida realizadas através de coletas de amostras do material sólido dos eventos chuva-deflúvio na estação EF1. As amostras foram coletadas através de amostrador automático de sedimentos tipo torre, instalado no leito do rio principal, de acordo com a Figura 4.2, localizado a montante da calha Parshall. Em alguns eventos a coleta deu-se, no entanto, na própria calha Parshall, principalmente em pequenos eventos, quando a amostragem não era possível através da torre e nos eventos que ocorreram antes de sua instalação.

As coletas na calha Parshall, para análise de concentração de sedimentos, foram realizadas na seção com turbulência máxima, computando, desta forma, a carga total de sedimentos: em suspensão e de leito do rio.

A determinação das concentrações de sólidos em suspensão nas amostras dos eventos foi realizada em laboratório pelo método da filtração, descrito em Carvalho (1994). Associando-se as vazões afluentes médias diárias às respectivas concentrações realizou-se estimativa da produção de sedimentos em suspensão para cada evento chuva-deflúvio, de acordo com a equação (4.1)

$$Q_s = c \cdot Q_L \quad (4.1)$$

em que, Q_s é a descarga sólida ($\text{Kg} \cdot \text{s}^{-1}$), c é a concentração de sólidos suspensos ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$) e Q_L é a descarga líquida média ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Para determinação da produção de sedimentos na bacia, considerou-se que a concentração de sólidos medida na seção de controle do rio principal (estação EF1), que controla 2/3 da BEA, era representativa da concentração de sólidos que chega efetivamente ao reservatório, localizado no exutório da BEA.

Essa associação de concentração de sedimentos às respectivas vazões médias diárias dos eventos chuva-deflúvio foi utilizada para determinação da curva-chave que representa o aporte de sedimentos na BEA, obtendo-se assim uma correlação entre a vazão líquida e sua descarga sólida.

Determinou-se uma curva-chave de sedimentos para a BEA com um total de quatorze eventos de chuva que geraram vazões afluentes ao reservatório, nas quais foi possível também medir as concentrações de sedimentos, sendo cinco eventos medidos no ano de 2004, quatro em 2006 e cinco em 2007. Esta equação será utilizada na estimativa da produção de sedimentos para os eventos em que não foi possível medição e, dessa forma, realizar a estimativa anual da produção de sedimentos na área, partindo-se de uma série de vazões afluentes.

No traçado de curva-chave de sedimentos geralmente associa-se a descarga sólida à vazão instantânea, medida na hora da amostragem realizada para determinação da concentração de sedimentos em suspensão. Entretanto, não foi possível realizar medição da vazão instantânea durante todo o período. Dessa forma, associaram-se os valores de concentração de sedimentos às respectivas vazões afluentes médias diárias. Essas vazões foram determinadas por Costa (2007), através de balanço hídrico do reservatório localizado no exutório da bacia, a partir de medições horárias e, em alguns períodos, diárias de nível d'água.

4.1.3. Modelagem da Produção de Sedimentos com o HIDROSED2

Para a aplicação do modelo HIDROSED2, inicialmente, fez-se uma seleção de eventos chuva-deflúvio nos quais houve medição da carga de sedimentos. Dos quatorze eventos monitorados, foram selecionados os cinco eventos do ano de 2004 para a calibração do parâmetro de transporte K_V , por não ser possível ainda sua estimativa a partir de parâmetros da literatura ou sua medição direta. A validação do modelo foi realizada para os nove eventos observados no ano de 2006 e 2007. Após a validação do modelo, realizou-se estimativa anual da produção de sedimentos na Bacia Experimental de Aiuaba, para os anos de 2003 a 2007, utilizando o HIDROSED2.

- Parâmetros de entrada do modelo

São necessários, entre outros, para a entrada do modelo: o número de células ou sub-bacias na área, o número de eventos e o número de estações pluviométricas.

Os parâmetros associados a cada evento são: o fator R de erosividade da chuva ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), a lâmina escoada (mm) e a duração do escoamento superficial nas encostas (min).

Os parâmetros associados a cada sub-bacia, tendo por base sua fisiografia são: área (m^2), comprimento da drenagem (m) e declividade média ($m.m^{-1}$).

São ainda necessários os seguintes parâmetros, também associados às sub-bacias: fator K de erodibilidade dos solos ($ton.h.MJ^{-1}.mm^{-1}$) e fator C de cobertura vegetal, utilizados na estimativa da erosão bruta, além de densidade da partícula mineral e velocidade de sedimentação ($m.s^{-1}$).

Parâmetro de transporte K_v a ser calibrado, diretamente relacionado à distância de viagem do sedimento e inversamente relacionado à eficiência de retenção de sedimento.

- Parametrização do Modelo HIDROSED2 para a Bacia Experimental de Aiuaba

No processo de parametrização do modelo, realizou-se inicialmente uma discretização da área em sete sub-bacias de acordo com a Figura 4.3. A divisão em células foi baseada na topografia da área e na drenagem, entretanto, outros fatores podem ser considerados em sua discretização, como geologia, vegetação, além de tipos de solo, uso e ocupação na área.

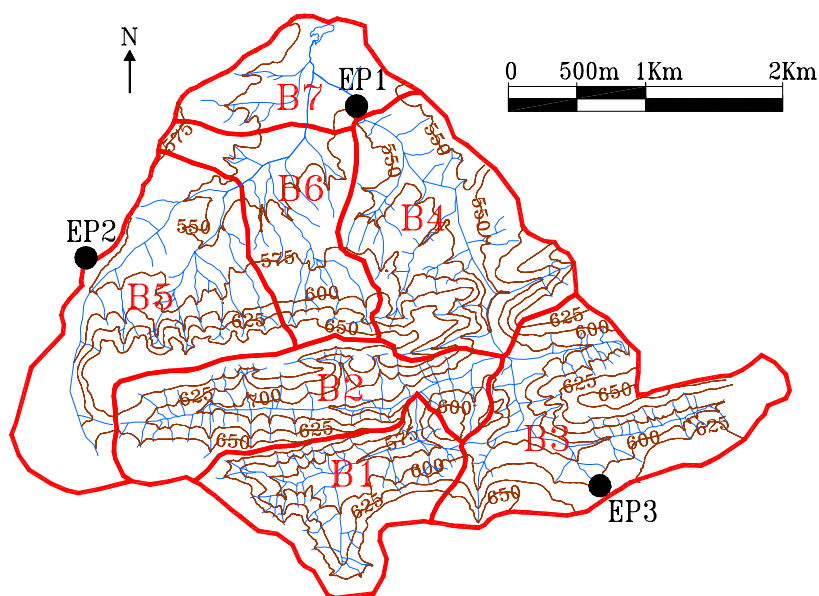


Figura 4.3 – Discretização da área em sub-bacias para aplicação do modelo HIDROSED2

Com relação aos parâmetros relacionados aos eventos, a estimativa destes foi realizada como explicado a seguir.

O fator R de erosividade da chuva ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) foi calculado tendo por base a precipitação pluviométrica medida em cada uma das três estações existentes na área (EP1, EP2 e EP3). Devido à existência de mais de uma estação pluviométrica na área, realizou-se uma distribuição espacial deste parâmetro através de associação de sub-bacias às estações utilizando-se o critério de proximidade entre estas. Levou-se em consideração ainda a topografia da área. Dessa forma, realizou-se a seguinte associação entre sub-bacias e estações pluviométricas: sub-bacias B1, B2 e B3 associadas à EP3; B5 à EP2; B4, B6 e B7 à EP1.

Por não ser possível a medição direta da lâmina escoada (mm) nas encostas, o seu valor foi estimado a partir da divisão entre a vazão afluyente ao reservatório (formada praticamente pelo escoamento superficial) e a área da bacia. Esta lâmina foi considerada, em cada evento, igual em todas as células.

A duração do escoamento superficial (min) foi considerada igual à duração da precipitação devido à não disponibilidade daquele dado. Entretanto, avalia-se que a duração do escoamento esteja compreendida entre a duração da precipitação e o tempo de base do hidrograma de escoamento na bacia. Costa (2007) demonstrou que, entre 2003 e 2007, a duração total do escoamento nos rios da bacia foram, em média, apenas 64% a mais que a duração da chuva. No entanto, sabendo-se que o escoamento superficial sobre as encostas tem menor duração que o escoamento no rio, a hipótese admitida (tempo de escoamento nas encostas igual ao tempo de chuva) pode ser considerada aceitável.

Os parâmetros relacionados à fisiografia ou características geométricas da área foram estimados a partir do mapa topográfico da área para cada sub-bacia, disponível na escala 1:10.000 com curvas de nível equidistantes de cinco metros.

Com relação ao fator C, que representa o efeito da cobertura vegetal e usos do solo, considerou-se este constante para toda a bacia devido ao fato de a bacia ter vegetação bastante homogênea e preservada. Admitiu-se valor constante de $C = 0,006$ (caatinga arbustiva-arbórea conservada), como determinado segundo Müller *et. al.* (2006).

O valor médio de erodibilidade do solo medido na bacia foi de $K = 0,047$ ($\text{ton}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$), de um total de seis amostras de solo coletadas na BEA. A densidade real das partículas

minerais foi assumida como sendo igual a 2,65, que corresponde à densidade específica do grão de quartzo e a velocidade de sedimentação foi admitida igual a 0,1 m.s⁻¹ (Araújo, 2007).

- *Calibração e Validação*

O parâmetro de transporte K_V foi calibrado a partir dos cinco eventos medidos em 2004 na bacia. O processo de calibração consistiu em determinar o valor ótimo de K_V por meio de tentativa e erro igualando a integral dos valores observados de produção de sedimentos à integral dos valores simulados. A validação foi realizada para os nove eventos medidos em 2006 e 2007, e consistiu em realizar uma comparação entre os valores simulados e observados de forma a avaliar a aplicabilidade do modelo após sua calibração.

4.1.4. *Equações Empíricas de Avaliação de SDR*

Aplicou-se ainda, na Bacia Experimental de Aiuaba as equações empíricas desenvolvidas por Maner, Roehl, Williams-Berndt, que avaliam um único valor médio de SDR, espacial e temporal, e são baseadas apenas na fisiografia da bacia.

- *Equação de Maner.* Considera o efeito da declividade do terreno para o cálculo da taxa de transporte difuso, de acordo com a equação 4.2, em que, L_m representa o maior comprimento na bacia paralelo ao rio principal (m) e F_R o desnível entre a cota média do divisor e a cota do exutório.

$$\log(SDR) = 2,943 - 0,824 \cdot \log(L_m / F_R) \quad (4.2)$$

- *Equação de Roehl.* Além dos parâmetros utilizados por Maner, esta equação considera a razão de bifurcação e a área da bacia na determinação da taxa de transporte difuso de acordo com a equação 4.3, em que, A representa a área da bacia (milhas quadradas) e B a razão de bifurcação da bacia.

$$\log(SDR) = 4,27 - 0,23 \cdot \log(A) - 0,51 \cdot \log(L_m / F_R) - 2,79 \cdot \log(B) \quad (4.3)$$

- *Equação de Williams-Berndt.* Utiliza apenas a declividade do curso d'água principal como parâmetro para cálculo de SDR, de acordo com a equação 4.4, em que, S_N é a declividade média do rio principal.

$$SDR = 62,7 \cdot S_N^{0,403} \quad (4.4)$$

4.2. Bacias de Pai João e Santo Antônio

4.2.1. Instrumentação e Monitoramento

Foram realizadas em novembro de 2006 três campanhas para instrumentação das bacias de Pai João e Santo Antônio a fim de realizar o levantamento de dados necessários para a estimativa da produção de sedimentos dessas áreas no ano de 2007. Foi implantado um sistema de monitoramento de baixo custo baseado em registros manuais, dessa forma, foram instalados em cada bacia: um pluviômetro para medição diária de precipitação; e réguas linimétricas em uma seção do rio principal para controle diário do nível d'água em cada bacia, para a estimativa de vazões afluentes no exutório (Figura 4.4 e Figura 4.5). Procedeu-se ainda, ao treinamento de pessoal residente no local para realização desses registros e de amostragem na seção de controle do rio principal para análise da concentração de material sólido em suspensão, a fim de estimar as vazões afluentes líquidas e sólidas. Foram realizadas então, campanhas sistemáticas intensificadas no período de chuvas, para realização de medição de vazão nas seções de controle e coleta de dados (precipitação, medidas de nível d'água, amostras para análise de sedimentos).

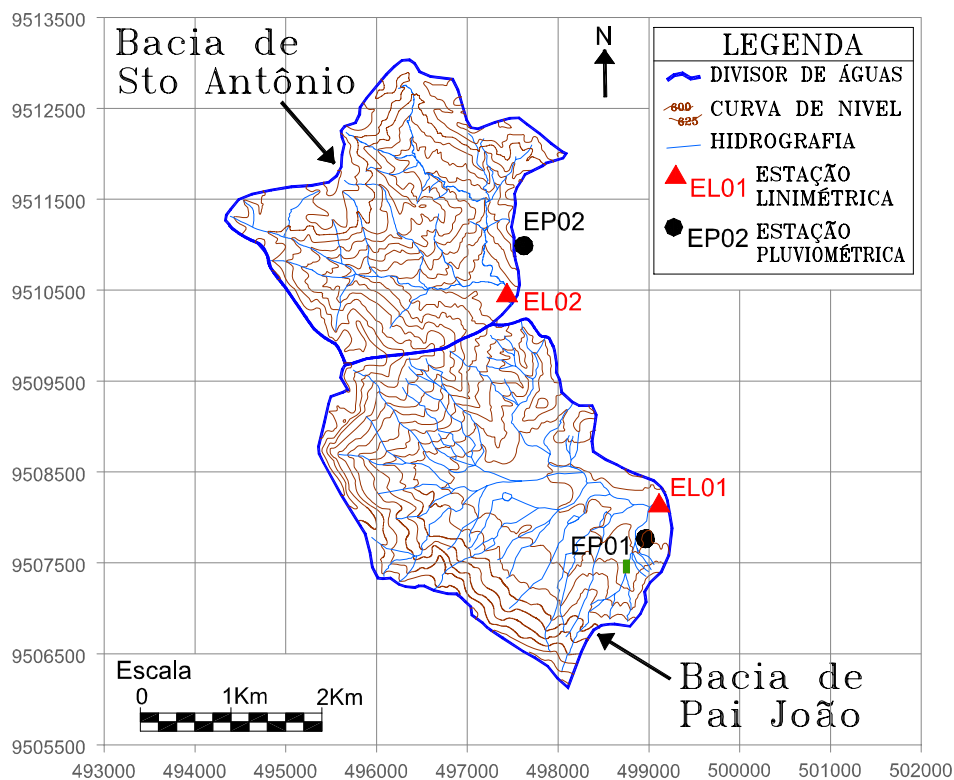


Figura 4.4 – Localização de equipamentos de medição hidrológica nas bacias de Pai João e Santo Antônio



Figura 4.5 – Pluviômetros instalados nas Bacias de Pai João e Santo Antônio

4.2.2. Medição e Estimativa de Vazões Afluentes

Para a estimativa de descarga líquida no exutório das bacias realizaram-se campanhas durante o período de chuvas, em que houve escoamento no rio principal, para medição de vazões a vau com a utilização de micro-molinete (Figura 4.6). Essas medidas foram relacionadas à profundidade do nível d'água no momento da medição e utilizadas na confecção de curvas-chave de vazões afluentes que foram utilizadas posteriormente na estimativa de vazões diárias a partir dos registros de nível d'água no exutório.



Figura 4.6 – Medição de vazão utilizando micro-molinete

No ano de 2007, na Bacia de Pai João a afluência no rio principal deu-se início apenas no dia 18 de abril, a partir de então, estabeleceu-se um escoamento de base, que sofreu influência também de outros eventos chuva-deflúvio e teve duração até o dia 07 de agosto do mesmo ano, quando o escoamento de seu rio principal cessou.

Na Bacia de Santo Antônio, o processo hidrológico dá-se de maneira distinta, existe maior interação rio aquífero, com a ocorrência de escoamento de base nesta área durante todo o ano, mesmo nos períodos secos em que não há precipitação. Este escoamento varia de 10 L.s^{-1} a 20 L.s^{-1} , em média 17 L.s^{-1} , com variações devido à influência dos eventos chuva-deflúvio.

No traçado da curva-chave de vazões para as duas bacias, aplicou-se a equação (4.5) de Manning de forma a obter uma extrapolação desta curva, permitindo a estimativa de vazões dos eventos extremos, em que não foi possível medição direta utilizando molinete.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_H^{\frac{2}{3}} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

Na equação (4.5) R_H é o raio hidráulico e S_0 é a declividade longitudinal do rio. Através da medição de vazões com molinete calibrou-se um coeficiente de rugosidade, n , de Manning para cada bacia. Os demais parâmetros da equação foram estimados a partir das características geométricas do canal principal. Para tal, foi realizado o levantamento de uma seção representativa no exutório de cada área. Dessa forma, a partir dos registros de nível d'água nas bacias de Pai João e Santo Antônio realizou-se a estimativa de vazões diárias, através da equação 4.6.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot S_0^{\frac{1}{2}} \cdot f(y) \quad (4.6)$$

Em que, $f(y) = A \cdot R_H$, a variação desta função ocorre de acordo com a variação dos registros de nível d'água.

4.2.3. Medição da Descarga Sólida em Suspensão

Durante os eventos chuva-deflúvio, realizaram-se coletas de amostras para análises da concentração de material sólido em suspensão. As concentrações medidas foram, então, relacionadas às respectivas vazões instantâneas medidas com micro-molinete ou estimadas pela curva-chave de vazões a partir de registros de nível d'água no momento da coleta de forma a compor uma curva-chave de sedimentos que relacionasse descarga líquida e sólida, utilizada na estimativa anual da produção de sedimentos, computando a taxa de descarga sólida em suspensão dos eventos chuva-deflúvio e dos demais dias em que houve escoamento nessas áreas e que não houve medição da concentração de sedimentos em suspensão.

4.2.4. Modelagem da Taxa de Transporte de Fundo

Para realizar a estimativa da taxa de transporte de fundo ou carga de leito, uma vez que não foi possível realizar sua medição, implementou-se um modelo em linguagem de programação Fortran, tendo por base os métodos desenvolvidos por Einstein (1942) e Brown (1943) *apud* Bogárdi (1974) e Haan *et al.* (1994). O modelo utiliza os dois métodos, pois a relação de Einstein (1942) foi desenvolvida para material de leito com partículas de granulometria uniforme, dessa forma, optou-se pela relação desenvolvida por Brown (1943) para a faixa em que foi medido de acordo com a Figura 4.7, fora desta faixa o modelo utiliza a relação original de Einstein. Os métodos e as equações do modelo são descritas em seguida.

- Método de Einstein (1942)

A relação desenvolvida por Einstein (1942) para transporte de sedimentos de fundo foi baseada na teoria da probabilidade. O método assume que a probabilidade de uma partícula de leito começar o movimento em determinado período de tempo pode ser relacionada à taxa de transporte, ao diâmetro da partícula, ao seu peso específico e ao fator tempo que depende da razão entre a velocidade de queda e o diâmetro da partícula do leito. A mesma probabilidade pode ser expressa como uma função da razão entre as forças exercidas pelo fluxo e a resistência ao movimento. A relação foi então obtida pelo equacionamento destas duas probabilidades (Bogárdi, 1974).

O fator tempo, f , é um adimensional para velocidade de sedimentação, definido pela equação (4.7),

$$f = \frac{\omega}{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)^{1/2} \cdot g^{1/2} \cdot d^{1/2}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{g \cdot d^3 \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{g \cdot d^3 \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} \quad (4.7)$$

em que, ω = velocidade de sedimentação da partícula de leito (m/s), ν = coeficiente de viscosidade cinemática (m²/s), ρ_s = densidade da partícula, ρ = densidade do fluido, d = diâmetro da partícula (m), g = aceleração a gravidade, γ_s = peso específico da partícula (N/m³), γ = peso específico do fluido (N/m³).

O parâmetro de intensidade de transporte de Einstein, Φ , também adimensional é relacionado à descarga de sedimento de fundo por unidade de largura q_B (N.s⁻¹.m⁻¹), através da equação 4.8

$$\Phi = \frac{q_B}{f \cdot \gamma_s} \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma}\right) \cdot \frac{1}{g \cdot d^3}} \quad (4.8)$$

A intensidade de transporte de material de leito Φ é função de um parâmetro Ψ adimensional, denominado parâmetro de intensidade de fluxo, expresso pela equação 4.9

$$\Psi = \frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot d}{\tau_o} = \frac{(\gamma_s - \gamma) \cdot d}{\gamma \cdot R_H \cdot S_f} \quad (4.9)$$

em que, τ_o = tensão de atrito da água sobre o leito (N/m²), R_H = raio hidráulico da seção molhada representativa do canal (m), e S_f = declividade da linha de energia (m/m). Baseado em dados obtidos experimentalmente, Einstein propôs uma relação entre os parâmetros Ψ e Φ , que representam intensidade de fluxo e de transporte de sedimentos, respectivamente, (equação 4.10).

$$0,465 \cdot \Phi = e^{-0,391 \cdot \Psi} \quad (4.10)$$

Segundo Bogárdi (1974), esta relação numérica foi desenvolvida para carga de leito com partículas de tamanho uniforme.

-Método de Einstein-Brown (1943)

Neste método o parâmetro de intensidade de transporte, é denotado por Φ' em distinção ao parâmetro de Einstein Φ . Está relacionado à descarga de sedimento de fundo por unidade de largura q_B (N/s/m), através da equação 4.11

$$\Phi' = \frac{q_B}{\gamma \cdot \sqrt{g \cdot \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) \cdot f \cdot d^{3/2}}} \quad (4.11)$$

A relação (4.12) entre os parâmetros Φ' e Ψ foi obtida a partir de resultados de vários experimentos em bacias, apresentados na Figura 4.7,

$$\Phi' = 40 \cdot \left(\frac{1}{\Psi} \right)^3 \quad (4.12)$$

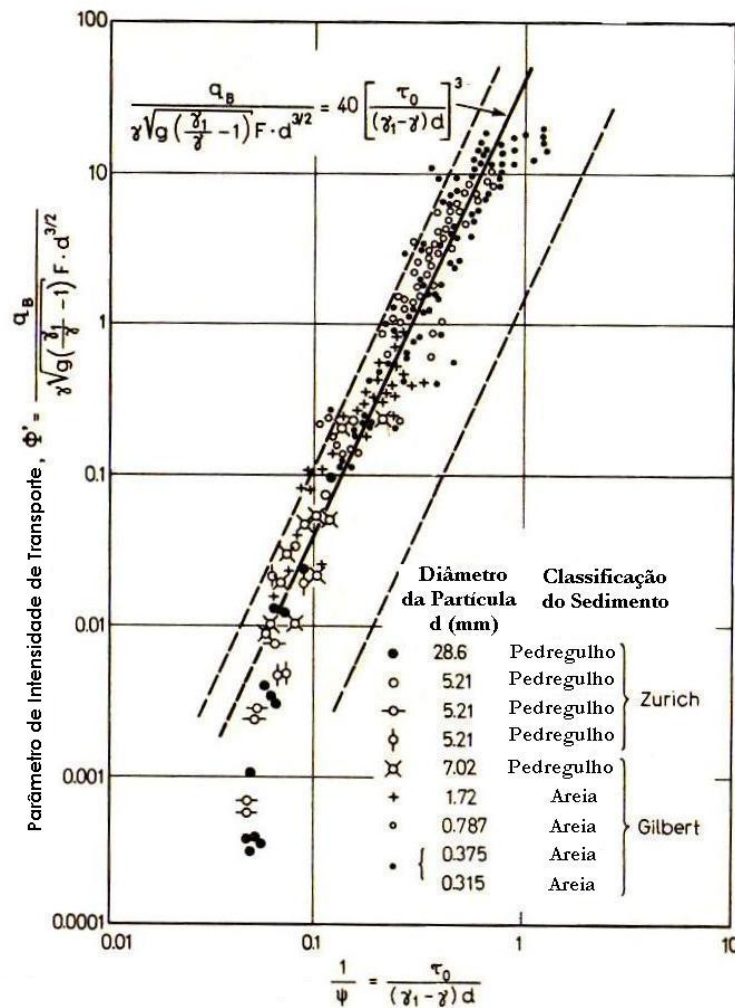


Figura 4.7 – Avaliação da relação de Einstein – Brown para estimativa da taxa de transporte de fundo, resultado de vários experimentos em bacias. Fonte: Bogárdi (1974)

- Estimativa dos Parâmetros de entrada do modelo

O modelo é capaz de simular a taxa de transporte de fundo para cada evento de acordo com as características hidráulicas do escoamento no canal. São parâmetros de entrada do modelo: o raio hidráulico R_H (m) e a largura do leito do canal w (m), que variam de acordo com o nível d'água em cada evento chuva-deflúvio. São necessários ainda, a declividade da linha de energia S_f ($m \cdot m^{-1}$), o coeficiente de viscosidade cinemática do fluido ν ($m^2 \cdot s^{-1}$) e o peso específico do fluido γ ($N \cdot m^{-3}$). Com relação aos parâmetros relativos ao sedimento transportado pelo leito, são necessários peso específico da partícula γ_s ($N \cdot m^{-3}$) e os diâmetros representativos da partícula d (m).

Para realizar a estimativa dos parâmetros do modelo relativos às características do sedimento, realizou-se coleta de material de leito em uma seção do exutório de cada bacia. Através de ensaios em laboratório foram determinados a granulometria deste material e a sua densidade. O modelo permite a entrada de vários diâmetros representativos da partícula de sedimento transportada pelo fundo. Para as áreas em estudo, a entrada no modelo foi realizada com os seguintes diâmetros, d_{10} (diâmetro de 10% do que passa), d_{30} , d_{50} , d_{70} , e d_{90} , estimados a partir da curva granulométrica do material de leito.

4.2.5. Avaliação da Produção de Sedimentos na Bacia de Pai João

O aporte de sedimentos que chega ao exutório da Bacia de Pai João foi estimada com base nos eventos em que houve monitoramento de descargas sólidas em suspensão, na curva-chave de sedimentos determinada para a área, e na modelagem do transporte de leito. Dessa forma, o aporte total foi estimado somando-se as cargas em suspensão obtidas diretamente por medição ou pela equação da curva-chave às respectivas descargas de leito, para todos os dias em que houve deflúvio na área (período de 18/04/07 a 07/08/07).

Realizou-se ainda, estimativa da produção anual de sedimentos na área caso não houvesse interferências de barragens de água e de microbarramentos de contenção de sedimentos. No balanço de sedimentos da bacia foram computados o total de sedimentos que chega ao exutório, a retenção de sedimentos nos microbarramentos e a retenção nas três pequenas barragens de acumulação de água existentes na área, utilizando a seguinte relação (4.13):

$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = \dot{M}_e - \dot{M}_s \quad (4.13)$$

em que, $\Delta M/\Delta t$ é a variação da massa de sedimentos no tempo, \dot{M}_e é a massa de sedimentos que entra no sistema, \dot{M}_s é a massa que sai do sistema e corresponde ao aporte de sedimentos no exutório. A estimativa de acumulação de sedimentos nas três barragens de água existentes na bacia foi realizada utilizando a curva empírica de Brune (1953), *apud* Haan *et al.* (1994), em que é necessário o volume de acumulação de água dos reservatórios. O volume de acumulação de água das barragens foi estimado utilizando-se a equação de capacidade de armazenamento de reservatórios de Molle e Cadier (1992), que tem por base dados de geometria dos reservatórios que foram obtidos de imagens de satélite e do mapa topográfico da área. Os reservatórios com capacidades de acumulação de 40.900 m³, 15.400 m³ e 11.400 m³ apresentaram respectivas eficiência de retenção de sedimentos de 93%, 95% e 100% (nesse caso não houve sangria em 2007).

A estimativa de sedimentos que é retido nos microbarramentos foi realizada através de experimento realizado com três microbarramentos sucessivos localizados na bacia de Pai João. Foram levantados o cota-volume desses microbarramentos e em cada uma foi instalada uma régua de precisão, fazendo-se coincidir o zero com o nível mínimo do reservatório, permitindo avaliar a acumulação de sedimentos através do gráfico cota x volume ao longo do ano de 2007. Para avaliar a massa de sedimentos retida nas barragens foram realizados ensaios para determinar a massa específica aparente seca do material acumulado, que foi estimada em 1,3 g.cm⁻³. Monitorou-se ainda, vazão e concentração de sedimentos em uma seção de controle imediatamente a jusante do terceiro barramento sucessivo, para avaliar a massa de sedimentos que passa a jusante da terceira barragem (ver Araújo *et al.*, 2007).

O valor médio de sedimentos acumulados em um microbarramento para o ano de 2007, com base nas medições realizadas em três microbarramentos sucessivos foi extrapolado para os 37 microbarramentos localizados na bacia de Pai João, ainda com capacidade de acumulação no ano de 2007, de acordo com o levantamento realizado no período antecedente as chuvas do mesmo ano, a fim de estimar o total de sedimentos no ano de 2007 que se acumulou nas barragens de contenção.

4.2.6. Simulação com HIDROSED2 na Bacia de Pai João

A simulação do HIDROSED2 na Bacia de Pai João se resumiu à calibração do parâmetro de transporte K_v e a uma avaliação da aplicabilidade do modelo para estimar a carga de sedimentos de eventos isolados. Não foi realizada validação do modelo nessa bacia, pois houve apenas um ano de monitoramento na área com dados apenas de seis eventos utilizados na calibração do modelo. Além disso, devido a características de escoamento da área o modelo não se aplica a estimativa anual de produção de sedimentos, uma vez que este é orientado a eventos chuva-deflúvio e simula a contribuição de sedimentos das encostas, não sendo capaz de simular a contribuição de sedimentos do canal e dos dias com escoamento de base apenas.

- Parametrização do Modelo HIDROSED2 para a Bacia de Pai João

Para parametrizar o modelo, realizou-se inicialmente uma discretização da área em quatro sub-bacias de acordo com a Figura 4.8. A divisão em células foi baseada apenas na topografia da área e na rede de drenagem.

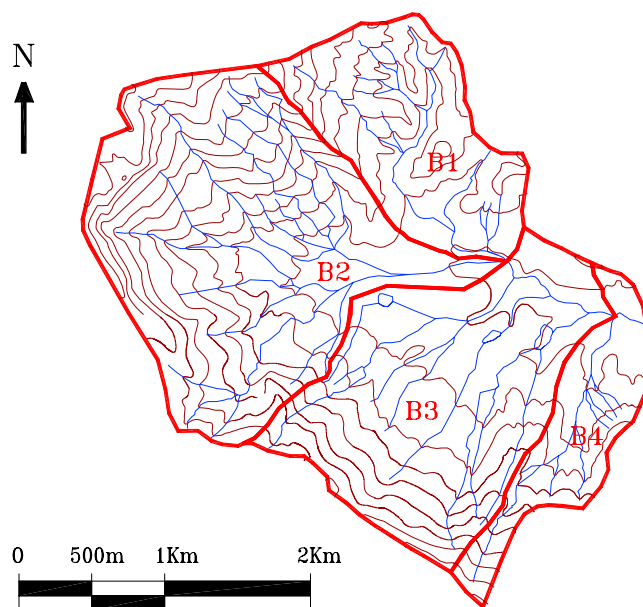


Figura 4.8 - Discretização da Bacia de Pai João em sub-bacias para aplicação do modelo HIDROSED2

Com relação aos parâmetros relacionados aos eventos, sua estimativa foi realizada como explicado a seguir.

O fator R de erosividade da chuva ($\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$) foi calculado tendo por base a precipitação pluviométrica medida em um único pluviômetro instalado na área, dessa forma, não se realizou a distribuição espacial deste parâmetro, que foi considerado igual e constante em todas as células, para cada evento. Os valores de erosividade da chuva variaram de 112 $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$ a 588 $\text{MJ.mm.ha}^{-1}.\text{h}^{-1}$, para os seis eventos analisados. Entretanto, para determinar a distribuição temporal da chuva, necessária para o cálculo daquele parâmetro, foram utilizados dados de pluviometria (medidos em intervalos de 1 hora) da Plataforma de Coleta de Dados (PCD) da FUNCEME, localizada no Município de Aracoiaba, a aproximadamente 28 km a leste da área de estudo.

A opção pelos dados da PCD de Aracoiaba ocorreu devido a esta ter localização mais próxima e apresentar características climatológicas mais semelhantes à área de estudo em comparação com outros municípios, uma vez que não foi possível a utilização de dados da PCD de Aratuba, município onde se localiza a bacia, devido a problemas neste equipamento, o que comprometeu o registro de dados pluviométricos no ano de 2007.

Por não ser possível a medição direta da lâmina escoada (mm) nas encostas, o seu valor foi estimado a partir da divisão entre a vazão afluente no exutório e a área da bacia. Esta lâmina foi considerada igual e constante em todas as células. As vazões afluentes por sua vez foram estimadas a partir dos hidrogramas diários obtidos no exutório com base nas medidas de nível d'água. A duração do escoamento superficial (min) foi considerada igual à duração da precipitação devido à não disponibilidade daquele dado, que por sua vez foi considerado igual à duração da chuva medida na PCD de Aracoiaba.

Os parâmetros relacionados à fisiografia ou características geométricas foram estimados a partir do mapa topográfico da área para cada sub-bacia, disponível em escala de 1:25.000, com curvas de nível eqüidistantes de dez metros.

Com relação ao fator C, que representa o efeito da cobertura vegetal e usos do solo, este foi determinado para cada sub-bacia a partir do mapa temático de vegetação, uso e ocupação da área, elaborado por Eichert (2008). Os seguintes fatores foram adotados em função das classes apresentadas: para vegetação natural foi assumido valor de 0,001, para agricultura 0,300 e para áreas degradadas e urbanizadas foi admitido valor igual a 1. Estes valores foram

adotados com base nos valores de C determinados no estudo de Roose (1977) *apud* Reining (1992). Em função do percentual de área correspondente a cada classe, calculou-se um C equivalente para cada subbacia, utilizado nas simulações do modelo. O fator C médio para a bacia de Pai João determinado foi igual 0,019.

O valor médio de erodibilidade do solo medido na bacia foi de $K = 0,015$ ($\text{ton.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$), classificado como erodibilidade fraca, de um total de 31 valores apresentados por Silva (2007) determinados a partir de amostras de solo coletadas na Bacia de Pai João. A densidade real das partículas minerais foi assumida como sendo igual a 2,65, que corresponde à densidade específica do grão de quartzo e a velocidade de sedimentação foi admitida igual a $0,1 \text{ m.s}^{-1}$.

4.2.7. Avaliação da Produção de Sedimentos na Bacia de Santo Antônio

A produção de sedimentos na Bacia de Santo Antônio no ano de 2007 foi contabilizada como resultado do aporte de sedimentos que chega ao exutório desta área nos 365 dias de escoamento superficial na área.

A carga de sedimentos diária foi contabilizada somando-se as cargas em suspensão às cargas de leito. As cargas em suspensão foram avaliadas através de concentrações de sedimentos monitoradas em alguns dias ou pelas equações de curva-chave de sedimentos determinadas para a bacia com base nestas medições e associadas às respectivas descargas líquidas. As cargas de leito foram avaliadas por simulações com o modelo EB, desenvolvido neste trabalho. A parametrização deste modelo teve por base a determinação de seus parâmetros relativos ao material de leito, a características geométricas e hidráulicas a partir de medições em campo.

4.2.8. Simulação com HIDROSED2 na Bacia de Santo Antônio

Na Bacia de Santo Antônio a simulação com o modelo HIDROSED2 também se restringiu a calibração do parâmetro de transporte K_v , com base nos quinze eventos monitorados no ano de 2007. Consistiu também, em avaliar a sua aplicabilidade na estimativa da carga de sedimentos de eventos isolados nesta área, uma vez que o modelo não tem capacidade de

prever uma produção de sedimentos anual em sistemas onde o escoamento se dá de forma perene, como no caso desta bacia.

- Parametrização do Modelo HIDROSED2 para a Bacia de Santo Antônio

A parametrização do modelo para a Bacia de Santo Antônio consistiu inicialmente em uma discretização da área em seis sub-bacias de acordo com a Figura 4.9. A divisão em células foi baseada apenas na topografia da área e na rede de drenagem.

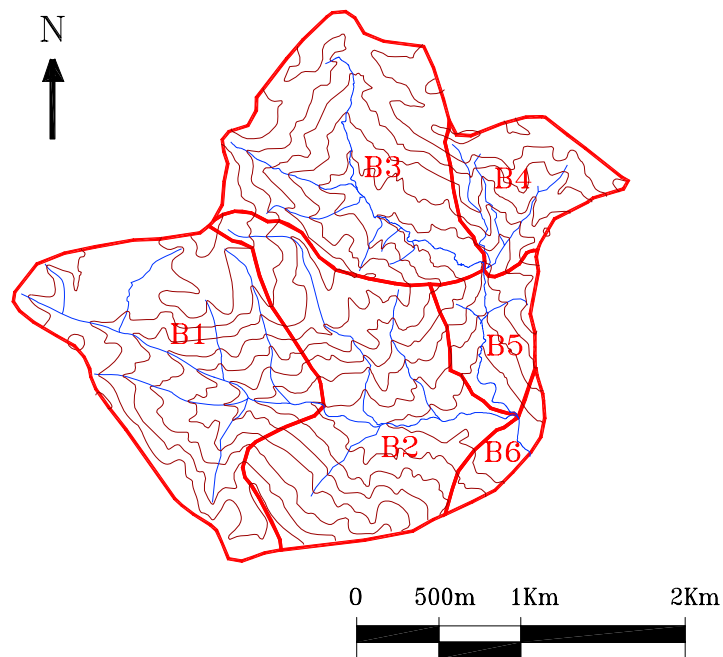


Figura 4.9 - Discretização da Bacia de Santo Antônio em sub-bacias para aplicação do modelo HIDROSED2

A estimativa dos parâmetros relacionados aos eventos foi realizada como explicado a seguir.

O fator R de erosividade da chuva ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) foi obtido de forma similar a Bacia de Pai João, ou seja, com base nos dados de chuva coletados no pluviômetro instalado nessa bacia e na distribuição temporal da chuva medida na PCD de Aracoiaba. Os valores de erosividade da chuva variaram de $39 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ a $235 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, para os quinze eventos analisados. Dessa forma, não foi realizada distribuição espacial deste parâmetro que foi considerado igual e constante em todas as subbacias.

A lâmina escoada (mm) foi estimada a partir da divisão entre a vazão afluyente no exutório e a área da bacia. Esta lâmina foi considerada igual e constante em todas as células. As vazões afluentes foram estimadas a partir dos hidrogramas diários obtidos no exutório com base nos registros de nível d'água. A duração do escoamento superficial (min) foi considerada igual à duração da precipitação devido à não disponibilidade daquele dado, que por sua vez foi considerado igual à duração da chuva medida na PCD de Aracoiaba.

Os parâmetros geométricos e de fisiografia foram estimados a partir do mapa topográfico da área para cada sub-bacia, disponível em escala de 1:25.000, com curvas de nível eqüidistantes de dez metros.

O fator C, que representa o efeito da cobertura vegetal e usos do solo, foi determinado para cada subbacia a partir do mapa temático de vegetação, uso e ocupação da área. Os seguintes valores foram assumidos em função das classes apresentadas: 0,001 para vegetação natural, para agricultura 0,300 e para áreas degradadas e urbanizadas o valor foi igual a um. Em função do percentual de área correspondente a cada classe, calculou-se um C equivalente para cada subbacia, utilizado nas simulações do modelo. O fator C médio para a bacia de Pai João determinado foi igual 0,022.

O valor médio de erodibilidade do solo da bacia foi de $K = 0,024$ (ton.h.MJ⁻¹.mm⁻¹), classificado como erodibilidade média, de um total de nove valores apresentados por Nascimento (2007) determinados a partir de amostras de solo coletadas na Bacia de Pai João. A densidade real das partículas minerais foi assumida como sendo igual a 2,65, que corresponde à densidade específica do grão de quartzo. A velocidade de sedimentação foi admitida igual a 0,1 m.s⁻¹.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Bacia Experimental de Aiuaba (BEA)

5.1.1. Medição da Carga de Sedimentos

As medições de concentração de sedimentos apresentaram valores na faixa de 100 mg.L⁻¹ a 2.000 mg.L⁻¹, considerando-se os eventos extremos que ocorreram no ano de 2004. A curva-chave de sedimentos (Figura 5.1) foi obtida através de regressão com equação na forma de potência, apresentando coeficiente de determinação R² igual a 0,93 e coeficiente de eficiência estatística de Nash e Sutcliffe (1970) igual a 0,85. A equação (5.1) foi obtida para vazões afluentes na faixa de 3 L.s⁻¹ a 800 L.s⁻¹. Na referida equação, Q_S é a descarga sólida (Kg.s⁻¹) e Q_L a descarga líquida (L.s⁻¹).

$$Q_S = 9E^{-05} \cdot Q_L^{1,3979} \quad (5.1)$$

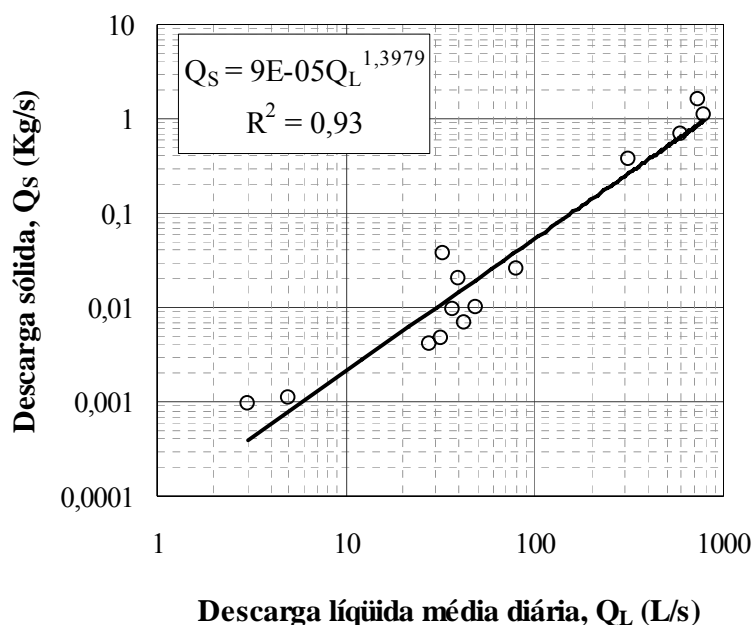


Figura 5.1 – Curva-chave de sedimentos da Bacia Experimental de Aiuaba

Realizou-se ainda uma avaliação da equação obtida comparando-se para os 14 eventos monitorados entre 2004 e 2007, os valores de carga de sedimentos observados e calculados pela curva-chave (equação 5.1). O resultado individual por evento é apresentado na Tabela

5.1. A diferença entre os valores calculados e observados variou de -68% a +140%, não tendo sido observado forte tendência, pois a variação hora foi positiva e hora negativa. A curva-chave, no entanto, tendeu a subestimar a produção de sedimentos, pois a diferença acumulada para os eventos analisados foi de -22% em relação ao observado.

Tabela 5.1 – Comparação entre os valores de Carga de Sedimentos em suspensão observados e calculados pela equação da curva-chave.

Evento	Carga de Sedimentos (Kg)		Diferença relativa (%)
	Observada	Curva-chave	
23/1/2004	1.728	1.350	-22
25/1/2004	32.763	24.270	-26
3/2/2004	95.437	87.213	-9
16/2/2004	138.627	79.134	-43
24/2/2004	58.254	59.752	3
20/3/2006	88	41	-54
23/3/2006	94	74	-22
9/4/2006	827	1.210	46
1/5/2006	604	1.445	139
1/1/2007	406	976	140
20/2/2007	351	805	129
18/4/2007	865	1.771	105
22/4/2007	3.204	1.040	-68
29/4/2007	2.239	3.533	58
Total	335.488	262.615	-22

5.1.2. Modelagem da Carga de Sedimentos com HIDROSED2

O processo de calibração do parâmetro de transporte resultou em K_v igual a 0,51 para a Bacia Experimental de Aiuaba, que tem vegetação bastante homogênea (caatinga arbustiva-arbórea conservada) com fator de cobertura vegetal C igual a 0,006. Correlacionando-se estes valores, observa-se que o parâmetro de transporte calculado encontra-se dentro da tendência das bacias de clima tropical, segundo análise realizada por Araújo (2007).

A validação do modelo utilizando K_v calibrado foi realizada para os nove eventos medidos em 2006 e 2007. A Figura 5.2 apresenta a carga de sedimentos acumulada obtida na simulação com o HIDROSED2, além de sua comparação com o observado e com a estimativa realizada através da equação da curva-chave de sedimentos determinada para a BEA.

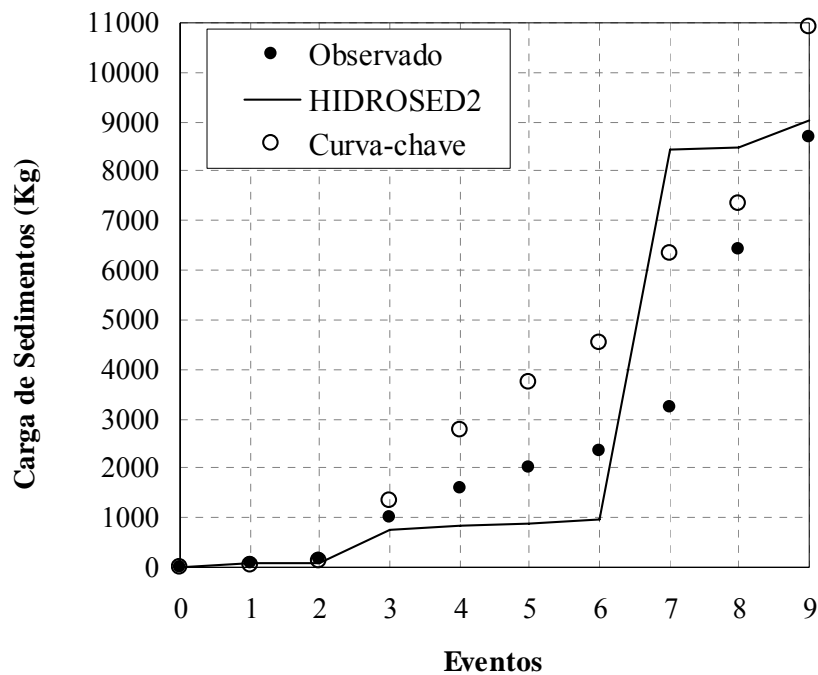


Figura 5.2 – Comparação da carga acumulada de sedimentos observada, estimada com base na curva-chave e simulada com HIDROSED2 na Bacia Experimental de Aiuaba. Eventos monitorados em 2006 e 2007

A carga de sedimentos total simulada com o HIDROSED2 para os nove eventos de 2006 e 2007, apresentou diferença apenas de 4% em relação ao observado. Já na estimativa pela equação da curva-chave a diferença em relação ao observado foi de 26%.

Com relação ao resultado individual por evento, o desempenho do modelo não foi satisfatório, o erro variou de -87% a +765%, como mostrado na Tabela 5.2, o que pode estar associado a incertezas na determinação dos parâmetros de entrada ou limitação do próprio modelo. O modelo mostrou-se bastante sensível à variação do escoamento superficial nas encostas e à duração deste escoamento, variáveis estimadas indiretamente através da medição da vazão afluente ao reservatório e da duração da precipitação. Isto pode ter conduzido a uma subestimativa da lâmina escoada nas encostas nestes eventos devido ao processo de perdas em trânsito que pode ocorrer na bacia devido à característica da geologia local (área localizada em zona de cisalhamento com presença de fraturas abertas). Esta característica da área sugere a necessidade de uma avaliação das perdas em trânsito, conduzindo a um melhor entendimento dos processos de transporte de água e sedimento na área, e a estimativas mais adequadas dos parâmetros do modelo.

Incertezas ainda podem estar associadas à estimativa da erosão bruta por meio da USLE, equação empírica desenvolvida para lotes agrícolas e não destinada a modelar eventos. Isso sugere a aplicação de outras metodologias na determinação da erosão bruta, a fim de avaliar a incerteza desta abordagem. Também não deve ser descartado o erro no próprio processo de medição, conduzindo a incertezas na estimativa da produção de sedimentos.

Tabela 5.2 – Resultado por eventos da validação do Modelo HIDROSED2 na Bacia Experimental de Aiuaba (2006-2007)

Evento	Carga de sedimentos (Kg)		Diferença relativa (%)	Lâmina escoada (mm)	Duração do escoamento (min)
	Observada	Simulada			
20/3/2006	88	80	-10	0,024	130
23/3/2006	94	13	-87	0,037	220
9/4/2006	827	655	-21	0,347	105
1/5/2006	604	93	-85	0,314	380
1/1/2007	406	54	-87	0,233	360
20/2/2007	351	77	-78	0,201	385
18/4/2007	865	7.475	+765	0,352	90
22/4/2007	3.204	33	-99	0,235	590
29/4/2007	2.239	534	-76	0,575	430
Total	8.678	9.012	4	-	-

5.1.3. Avaliação da Produção de Sedimentos no Período 2003 - 2007

Realizou-se ainda estimativa da produção de sedimentos para os anos de 2003 a 2007 na Bacia Experimental de Aiuaba por meio de simulações com o HIDROSED2 e pela equação da curva-chave. A comparação entre estes métodos é apresentada na Figura 5.3, através do resultado individual de cada evento. Observa-se que, para os pequenos eventos, a tendência do modelo é de subestimativa em relação aos valores calculados pela equação da curva-chave de sedimentos. Entretanto, para os maiores eventos o modelo não apresentou tendência, e ainda a estimativa realizada pelos dois métodos mostra maior aproximação de seus resultados.

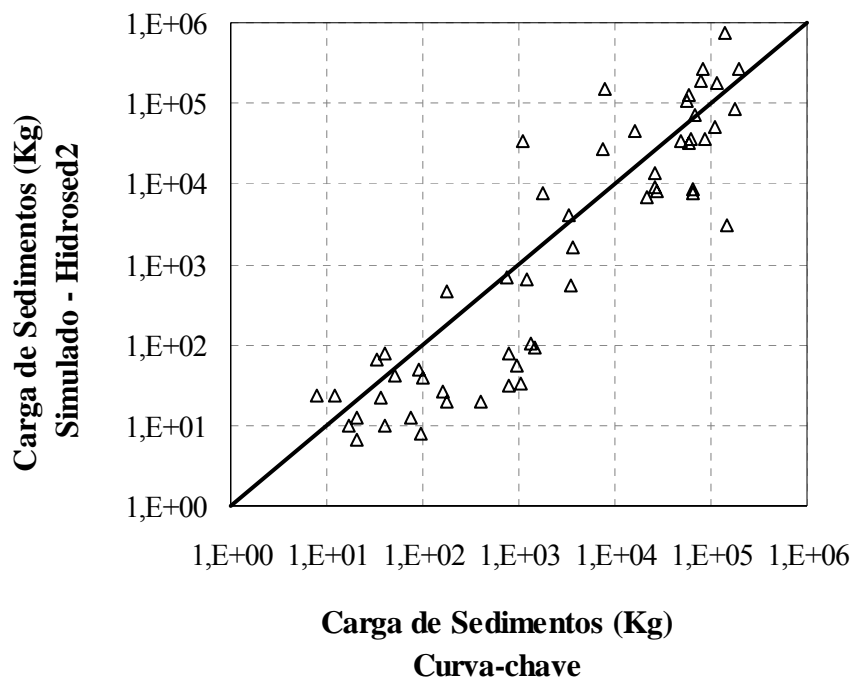


Figura 5.3 – Carga de sedimentos por evento (2003-2007), pelo método da curva-chave e pela simulação com o modelo HIDROSED2 na BEA.

A estimativa acumulada da carga de sedimentos é apresentada na Figura 5.4 para o período em estudo (2003 a 2007). O modelo HIDROSED2 apresentou diferença total de 46% em relação ao calculado pela equação de curva-chave.

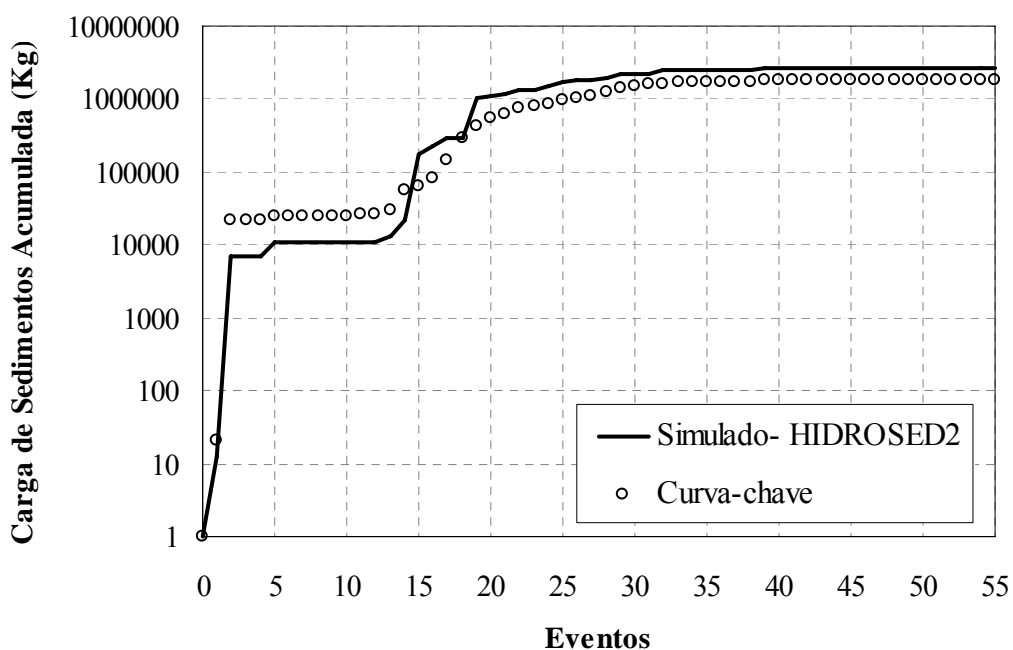


Figura 5.4 –Carga de sedimentos acumulada na Bacia Experimental de Aiuaba, para o período em estudo (2003-2007), estimada pela curva-chave e simulada pelo modelo HIDROSED2

A Tabela 5.3 apresenta uma síntese da estimativa de produção de sedimentos na Bacia Experimental de Aiuaba para o período de 2003 a 2007 em que foram analisados 55 eventos chuva-deflúvio. Observa-se que a produção de sedimentos no ano de 2004, ano de eventos extremos, corresponde a mais de 90% do total estimado no período pelos dois métodos.

Tabela 5.3 – Síntese da produção de sedimentos estimada no período de 2003 a 2007

Ano	Número de Eventos	Produção de Sedimentos (ton)		Percentual em relação ao Total	
		Curva-chave	HIDROSED2	Curva-chave	HIDROSED2
2003	8	24,9	11,0	1,4	0,4
2004	27	1.700,9	2.524,3	95,9	97,8
2005	6	36,2	35,8	2,0	1,4
2006	6	3,0	1,3	0,2	0,1
2007	8	9,1	8,9	0,5	0,3
Total	55	1.774,0	2.581,3	-	-
Produção de Sedimentos (ton.km ⁻² .a ⁻¹)		29,54	42,98		

- Considerações sobre a taxa de transporte difuso (SDR)

Avaliou-se ainda em cada evento, a taxa de transporte difuso (SDR) com base na equação (ver item 2.4.2) de entropia. Os valores variaram de 0,003% a 99%, variação apresentada na Figura 5.5 na forma de histogramas de SDR para o período total de observação (2003-2007) e para o ano de 2004. Verificou-se que todos os eventos com SDR maior que 10% ocorreram no ano de 2004 e que 60% dos eventos que ocorreram em 2004 apresentaram SDR maior que 90%. Para os anos de 2003, 2005, 2006 e 2007, do total de 26 eventos, todos apresentaram SDR menor que 10%, sendo 24 destes com SDR menor que 1%.

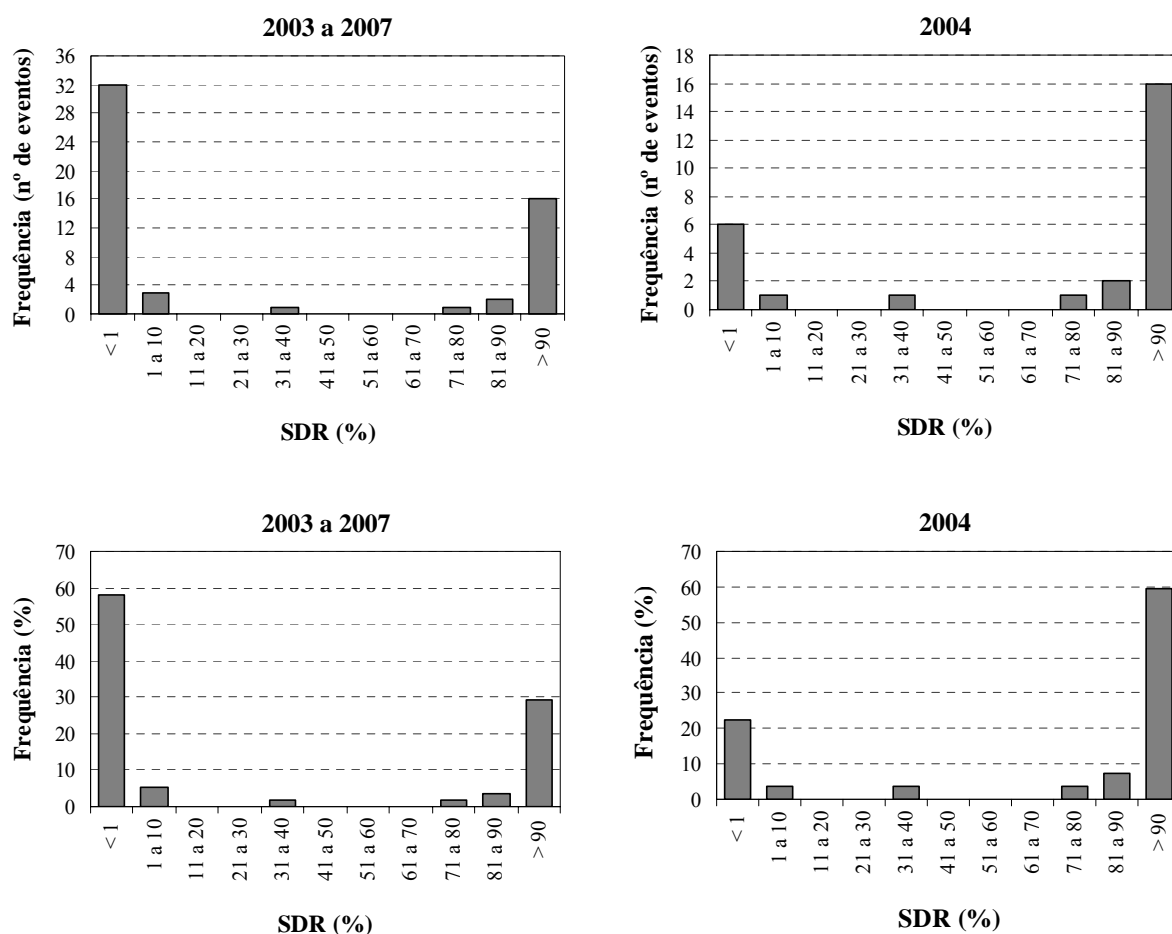


Figura 5.5 – Histogramas da taxa de transporte difuso (SDR) para o período em estudo (2003-2007) na Bacia Experimental de Aiuaba

As equações de Maner, Williams-Berndt e Roehl, que avaliam um valor médio de SDR com base apenas na fisiografia da bacia, apresentaram respectivamente valores de SDR iguais a 24%, 12% e 6% para a BEA. Dessa forma, avalia-se que esses valores de SDR seriam representativos para a área apenas em um ano de eventos extremos como 2004.

Analisando o SDR, comparou-se ainda a produção de sedimentos anual obtida através das simulações com o HIDROSED2 com a produção de sedimentos utilizando SDR médio na bacia com as equações de Maner, Williams-Berndt e Roehl. As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam a comparação entre os métodos.

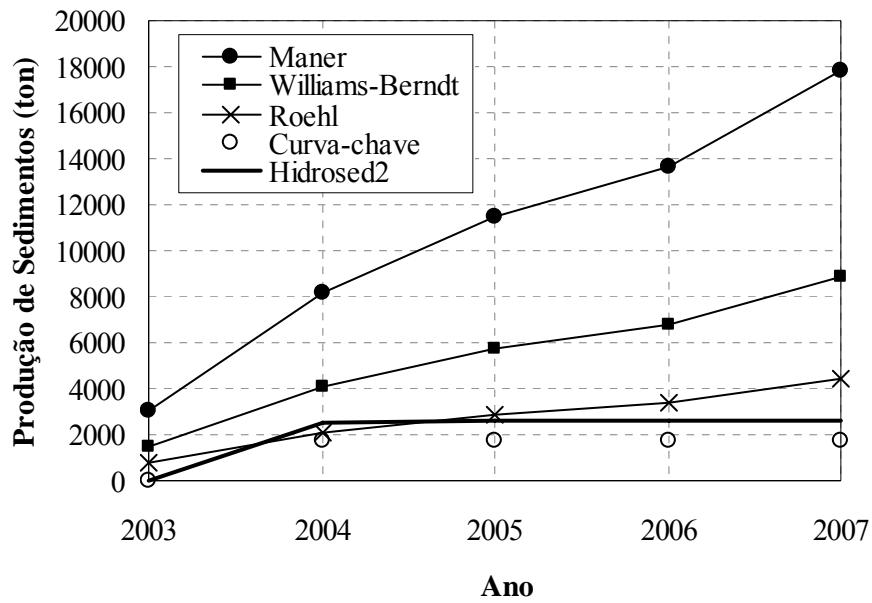


Figura 5.6 – Produção acumulada de sedimentos na BEA segundo curva-chave e quatro modelos de SDR, resultado anual para o período de 2003 a 2007

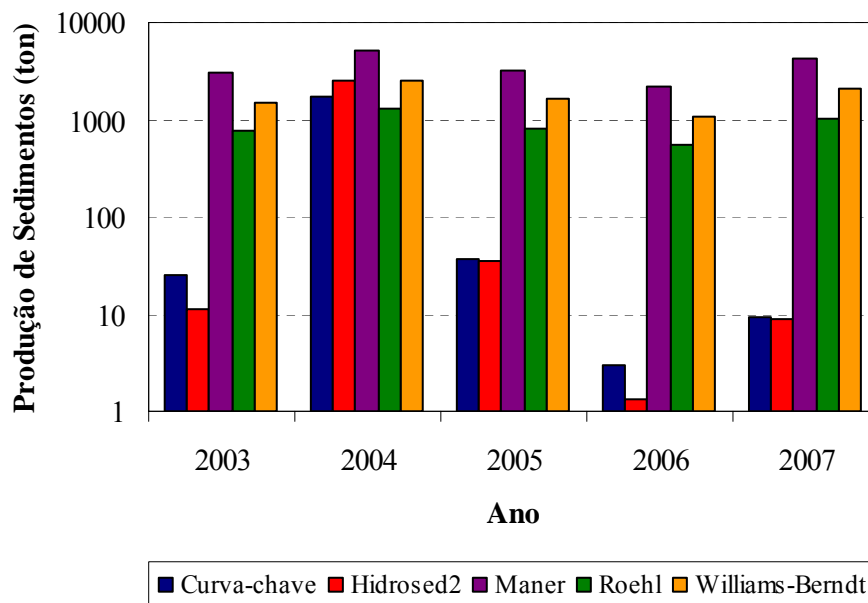


Figura 5.7 – Comparação entre os diferentes métodos de avaliação de produção de sedimentos (resultado anual) para a BEA entre 2003 e 2007

Os baixos valores observados de SDR na bacia, com exceção do ano de 2004, podem estar relacionados aos baixos valores de run-off observados na área. O coeficiente de run-off na área variou de 0,02% a 95,05%.

5.2. Bacia de Pai João

5.2.1. Estimativa de Vazões Afluentes

A Figura 5.8 apresenta a curva-chave de vazões para a seção controlada na Bacia de Pai João. Devido ao pouco tempo de escoamento nesta bacia no ano de 2007, só foi possível realizar quatro medições de vazão utilizando micro-molinete, na faixa de 30 L.s⁻¹ a 130 L.s⁻¹. Entretanto, com extrapolação da curva-chave de vazões através da equação de Manning foi possível determinar vazões nos eventos extremos a partir de correlação com a profundidade do nível d'água que variou de 0,05 m a 0,60 m nos maiores eventos, ou seja, com estimativa de vazões chegando a 800 L.s⁻¹. O coeficiente de rugosidade de Manning determinado foi igual a 0,20. Este valor é comparável ao encontrado por Chow (1959) para um rio em condições semelhantes de resistência ao escoamento, como mostrado na Figura 5.9.

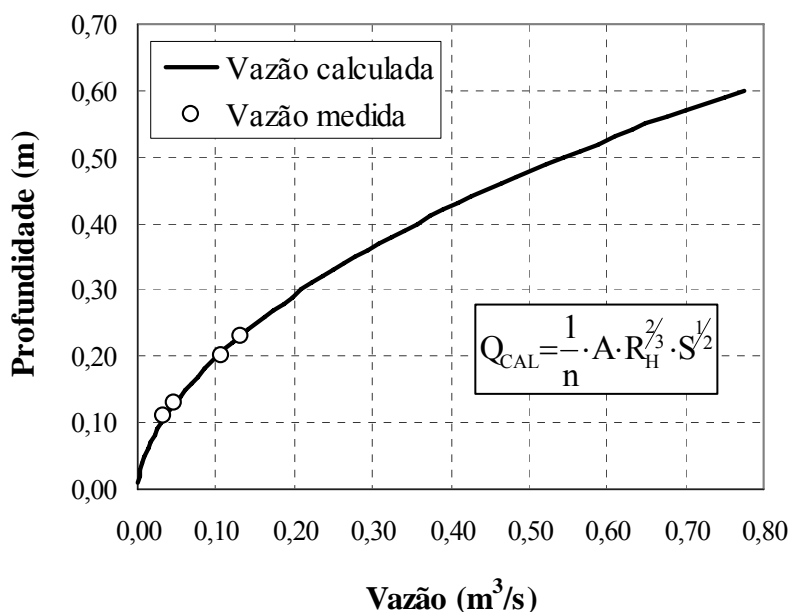


Figura 5.8 – Curva-chave de vazões da Bacia de Pai João, ano de 2007



(A) Riacho principal da Bacia de Pai João. Coeficiente de Rugosidade de Manning $n = 0,20$.



(B) Coeficiente de Rugosidade de Manning $n = 0,15$. Rio natural com margens e fundo irregulares. Curso sinuoso com muitas raízes, árvores e arbustos (Fonte: Chow, 1959)

Figura 5.9 – Fotos do riacho principal da Bacia de Pai João e apresentada por Chow (1959) com a finalidade de comparar os valores do coeficiente de Manning

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam as profundidades de nível d'água no rio e pluviometria medidas diariamente no exutório da bacia de Pai João, além dos hietogramas e hidrogramas correspondentes para o período de deflúvio (18/04/07 a 07/08/07, três meses), ou seja, para o ano em que ocorreu o monitoramento. Observa-se que o escoamento na área se dá de forma intermitente, apenas nos meses de abril a agosto com presença de escoamento de base. Mesmo após o período de chuvas ter cessado no dia 12 de maio de 2007 o escoamento teve ainda duração de aproximadamente dois meses, até o dia 07 de agosto de 2007. O deflúvio na área foi resultado de 14 eventos chuva-deflúvio. Com base nesses dados a lâmina anual escoada na área foi estimada em 68 mm, o que corresponde a um coeficiente de escoamento fluvial de 8%. Considerando apenas as vazões medidas nos dias de eventos de chuva e um escoamento de base médio de 10 L.s^{-1} , a lâmina total escoada em 2007 na bacia foi estimada em 53 mm, o que corresponde a um coeficiente de escoamento superficial de 7% em 2007.

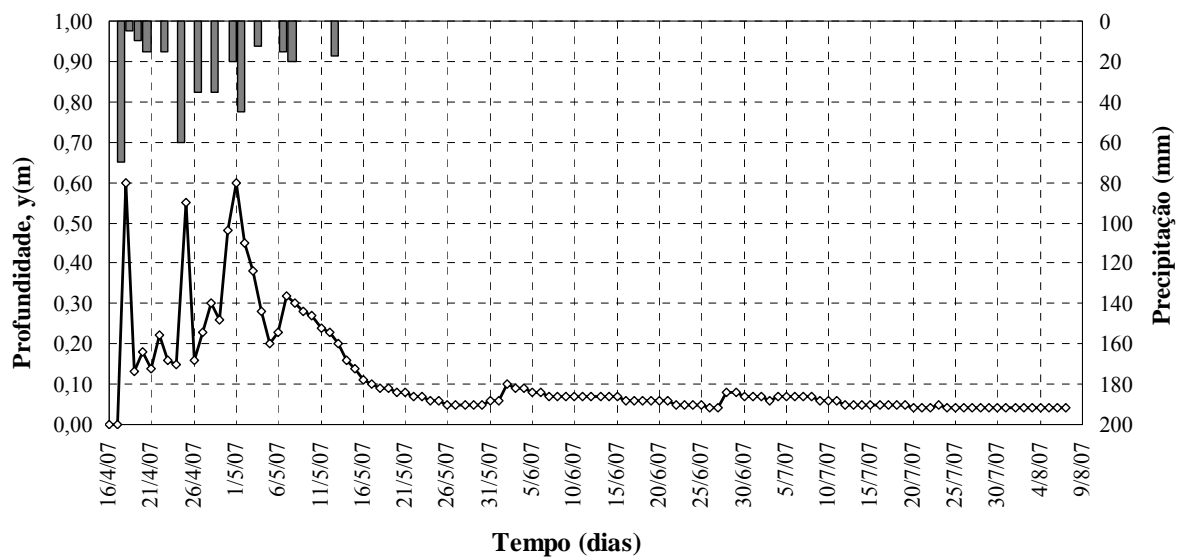


Figura 5.10 – Pluviometria e profundidade de nível d’água medidos diariamente na Bacia de Pai João (período de 18/04/07 a 07/08/07)

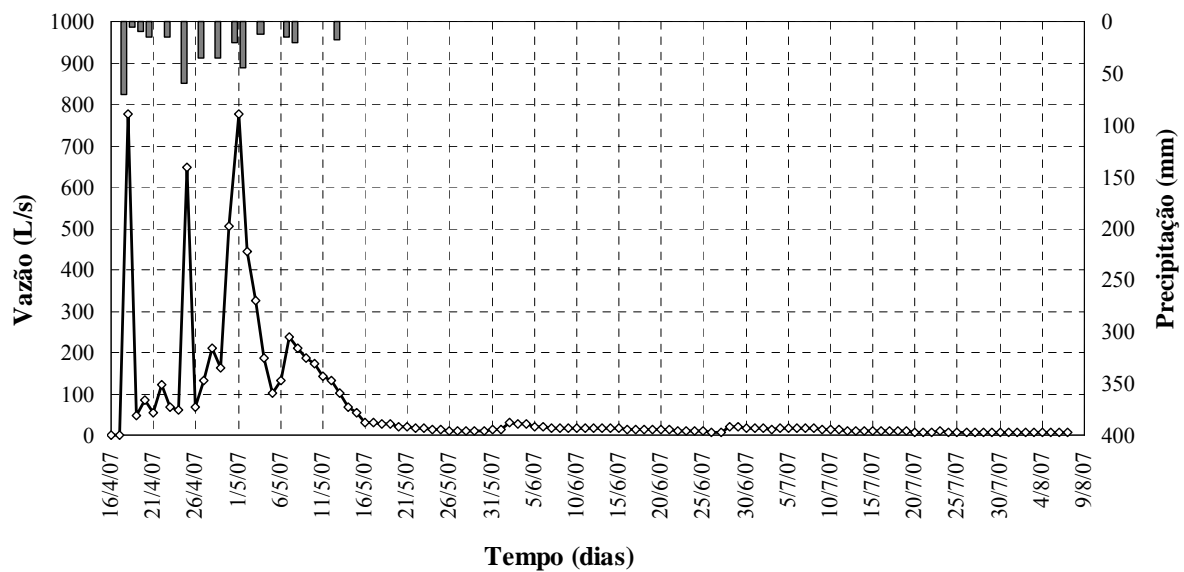


Figura 5.11 – Hietograma e hidrograma diários da Bacia de Pai João (período de 18/04/07 a 07/08/07)

5.2.2. Estimativa da Descarga Sólida em Suspensão

Determinou-se uma curva-chave de sedimentos em suspensão para a bacia de Pai João (Figura 5.12) a partir de eventos monitorados no ano de 2007. Esta foi obtida através de regressão com equação na forma exponencial, apresentando coeficiente de determinação R^2 igual a 0,90

e coeficiente de eficiência estatística de Nash e Sutcliffe (1970) igual a 0,91. A equação (5.2), na qual Q_{SS} é a descarga sólida em suspensão ($\text{Kg}\cdot\text{s}^{-1}$) e Q_{LI} é a descarga líquida instantânea, foi obtida para vazões afluentes na faixa de $30 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ a aproximadamente $800 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. As medições de concentração de sedimentos apresentaram valores na faixa de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ a $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, incluindo os dias com escoamento de base.

$$Q_{SS} = 0,0008 \cdot e^{0,0054 \cdot Q_{LI}} \quad (5.2)$$

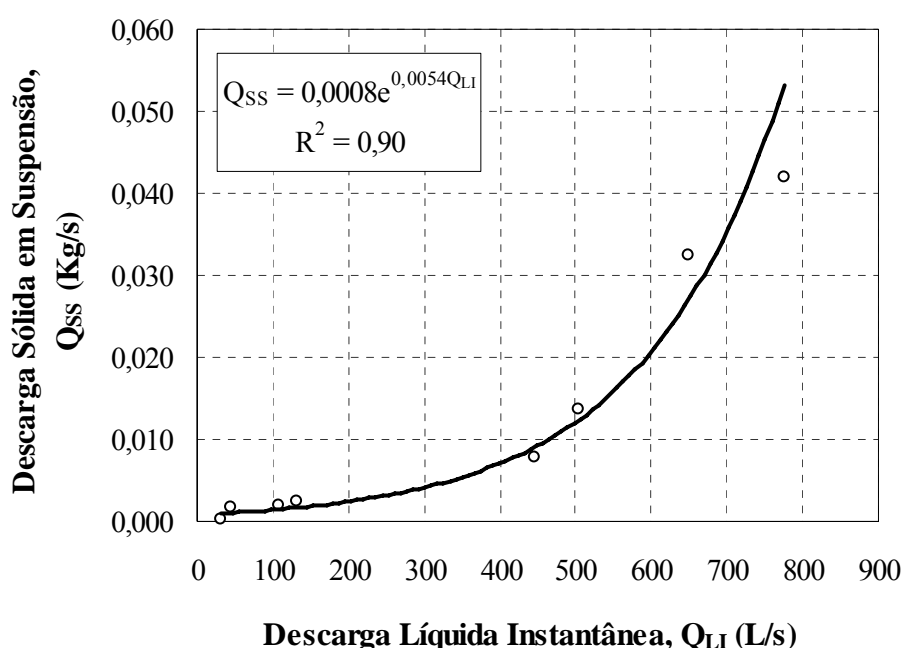


Figura 5.12 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da Bacia de Pai João, baseada em dados do ano de 2007

- Eventos Monitorados

Foram monitorados seis eventos chuva-deflúvio na Bacia de Pai João, no ano de 2007, os resultados de produção de sedimentos em suspensão dos referidos eventos são apresentados na Tabela 5.4. Devido ao sistema de medição de deflúvio utilizado na área, a estimativa do volume escoado durante os eventos ficou comprometida uma vez que é realizada diariamente uma única medição de nível d'água, não sendo possível determinar com precisão o hidrograma do evento.

Tabela 5.4 – Características dos eventos monitorados e cargas de sedimentos em suspensão na Bacia de Pai João, no ano de 2007

Data do Evento	Precipitação (mm.dia ⁻¹)	Descarga Líquida Q _{LI} (L.s ⁻¹)	Concentração de Sedimentos em suspensão (mg.L ⁻¹)	Descarga Sólida em Suspensão Q _{SS} (Kg.s ⁻¹)	Produção de Sedimentos em Suspensão (Kg.dia ⁻¹)
18/4/2007	70	775	54	0,042	3.617
19/4/2007	25	46	39	0,002	154
25/4/2007	60	648	50	0,032	2.800
27/4/2007	35	132	18	0,002	205
30/4/2007	20	503	27	0,014	1.182
02/5/2007	45	445	18	0,008	683

5.2.3. Estimativa da Taxa de Transporte de Fundo

A taxa de transporte de fundo foi estimada através de modelagem matemática, uma vez que não foi possível realizar esta medição diretamente em campo. Foi utilizado o modelo EB para a estimativa (ver item 4.2.4), que utiliza as equações desenvolvidas por Einstein (1942) e Brown (1943). Os resultados das simulações do modelo para os seis eventos monitorados em 2007 são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Carga de Sedimentos dos eventos monitorados em 2007 na Bacia de Pai João. Avaliação das descargas sólidas em suspensão e de leito através de medida e modelagem.

Data do Evento	Carga suspensão (medida)		Carga leito (modelada)		Suspensão + leito	
	Descarga Sólida em Suspensão, Q _{SS} (Kg.s ⁻¹)	Percentual em relação ao total	Descarga Sólida de Fundo, Q _{SF} (kg.s ⁻¹)	Percentual em relação ao total	Descarga Sólida Total, Q _{SOL} (Kg.s ⁻¹)	Produção de Sedimentos (ton.dia ⁻¹)
18/4/2007	0,042	11%	0,337	89%	0,379	33
19/4/2007	0,002	1%	0,251	99%	0,253	22
25/4/2007	0,032	9%	0,333	91%	0,365	32
27/4/2007	0,002	1%	0,180	99%	0,182	16
30/4/2007	0,014	4%	0,327	96%	0,341	29
2/5/2007	0,008	2%	0,324	98%	0,332	29
Total		5%		95%		161

A Tabela 5.5 apresenta, para os seis eventos monitorados em 2007, os valores de descarga sólida de leito obtidos através de modelagem, além dos valores de descarga sólida em suspensão observados. A comparação entre as duas parcelas de descarga sólida na Bacia de

Pai João mostrou que a descarga sólida de leito corresponde a 95% da descarga sólida total, enquanto que a descarga sólida em suspensão corresponde a apenas 5% do total. A fração de descarga de leito deve estar superestimada, conforme discutido abaixo. Os eventos dos dias 18/4/2007, 25/4/2007, 30/4/2007 foram os que apresentaram os maiores percentuais de descarga sólida em suspensão em relação à descarga total, 11%, 9% e 4% respectivamente, o que pode estar associado ao poder de fluxo das maiores vazões ocasionando a ressuspensão de sedimentos com maiores percentuais de descargas sólidas em suspensão em relação à descarga sólida total. A Figura 5.13 mostra uma correlação entre as descargas líquidas dos eventos analisados e o percentual de descarga sólida em suspensão em relação à descarga sólida total.

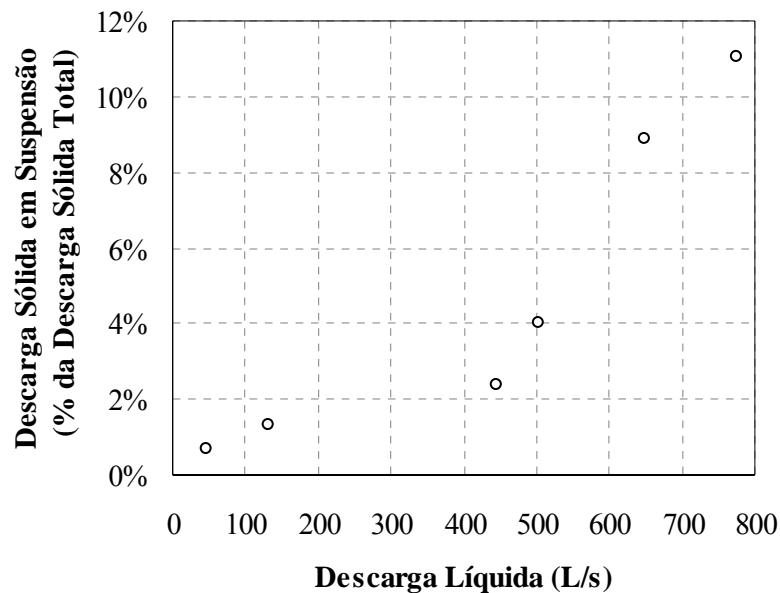


Figura 5.13 – Relação entre a descarga líquida e o percentual da descarga sólida em suspensão em relação à descarga sólida total

Na tentativa de interpretar estes resultados as seguintes hipóteses são levantadas:

Os altos valores de descarga de leito podem ter, em parte, explicação através da análise da composição granulométrica do material de leito, que possui a seguinte distribuição de acordo com a escala da USDA: 21% de pedregulho, 59% de areia grossa, 15% de areia média e 5% de areia fina. Segundo Santos *et al.* (2001), em rios com sedimentos compostos

predominantemente de areia e cascalho a carga de leito atinge valores elevados, podendo ultrapassar 50% do total transportado.

Entretanto, a determinação da descarga de leito através de modelagem pode estar conduzindo a uma super-estimativa desses valores. As equações utilizadas podem não conseguir explicar de que forma se dá o processo na área. Dessa forma, para uma análise mais consistente da contribuição do transporte de fundo para a produção de sedimentos na bacia seria necessário também a estimativa desta parcela através de medição e monitoramento de maneira a realizar uma avaliação da estimativa realizada pelo modelo.

Mateos e Giráldez (2005), em estudo sobre medição de sedimentos transportados em suspensão e pelo leito em canais de irrigação por sulcos, concluíram que enquanto as equações de Einstein, de Bagnold e de Chang estimam para carga de leito uma fração da carga total maior que 30%, enquanto que os dados medidos mostram frações de carga de leito em torno de 5% da carga total.

Não devem ainda, serem descartadas as incertezas associadas ao processo de estimativa de cargas de sedimentos em uma bacia, como na estimativa dos parâmetros utilizados na modelagem, além das incertezas da medição, com a possibilidade de erros durante coletas e análises de laboratório.

5.2.4. Avaliação da Produção de Sedimentos

Foi contabilizado na Bacia de Pai João, no ano de 2007 um aporte total de sedimentos no exutório igual a 1.268 ton, o que corresponde a uma produção de sedimentos de 136 ton.km⁻².ano⁻¹. Desse total, apenas 23 ton correspondem a material transportado em suspensão, resultando em uma produção de sedimentos em suspensão de 2 ton.km⁻².ano⁻¹, estimativa esta realizada através de medições em alguns eventos e para os dias em que não houve medição de descargas sólidas utilizou-se a equação da curva-chave de sedimentos desta área (equação 5.2), tendo por base as vazões afluentes diárias (ver item 5.2.1). A carga de leito por sua vez, foi estimada em 1.245 ton, através da aplicação do modelo EB (item 4.2.4) tendo por base parâmetros físicos do sedimento determinados a partir de amostras do material de leito coletadas na área, em características hidráulicas e geométricas do canal.

Através da análise dos valores obtidos para carga de leito e em suspensão, observa-se que 98% do aporte total de sedimentos no exutório da bacia de Pai João correspondem a material transportado pelo leito. Entretanto, estes valores podem estar superestimados, uma vez que não foi realizada medição direta desta parcela, apesar de a modelagem ser baseada em parâmetros monitorados.

Levando-se em consideração as interferências existentes nesta área (microbarramentos de contenção de sedimentos e a presença de pequenos reservatórios de água que retém parte do sedimento que seria transportado até o exutório, caso não houvesse essas interferências na área). Realizou-se um balanço de sedimentos na bacia a fim de estimar a produção de sedimentos da área, caso não houvesse essas interferências, a fim de avaliar a eficiência das barragens de contenção de sedimentos.

A acumulação total de sedimentos nas três barragens existentes na bacia, estimada com base no método empírico de Brune (1953) *apud* Haan *et al.* (1994), no ano de 2007 foi de 205 ton.ano⁻¹, com valores correspondentes a cada barragem de 122 ton.ano⁻¹, 60 ton.ano⁻¹, 23 ton.ano⁻¹ e respectivas capacidades de acumulação de água estimadas em 40.900 m³, 15.400 m³ e 11.400 m³.

Com relação à acumulação nos microbarramentos de contenção de sedimentos, a estimativa média anual em um microbarramento foi de 1,35 ton.ano⁻¹, tendo por base as medições realizadas no experimento com três microbarramentos sucessivos na bacia de Pai João, com acumulações correspondentes a 2,16 ton.ano⁻¹, 1,57 ton.ano⁻¹, e 0,32 ton.ano⁻¹. Dessa forma, a estimativa média total de acumulação pelos microbarramentos na bacia de Pai João foi de 50 ton.ano⁻¹, levando-se em consideração a existência de 37 microbarramentos na área ainda com capacidade de acumulação no ano de 2007. Este número foi levantado em um cadastramento dos microbarramentos realizado no período anterior às chuvas de 2007.

A Tabela 5.6 apresenta o balanço de sedimentos para a área no ano de 2007 com os valores de acumulação de sedimentos nos microbarramentos, nas barragens de acumulação de água e o aporte de sedimentos no exutório da bacia (produção efetiva de sedimentos) e seus respectivos percentuais em relação à produção de sedimentos da área caso não houvesse a interferência das barragens de contenção de sedimentos e as barragens de acumulação de água.

Tabela 5.6 – Balanço de sedimentos na Bacia de Pai João no ano de 2007

	Massa de sedimentos (ton/ano)	Massa de sedimentos (%)
Total retido nos 37 microbarramentos	50	4
Total retido nas três barragens de água	205	13
Aporte de sedimentos no exutório (produção efetiva de sedimentos)	1.268	83
Produção de sedimentos sem interferências de barragens na área	1.523	100
Produção de sedimentos (ton.km ⁻² .ano ⁻¹)	136	
Produção de sedimentos sem interferências de barragens na área (ton.km ⁻² .ano ⁻¹)	163	

Com base nos resultados apresentados, caso não houvesse obras de retenção (barragens e microbarramentos) na área a produção de sedimentos da bacia de Pai João no ano de 2007 seria de 163 ton.km⁻².ano⁻¹, ou seja, uma estimativa total de 1.523 ton.ano⁻¹. Desse total, 83% correspondem ao aporte de sedimentos no exutório (produção de sedimentos real na bacia), 13% à retenção pelos reservatórios de água e apenas 4% de acumulação pelos microbarramentos de contenção de sedimentos, verificando-se a baixa eficiência de retenção desses sistemas na área no ano de 2007 em comparação ao percentual que chega ao exutório, o que reflete o impacto de elevadas ações antrópicas na área, o intenso uso do solo com práticas inadequadas de manejo, como as queimadas que são muito frequentes na área e plantios em altas declividades.

5.2.5. Modelagem da Produção de Sedimentos com HIDROSED2

A aplicação do modelo HIDROSED2 para a Bacia de Pai João resumiu-se à calibração do parâmetro de transporte K_v para a área e estimativa de produção de sedimentos dos seis eventos monitorados em 2007. A estimativa anual de produção de sedimentos a partir do modelo não foi possível devido às características de escoamento da área com a presença de fluxo de base, uma vez que o modelo realiza simulação a passo de evento e sua entrada necessita do parâmetro de erosividade da chuva, não sendo possível estimar o transporte de sedimentos nos dias com fluxo de base apenas.

A Figura 5.14 apresenta a curva S de sedimentos para os eventos utilizados na calibração do modelo, com a produção de sedimentos acumulada. O valor do parâmetro de transporte K_v obtido para a bacia foi igual a 0,19, que tem fator de cobertura vegetal C igual a 0,019. Correlacionando-se estes valores, observa-se que o parâmetro de transporte calculado encontra-se fora da tendência das bacias de clima tropical semi-árido e das bacias de clima temperado obtida por Araújo (2007). Uma possível explicação seria que a bacia encontra-se em clima sub-úmido. O SDR médio da bacia para estes eventos foi igual a 2,4%, já o SDR avaliado em cada evento, variou entre 0,04% e 10,82%.

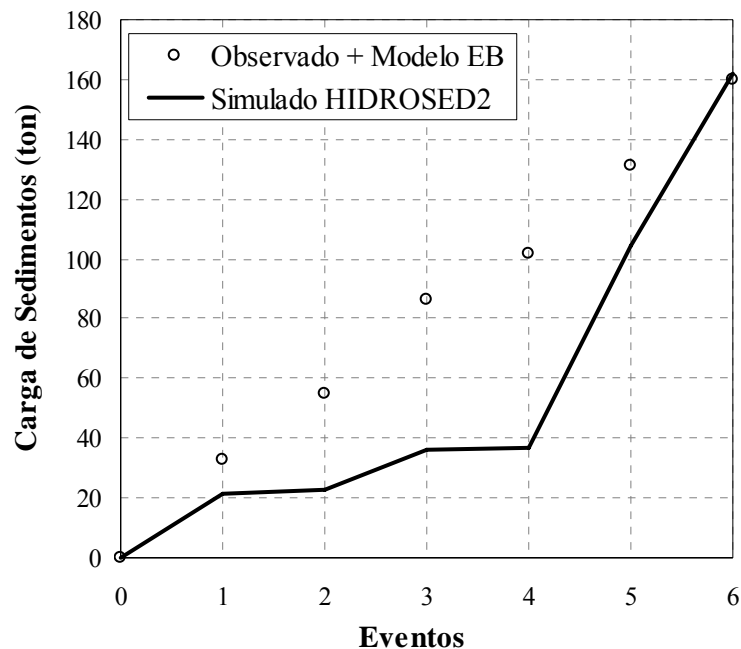


Figura 5.14 – Curva S de sedimentos para os eventos de 2007: monitorados na Bacia de Pai João e modelados por HIDROSED2 (parâmetro K_v calibrado para o período)

O resultado individual por eventos é apresentado na Tabela 5.7. Tendo como referência os valores observados de descarga em suspensão somados à parcela de transporte de leito obtida pelo modelo EB, a diferença de valores obtidos na simulação com o HIDROSED2 variou de 130% a -94%.

Verifica-se que o resultado individual de eventos simulados não foi satisfatório, isto pode ter ocorrido devido a vários fatores, como: o modelo não consegue explicar as interferências que ocorrem nesta área como a presença de barragens de água e microbarramentos que modificam

a dinâmica de sedimentos na área; incertezas na estimativa de parâmetros do modelo, uma vez que a erosividade da chuva teve por base dados da PCD de Aracoiaba (Município Vizinho), inferindo erros devido à variabilidade espacial da chuva; incertezas na estimativa da lâmina escoada uma vez que esta foi estimada com base apenas em uma única medida diária no exutório, não havendo uma separação clara entre fluxo de base e escoamento superficial devido ao evento, além de incertezas nos valores de referência de produção de sedimentos utilizados na calibração, obtidos a partir de modelagem do transporte de leito somado à medições realizadas na área, como incertezas nas medidas dos eventos, devido ao escoamento de base da área. É importante também considerar que Araújo (2007) verificou que o modelo HIDROSED2 somente se ajusta bem aos eventos de grande intensidade, apresentando elevada dispersão não-tendencial para os eventos pouco erosivos, como os observados na Bacia Pai João em 2007.

Tabela 5.7 – Comparação entre os dois métodos de estimativa de Carga de Sedimentos.

Evento	Carga de Sedimentos (ton)		Diferença relativa (%)
	Observada + Modelo EB	Simulação com HIDROSED2	
18/4/2007	33	21	-35
19/4/2007	22	2	-93
25/4/2007	32	14	-57
27/4/2007	16	1	-94
30/4/2007	29	68	130
2/5/2007	29	58	102
Total	161	163	1

5.3. Bacia de Santo Antônio

5.3.1. Estimativa de Vazões Afluentes

A Figura 5.15 apresenta a curva-chave de vazões para a seção controlada na Bacia de Santo Antônio, no ano de 2007. Foram realizadas ao total sete medições de vazão, utilizando micro-molinete, que apresentaram variação de 17 L.s^{-1} a 115 L.s^{-1} . Entretanto, através da extrapolação da curva-chave de vazões aplicando a equação de Manning foi possível determinar vazões nos eventos extremos a partir de correlação com a profundidade do nível d'água que variou de 0,07 m nos dias em que não ocorreu eventos chuva-deflúvio, com fluxo de base apenas, a 1,00 m nos maiores eventos, ou seja, com estimativa de vazões chegando a 18.500 L.s^{-1} . O coeficiente de rugosidade de Manning determinado foi igual a 0,044. A Figura 5.16 mostra comparação fotográfica, que indica compatibilidade entre o rio da BSA e outro, apresentado por Chow (1959), cujo coeficiente de Manning é de 0,045.

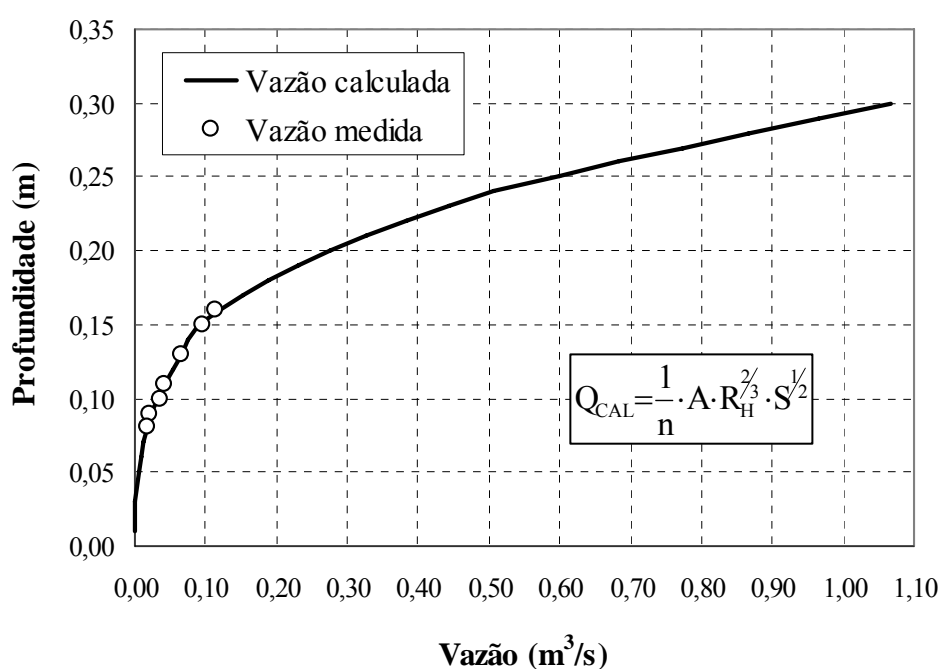


Figura 5.15 – Curva-chave de vazões da seção de controle da bacia de Santo Antônio, no ano de 2007



(A) Riacho principal da Bacia de Santo Antônio. Coeficiente de Rugosidade de Manning $n = 0,044$.



(B) Canal com lateral e fundo irregulares, margens cobertas com pequenos arbustos. Coeficiente de Rugosidade de Manning $n = 0,045$ (Fonte: Chow,1959).

Figura 5.16 – Fotos do riacho principal da Bacia de Santo Antônio e de rio com semelhante coeficiente de Manning, conforme apresentado por Chow (1959)

A Figura 5.17 apresenta os hidrogramas diários e respectivos hietogramas monitorados na Bacia de Santo Antônio no ano de 2007. Observa-se que o escoamento do rio principal é perene, ou seja, há escoamento de base durante todo o ano, em média 17 L.s^{-1} , enquanto que a média anual da vazão total foi estimada em 188 L.s^{-1} . A lâmina total escoada em 2007 foi estimada em 595 mm, o que corresponde a um coeficiente de escoamento fluvial de 61%. Considerando apenas as vazões medidas nos dias de eventos de chuva e um escoamento de base médio de 17 L.s^{-1} , a lâmina total escoada na bacia foi estimada em 540 mm, o que corresponde a um coeficiente de escoamento superficial de 55% em 2007. Este alto valor possivelmente se deve ao fato de que, no ano em análise, houve dois eventos extremos (vazões de até $2,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) com elevado coeficiente de escoamento superficial.

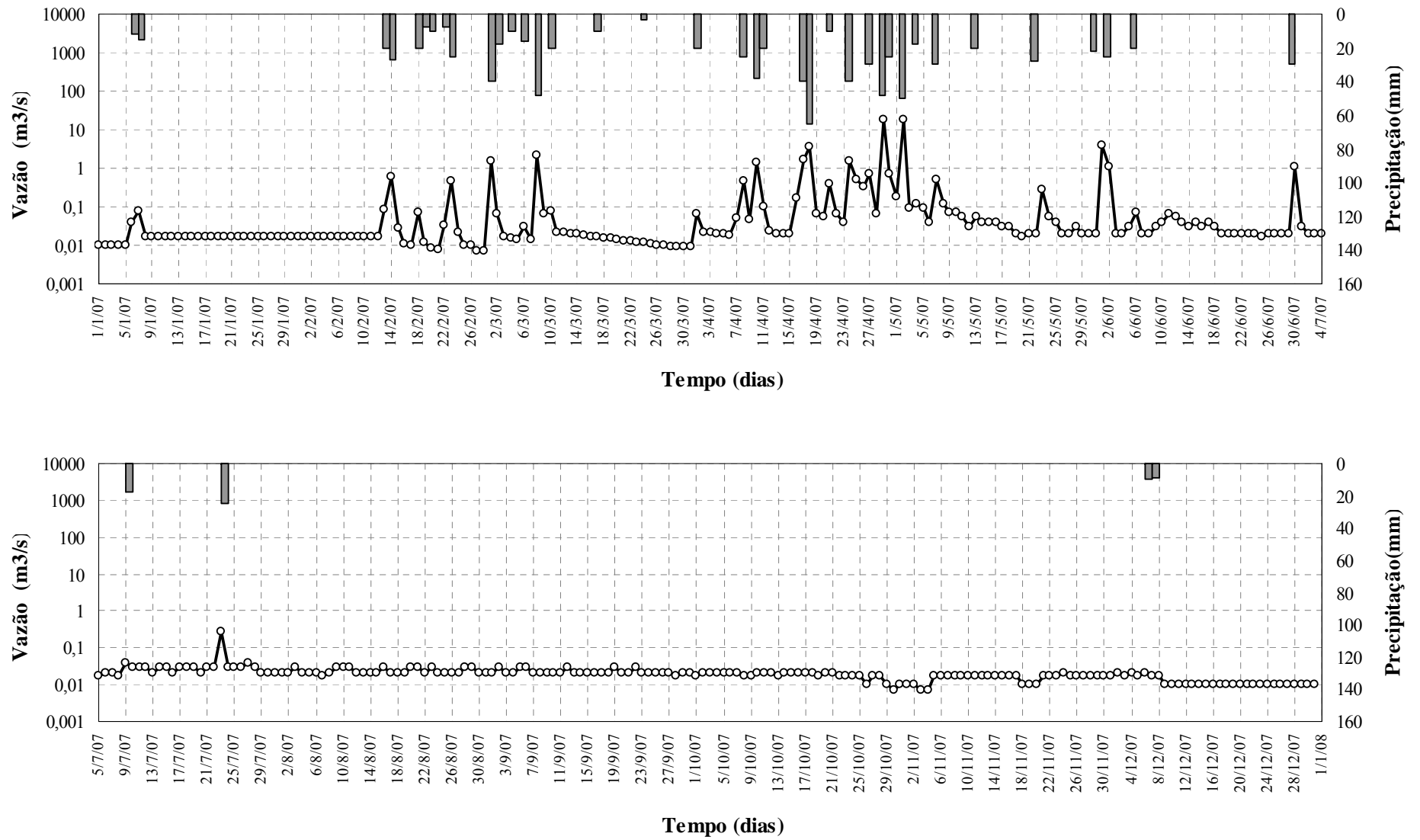


Figura 5.17 – Hietograma e hidrograma diários da Bacia de Santo Antônio (período de 01/01/07 a 31/12/07)

5.3.2. Estimativa da Descarga Sólida em Suspensão

Na Bacia de Santo Antônio foram determinadas duas curvas-chave de sedimentos em suspensão (Figura 5.18) a partir de eventos monitorados no ano de 2007. Estas foram obtidas através de regressão com equações na forma de potência. A equação (5.3) foi obtida para vazões afluentes na faixa de 17 L.s^{-1} a 189 L.s^{-1} , apresentando coeficiente de determinação R^2 igual a 0,64, aplicável para a estimativa de produção de sedimentos dos pequenos eventos e dos dias com escoamento de base apenas. A equação (5.4) foi obtida para vazões afluentes na faixa de 189 L.s^{-1} a aproximadamente 18.500 L.s^{-1} , aplicável à estimativa de produção de sedimentos de eventos extremos, apresentando coeficiente de determinação R^2 igual a 0,82. As medições de concentração de sedimentos apresentaram valores na faixa de 10 mg.L^{-1} a 700 mg.L^{-1} , incluindo os dias com apenas escoamento de base.

$$Q_{SS} = 5E^{-06} \cdot Q_{LI}^{1,5331}, \text{ para } 17 \text{ L.s}^{-1} \leq Q_{SS} \leq 189 \text{ L.s}^{-1} \quad (5.3)$$

$$Q_{SS} = 0,0002 \cdot Q_{LI}^{0,914}, \text{ para } 189 \text{ L.s}^{-1} < Q_{SS} \leq 18.500 \text{ L.s}^{-1} \quad (5.4)$$

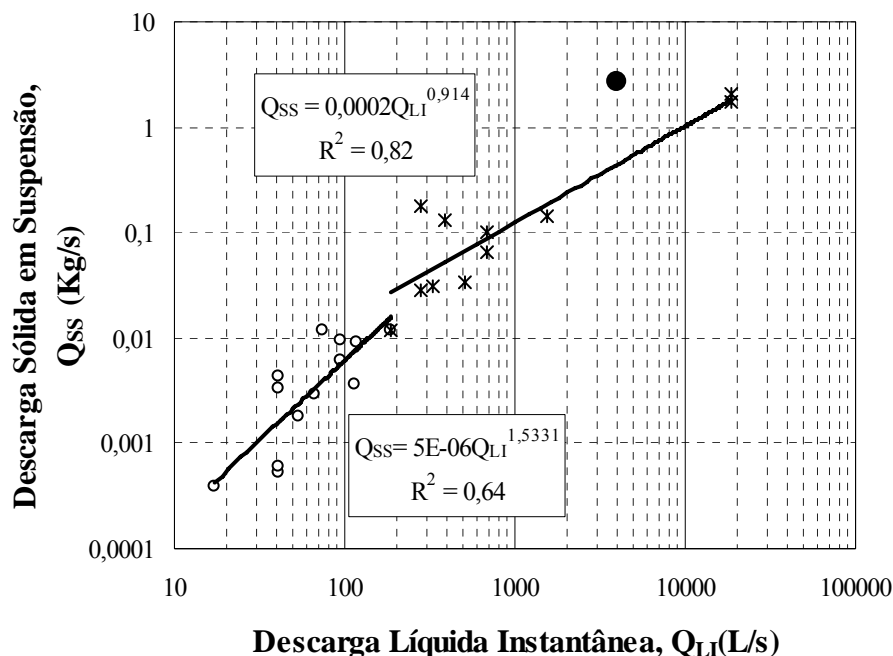


Figura 5.18 – Curva-chave de sedimentos em suspensão da Bacia de Santo Antônio para dados do ano de 2007. O ponto em destaque (bola preta) representa dado excluído por ter apresentado concentração com ordem de grandeza superior às demais, obtidas em condições semelhantes

- *Eventos Monitorados*

Foram monitorados, na Bacia de Santo Antônio no ano de 2007, quinze eventos chuva-deflúvio. A Tabela 5.8 apresenta dados desses eventos, como precipitação (mm), vazão ($L.s^{-1}$), concentração de sedimentos ($mg.L^{-1}$) e descarga de sedimentos em suspensão ($Kg.dia^{-1}$). Nesta bacia, também não foi possível determinar o hidrograma dos eventos com precisão, uma vez que o sistema de monitoramento adotado foi baseado apenas em uma medição diária de nível d'água, podendo este valor não ser representativo da média do evento. Além disso, considerou-se uma única amostragem de material sólido em suspensão, para determinação de sua concentração, admitida representativa do evento, não sendo possível assim, a determinação de sedigrama.

Tabela 5.8 – Características dos eventos monitorados e cargas de sedimentos em suspensão na Bacia de Santo Antônio, no ano de 2007.

Data do Evento	Precipitação (mm)	Descarga Líquida Q_{LI} ($L.s^{-1}$)	Concentração de Sedimentos em suspensão ($mg.L^{-1}$)	Descarga Sólida em Suspensão Q_{SS} ($Kg.s^{-1}$)	Descarga de Sedimentos em Suspensão ($Kg.dia^{-1}$)
19/4/2007	60	67	44	0,003	255
21/4/2007	10	384	337	0,129	11.178
24/4/2007	40	1.522	96	0,146	12.624
27/4/2007	30	684	147	0,101	8.685
29/4/2007	48	18.517	109	2,013	173.940
30/4/2007	25	684	92	0,063	5.437
2/5/2007	50	18.517	92	1,700	146.848
4/5/2007	18	119	75	0,009	769
7/5/2007	30	507	68	0,034	2.979
13/5/2007	20	54	34	0,002	158
23/5/2007	28	277	652	0,181	15.599
31/5/2007	22	4.023	669	2,692	232.559
6/6/2007	20	74	157	0,012	1.002
10/7/2007	18	41	13	0,001	46
23/7/2007	25	277	103	0,029	2.464

5.3.3. Estimativa da Taxa de Transporte de Fundo

Na bacia de Santo Antônio, a taxa de transporte de fundo foi estimada através de modelagem matemática (Modelo EB), uma vez que não foi realizado seu monitoramento. Os resultados das simulações do modelo para os quinze eventos de 2007 analisados são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Cargas de Sedimentos dos eventos monitorados em 2007, na Bacia de Santo Antônio. Avaliação das descargas sólidas em suspensão e de leito através de medida e modelagem.

Data do Evento	Carga suspensão (medida)		Carga leito (modelada)		Suspensão + leito	
	Descarga Sólida em Suspensão, Q_{SS} (Kg.s ⁻¹)	Percentual em relação ao total	Descarga Sólida de Fundo, Q_{SF} (kg.s ⁻¹)	Percentual em relação A_0 total	Descarga Sólida Total, Q_{SOL} (Kg.s ⁻¹)	Descarga de Sedimentos (ton.dia ⁻¹)
19/4/2007	0,003	0,5%	0,593	99,5%	0,596	51
21/4/2007	0,129	44,4%	0,162	55,6%	0,291	25
24/4/2007	0,146	11,6%	1,112	88,4%	1,258	109
27/4/2007	0,101	27,9%	0,260	72,1%	0,361	31
29/4/2007	2,013	7,1%	10,494	83,9%	12,507	1.081
30/4/2007	0,063	19,5%	0,260	80,5%	0,323	28
02/5/2007	1,700	6,0%	10,494	86,1%	12,194	1.054
04/5/2007	0,009	3,4%	0,250	96,6%	0,259	22
07/5/2007	0,034	15,0%	0,196	85,0%	0,230	20
13/5/2007	0,002	0,4%	0,465	99,6%	0,467	40
23/5/2007	0,181	57,0%	0,136	43,0%	0,317	27
31/5/2007	2,692	38,9%	4,227	61,1%	6,919	598
06/6/2007	0,012	5,0%	0,220	95,0%	0,232	20
10/7/2007	0,001	0,1%	0,356	99,9%	0,357	31
23/7/2007	0,029	17,3%	0,136	82,7%	0,165	14
Total		20,0%		80,0%		3.151

A Tabela 5.9 apresenta, para os quinze eventos monitorados em 2006, os valores de descarga sólida de leito obtidos através de modelagem, além dos valores de descarga sólida em suspensão observados. A comparação entre as duas parcelas de descarga sólida na Bacia de Santo Antônio mostrou que a descarga sólida de leito corresponde a 80% da descarga sólida total, enquanto que a descarga sólida em suspensão corresponde a 20% do total dos eventos. Entretanto, o percentual de descarga sólida em suspensão nos eventos, variou de 57% a 0,1%.

O material de leito analisado possui a seguinte distribuição granulométrica, de acordo com a escala da USDA: 87% de pedregulho e 13% de areia. Os estudos de Rovira *et al.* (2005) em uma bacia na Espanha com material de leito com características semelhantes à Bacia de Santo Antônio (63% de pedregulho e 37% de areia) apresentaram resultados de carga de leito avaliados através de medições em campo em duas seções monitoradas em um trecho do rio, correspondendo a 80% e 83% da carga total (leito + suspensão). Embora aparentemente superestimada pelo modelo EB, a carga de sedimentos transportada pelo leito na BSA foi razoavelmente representada, se se tomar em conta o resultado de Rovira *et al.* (2005). Isso poderia ser explicado pelo fato de ocorrer, nesse rio, mais dias somente com escoamento de base que com escoamento composto. Assim, nesse período, o rio tende a transportar unicamente pelo leito, cuja granulometria é grosseira. Isso pôde ser observado pelo aspecto transparente da água em tais períodos.

5.3.4. Avaliação da Produção de Sedimentos

Na Bacia de Santo Antônio no ano de 2007 foi contabilizada uma descarga de sedimentos total de 4.597 ton, tendo por base as cargas de sedimento dos 365 dias de escoamento do rio principal da bacia, o que corresponde a uma produção de sedimentos de $686 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$. Entretanto, os dois eventos extremos que ocorreram nos dias 29/04/07 (1.081 ton) e 02/05/07 (1.054 ton) foram responsáveis por 46 % da produção de sedimentos total do ano de 2007.

A carga de sedimentos em cada dia de escoamento foi contabilizada somando-se as descargas em suspensão e as descargas de leito. Os valores de descarga em suspensão foram estimados aplicando-se as equações de curva-chave de sedimentos desta bacia (equações 5.3 e 5.4), a partir dos valores diários de vazão (Figura 5.17), estimados por sua vez através da curva de descargas (Figura 5.15), obtida para esta área. Foi contabilizado nesta bacia um total anual de sedimentos transportados em suspensão igual a 536 ton, o que corresponde a uma produção de sedimentos de $80 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$. Em relação ao total anual esta parcela do transporte representa 12 %.

Os valores de descarga de leito foram obtidos através de simulações com o modelo EB, a partir de parâmetros hidráulicos e geométricos do canal estimados com base no nível d'água

medido diariamente em uma seção controlada e em levantamentos em campo, além de características do material de leito. Foi contabilizado um transporte total de sedimentos através do leito na bacia de 4.061 ton, que corresponde a uma produção de sedimentos de 606 ton.km⁻².ano⁻¹, e representa 88 % da produção de sedimentos total em 2007 na Bacia de Santo Antônio.

5.3.5. Modelagem da Produção de Sedimentos com HIDROSED2

De forma similar a Bacia de Pai João, na Bacia de Santo Antônio, a aplicação do modelo HIDROSED2 limitou-se à calibração do parâmetro de transporte K_v para a área, uma vez que foi realizado apenas um ano de monitoramento, não sendo possível sua validação. Nesta área também a estimativa anual de produção de sedimentos a partir do modelo não foi possível devido às características de escoamento da área com a presença de fluxo de base durante todo o ano, não sendo possível contabilizar o transporte de sedimentos nos dias com fluxo de base apenas, além de o modelo caracterizar-se por simulação apenas de eventos.

A Figura 5.19 apresenta a curva S de sedimentos para os quinze eventos utilizados na calibração do modelo, com a produção de sedimentos acumulada. O valor do parâmetro de transporte K_v obtido para a bacia foi igual a 0,14, que tem fator de cobertura vegetal C igual a 0,022. Correlacionando-se estes valores, observa-se que o parâmetro de transporte calculado encontra-se fora da tendência das bacias de clima tropical obtida por Araújo (2007). O SDR médio da bacia para estes eventos foi igual a 11,20 %, entretanto o SDR avaliado por evento apresentou variação de 0,03 % a 72,00 %.

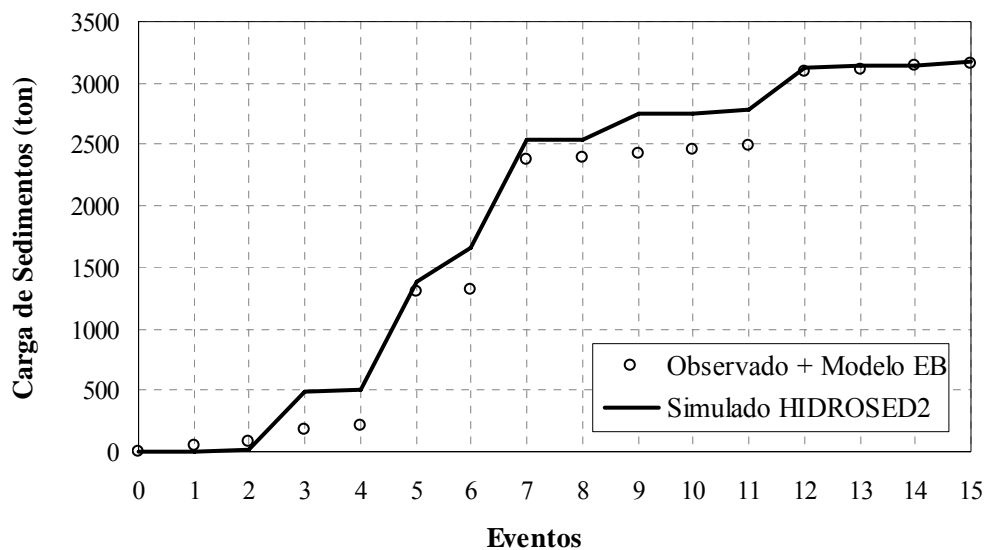


Figura 5.19 – Curva S de sedimentos para os eventos de 2007 monitorados na Bacia de Santo Antônio, calibração do Modelo HIDROSED2

A Tabela 5.10 apresenta o resultado individual de eventos simulados com o HIDROSED2 na calibração do parâmetro K_v e sua comparação com o outro método utilizado na estimativa de produção de sedimentos da Bacia de Santo Antônio (monitoramento de descargas em suspensão somadas as respectivas descargas de leito simuladas com o modelo EB). A diferença entre os métodos na avaliação individual dos eventos variou de -98% a 925%, verificando-se que este resultado não foi satisfatório, entretanto, na estimativa de eventos intensos, que foram responsáveis por 46% da produção de sedimentos total em 2007, o modelo apresentou resultados satisfatórios.

Ainda, muitas incertezas estão associadas à estimativa dos parâmetros, como dados de erosividade estimados com base na duração da chuva medida em uma PCD distante 28 km da bacia, lâmina escoada estimada com base apenas em uma única medida diária de nível d'água e duração do escoamento estimada da duração da precipitação, uma vez que a análise realizada na Bacia Experimental de Aiuaba mostrou que o modelo é bastante sensível a esses dois parâmetros. Além de incertezas associadas aos valores de referência utilizados na calibração do modelo.

Tabela 5.10 – Comparação entre os dois métodos de estimativa de Carga de Sedimentos para os eventos avaliados na Baía de Santo Antônio.

Evento	Carga de Sedimentos (ton)		Diferença relativa (%)
	Observada + Modelo EB	Simulação com HIDROSED2	
19/4/2007	51	1	-98
21/4/2007	25	18	-28
24/4/2007	109	465	327
27/4/2007	31	17	-45
29/4/2007	1.081	879	-19
30/4/2007	28	274	879
2/5/2007	1.054	893	-15
4/5/2007	22	1	-95
7/5/2007	20	205	925
13/5/2007	40	1	-98
23/5/2007	27	31	15
31/5/2007	598	351	-41
6/6/2007	20	1	-95
10/7/2007	31	9	-71
23/7/2007	14	28	100
Total	3.151	3.174	1

5.4. Comparação Entre os Diferentes Contextos Geoambientais

5.4.1. Descarga Sólida em Suspensão

A Figura 5.20 apresenta uma relação entre as concentrações de sólidos totais, que corresponde à soma das cargas em suspensão e das cargas dissolvidas, determinadas pelo método da evaporação, e as concentrações de sólidos suspensos totais, que correspondem somente às cargas em suspensão, obtidas por método de filtragem. São apresentados os resultados individuais das 45 amostras coletadas nas três bacias no ano de 2007 em que foi possível medir ambas as concentrações.

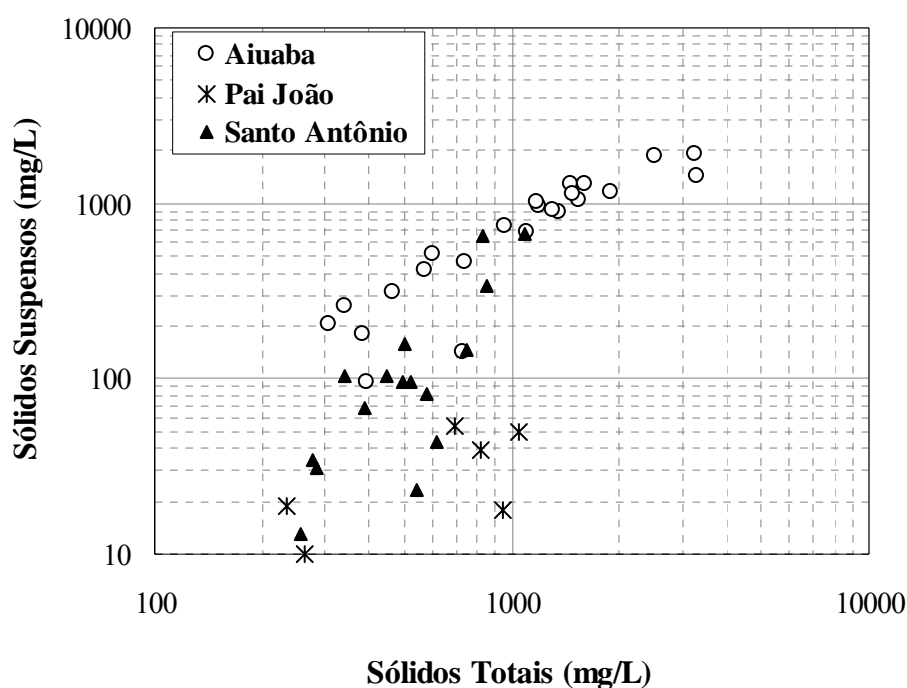


Figura 5.20 – Relação entre concentração de sólidos totais e sólidos suspensos presentes nas amostras de escoamento superficial coletadas nas Bacias de Aiuaba, Pai João e Santo Antônio

Observa-se que a relação entre estas concentrações varia em cada amostra do escoamento, mas que existe uma relação diferente entre as concentrações para cada bacia. Além disso, observa-se maior dispersão nos dados das bacias de Pai João e Santo Antônio, onde há a presença de escoamento de base, além de interferências antrópicas.

Na comparação entre as três áreas, os maiores valores de cargas em suspensão foram encontradas nas amostras da Bacia Experimental de Aiuaba, o que pode ter correlação com o tipo de solo das áreas. Nos solos da BEA há a predominância de silte e areia fina, partículas que podem ser transportadas mais facilmente em suspensão, enquanto que nas bacias de Pai João e Santo Antônio há a predominância de solos arenosos, de maior granulação e que o fluxo não teria poder para transportá-los em suspensão. Por outro lado, na comparação entre as bacias de Pai João e Santo Antônio observa-se também que os maiores valores de carga em suspensão foram encontradas na Bacia de Santo Antônio, o que pode ter explicação no tipo de escoamento, pois nesta bacia o escoamento é bastante turbulento tendo maior poder de ressuspensão de sedimentos.

Com base na análise das concentrações medidas nas amostras de eventos, coletadas na Bacia Experimental de Aiuaba, verificou-se que as cargas em suspensão correspondem em média a 66% das cargas em suspensão mais cargas dissolvidas (sólidos totais), ou seja, as cargas de sólidos dissolvidos presentes no escoamento desta bacia estão presentes em menor quantidade, 34% do total. As concentrações de sólidos em suspensão, ou seja, que foram utilizadas na confecção da curva-chave de sedimentos e computadas na estimativa da produção de sedimentos, apresentaram variação de 100 mg.L^{-1} a 2.000 mg.L^{-1} nos eventos medidos, já as concentrações de sólidos totais apresentaram variação de 300 mg.L^{-1} a 3.300 mg.L^{-1} .

Para a Bacia de Pai João a carga em suspensão corresponde a apenas 5% do total (carga em suspensão mais carga dissolvida), ou seja, os sólidos dissolvidos presentes nas amostras do escoamento superficial nesta área, correspondem a 95% do total. Os sólidos suspensos totais apresentaram variação de 10 mg.L^{-1} a 50 mg.L^{-1} , já as concentrações de sólidos totais apresentaram variação de 200 mg.L^{-1} a 1.000 mg.L^{-1} .

Na Bacia de Santo Antônio o percentual de carga em suspensão chega a 25% da carga total, porém este valor é bastante inferior ao valor apresentado na Bacia Experimental de Aiuaba. As concentrações de sólidos suspensos totais variaram de 10 mg.L^{-1} a 700 mg.L^{-1} , enquanto que as concentrações de sólidos totais mostraram valores na faixa de 200 mg.L^{-1} a 1.100 mg.L^{-1} .

Esses percentuais médios de cargas dissolvidas obtidos para as bacias, podem ser utilizados em futuras avaliações da produção de sedimentos nas bacias, simplificando o processo de análises de laboratório, diminuindo assim os custos. Segundo Carvalho (1994), para estimativas de produção de sedimentos, podem ser realizadas em laboratório análises de concentração de sedimentos somente por meio de evaporação por ser este um ensaio mais rápido, de fácil manipulação e menos oneroso em comparação ao método da filtração, entretanto é necessário realizar uma correção das concentrações obtidas naquele processo em função das cargas dissolvidas presentes nas amostras.

Com relação a esses resultados, ainda, as seguintes hipóteses são levantadas:

Nas bacias de Pai João e Santo Antônio, devido ao escoamento de base que existe nessas áreas, as amostras coletadas podem não ser tão representativas dos eventos chuva-deflúvio como na Bacia Experimental de Aiuaba, onde o escoamento é predominantemente efêmero, o que pode consistir em uma fonte de erro e incerteza, quando da utilização desses dados para a calibração e validação de modelos de previsão de produção de sedimentos orientados a eventos.

Nas bacias de Pai João e Santo Antônio ocorre a influência do escoamento de base nas amostras com maior presença de sólidos dissolvidos. Estes são provavelmente provenientes da dissolução de rochas ou mesmo resultante da ação antrópica nessas áreas através do lançamento de resíduos nos rios. Os percentuais de cargas dissolvidas encontrados na Bacia Experimental de Aiuaba, 34% em comparação com as bacias de Pai João e Santo Antônio, que apresentaram valores respectivamente iguais a 95% e 75% do total podem ser um indicativo do tipo de escoamento da área, como também podem indicar o efeito de diferentes níveis de ação antrópica. Tais efeitos podem ser resultantes de processos como lançamento de esgotos na rede de drenagem (identificado na Bacia de Santo Antônio) ou pela aplicação de pesticidas nas atividades agrícolas, que seriam transportados com o sedimento. Entretanto, seriam necessárias análises químicas das amostras do escoamento, a fim de se determinar a origem dessas cargas dissolvidas.

5.4.2. Descarga Sólida de Fundo

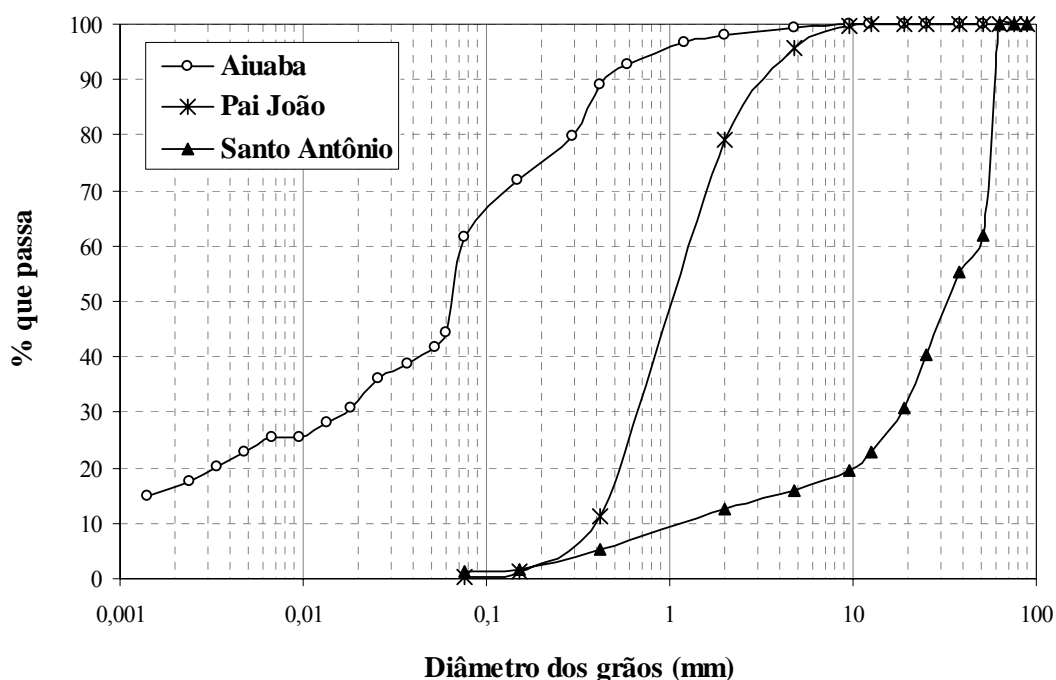
Este item apresenta uma comparação entre a estimativa da taxa de transporte de fundo realizada através de simulações com o modelo EB nas três bacias.

Na Bacia Experimental de Aiuaba a taxa de transporte pelo leito foi avaliada para cinco eventos monitorados em 2007, em que os parâmetros do modelo foram levantados em uma seção controlada do riacho principal da BEA, em localização próxima a calha Parshall. As simulações com o modelo EB para estes eventos, mostram que os resultados de carga de leito correspondem a 27% da carga total medida com base em amostras coletadas na calha.

Na Bacia de Pai João a taxa de transporte pelo leito foi avaliada para seis eventos em que foram monitoradas as descargas sólidas em suspensão, em 2007. As simulações com o modelo EB mostram que a carga de leito nesta bacia corresponde a 95% da carga total para estes eventos. Na estimativa anual da produção de sedimentos da área utilizando a curva-chave de sedimentos para avaliar o transporte em suspensão, contabilizando todos os dias de escoamento na bacia este percentual chega a 98%.

Na Bacia de Santo Antônio a taxa de transporte pelo leito foi avaliada para 15 eventos em que foram monitoradas as descargas sólidas em suspensão no ano de 2007. Para estes eventos a taxa de transporte de leito corresponde a 80% da taxa total, através da simulação com o modelo EB. Já na estimativa anual de produção de sedimentos em que as descargas sólidas em suspensão foram avaliadas aplicando-se as equações de curva-chave de sedimentos desta bacia, a carga transportada pelo leito chega a 88%.

Os percentuais de descarga de leito obtidos para as três bacias podem estar correlacionados à granulometria do sedimento. Uma curva granulométrica foi determinada para cada bacia, a partir de amostras coletadas no leito dos canais principais de cada área, apresentadas na Figura 5.21.



5.4.3. Resumo dos Resultados das Três Bacias

A Tabela 5.11 apresenta um resumo de alguns resultados obtidos e sua comparação com características das áreas a fim de analisar a relação entre a produção de sedimentos e os diferentes contextos geoambientais.

Tabela 5.11 – Resumo dos resultados obtidos nas bacias de Aiuaba, Pai João e Santo Antônio comparação entre os diferentes contextos geoambientais.

Característica	Aiuaba	Pai João	Santo Antônio
Área de drenagem (Km ²)	12,0	9,3	6,8
Elevação e relevo (m)	530 – 660 (130)	230 – 850 (620)	410 – 910 (500)
Precipitação anual - 2007 (mm)	723	804	976
Declividade média (%)	19,4	40,2	47,6
Tempo de concentração (h)	1,1	0,7	0,5
Coefficiente de escoamento superficial anual (2007)	0,3%	7,0%	55,0%
Percentual de Cobertura Vegetal (%)	100 %	86 %	76 %
Fator C de cobertura vegetal e usos do solo	0,006	0,019	0,022
Erodibilidade média (ton.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	0,047 (alta)	0,015 (baixa)	0,024 (média)
Erosividade anual - 2007 (MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹)	7.821	7.892	6.075
Dias de escoamento em 2007	8	112	365
Número de eventos chuva-deflúvio	8	14	41
Variação da concentração de sólidos em suspensão (mg.L ⁻¹)	100 a 2.000 mg/L	10 a 50 mg/L	10 a 700 mg/L
Percentual de sólidos suspensos em relação à carga total em suspensão (%)	66%	5%	25%
Descarga sólida de leito dos eventos (%)	27%	95%	80%
Taxa de transporte difuso média dos eventos avaliados em 2007 – SDR (%)	1,2%	2,7%	11,2%
Parâmetro de transporte Kv (Hidrosed2)	0,51	0,19	0,14
Produção de sedimentos (2007)	1 ton.km ⁻² .ano ⁻¹	136 ton.km ⁻² .ano ⁻¹	686 ton.km ⁻² .ano ⁻¹

São observadas correlações entre a produção de sedimentos das bacias e alguns parâmetros, de forma a compreender que fatores estão envolvidos no processo de erosão e transporte de sedimentos nas bacias. Verificou-se que:

- O aumento das declividades está diretamente relacionado ao aumento da produção de sedimentos, sendo a fisiografia fator influente no transporte de sedimentos em bacias. Sabe-se que áreas mais íngremes tendem a produzir mais sedimentos.

- O fator C, que representa a cobertura vegetal e usos do solo, diminui à medida que aumenta o percentual de cobertura vegetal. Observa-se que, quanto mais preservada a bacia, menor o fator C e menor a produção de sedimentos comparando-se as três áreas. Entretanto, não é possível traçar conclusões unicamente em função do uso do solo, pois outros fatores influenciam a produção de sedimentos.

- O escoamento superficial apresentou relação direta com a produção de sedimentos, o aumento do coeficiente de escoamento superficial na comparação entre as bacias, implicou em aumento da produção de sedimentos. Esta relação também foi obtida com o número de eventos chuva-deflúvio e com o número de dias de escoamento nas áreas. Observa-se o papel do escoamento superficial como o agente de transporte.

- Não foi observada relação direta entre as concentrações de sedimentos em suspensão medidas e a produção de sedimentos, uma vez que as maiores concentrações foram encontradas na Bacia Experimental de Aiuaba, que apresentou menor produção de sedimentos. Estas precisam estar associadas às respectivas vazões líquidas.

- Com relação ao parâmetro de transporte Kv do modelo HIDROSED2 observou-se para as bacias relação inversa entre este parâmetro e a produção de sedimentos. Ainda, os valores de Kv encontrados nas bacias *sub-úmidas* de Pai João e Santo Antônio, correlacionados com o fator combinado CP da USLE, apresentaram uma relação fora das tendências observadas por Araújo (2007) para as bacias de clima tropical *semi-árido* e clima *temperado* (Figura 5.22).

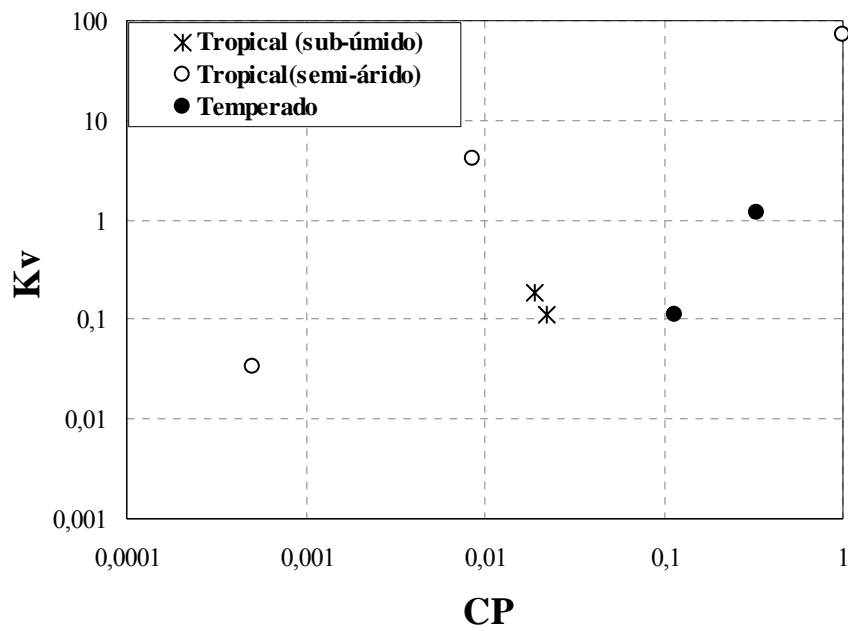


Figura 5.22 – Relação entre Kv, parâmetro de transporte (modelo HIDROSED2) e CP, fator combinado (USLE) para bacias de clima tropical semi-árido (Aiuaba, Sumé-PB); temperado (Länenbachtal e Nünzenberg, Suíça); e tropical sub-úmido (Pai João e Santo Antônio)

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Estimativa da produção de sedimentos em três pequenas bacias hidrográficas de aproximadamente 10 km² foi realizada com a finalidade de avaliar a influência dos diferentes contextos geoambientais e dos fatores que interferem no processo de erosão e transporte de sedimentos nestas áreas. Este estudo visou também avaliar o desempenho de um modelo na previsão de produção de sedimentos nas bacias. As principais conclusões com base no estudo realizado são:

Entre as três bacias, Aiuaba foi a que apresentou os menores valores de produção de sedimentos, esta é também a bacia com maior área de drenagem e mais preservada. Sabe-se que a produção de sedimentos em uma área tem relação com várias fatores como vegetação, clima, frequência de eventos e de escoamento, topografia e relevo, usos do solo e não unicamente a área.

A produção de sedimentos na Bacia Experimental Aiuaba em 2007 foi avaliada em 1 ton.km⁻².ano⁻¹ que pode ser associada ao baixo coeficiente de escoamento superficial anual avaliado em 0,3%, resultado de apenas oito eventos chuva-deflúvio na área, característica do semi-árido. Entretanto, outros fatores contribuíram para uma baixa produção de sedimentos, como área totalmente coberta por vegetação densa e preservada, além da influência da litologia com predominância de fraturas que influenciam o processo de transferência de água e sedimentos, através de perdas em trânsito.

A produção de sedimentos na Bacia de Pai João foi estimada, no ano de 2007, em 136 ton.km⁻².ano⁻¹, o coeficiente de escoamento fluvial foi avaliado em 8%, contabilizando 112 dias de escoamento. Caso não houvesse a interferência de barragens na bacia a produção de sedimentos seria de 163 ton.km⁻².ano⁻¹. Desse total o que ficou retido nas barragens de acumulação de água corresponde a 13%, enquanto o que ficou retido nas barragens de contenção de sedimentos corresponde a 4%.

Na Bacia de Santo Antônio a produção de sedimentos foi avaliada em 686 ton.km⁻².ano⁻¹, resultante de 365 dias de escoamento e de um coeficiente de escoamento fluvial de 61%, outras características da área também interferem neste resultado. Entre as três bacias, a BSA é

a que apresenta menor percentual de cobertura vegetal (76% da área), maiores declividades e uso mais intenso do solo sem práticas de conservação. Entretanto, não se descarta a possibilidade de super-estimativa da produção de sedimentos, uma vez que a carga de leito foi obtida através de modelagem, e corresponde a 88% da produção total.

Comparando as cargas dissolvidas presentes nas amostras do escoamento das três bacias Aiuaba, Pai João e Santo Antônio os respectivos percentuais de 34%, 95% e 75%, podem ser um indicativo de características da área como tipo de escoamento, como também de interferências antrópicas nas áreas.

Através de simulação com o modelo EB tendo por base os eventos com descargas sólidas em suspensão monitoradas, as descargas de leito avaliadas nas bacias de Aiuaba, Pai João e Santo Antônio foram respectivamente 27%, 95% e 80% da descarga sólida total (leito e em suspensão), entretanto, acredita-se que haja uma super-estimativa desses valores. Para uma real avaliação desses valores são necessárias medições em campo.

Uma eventual super-estimativa das descargas de leito obtidas através de modelagem pode ter conduzido a uma super-estimativa da produção de sedimentos nas bacias de Pai João e Santo Antônio, uma vez que foram encontrados os maiores percentuais nestas áreas.

Analisando apenas as cargas em suspensão, uma vez que estas foram avaliadas através de medição, a produção de sedimentos nas Bacias de Pai João e Santo Antônio foram respectivamente, $2 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ e $80 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$, enquanto que na Bacia Experimental de Aiuaba a produção de sedimentos total (cargas em suspensão+cargas de leito) foi cerca de $1 \text{ ton.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$.

Com relação ao modelo HIDROSED2, verifica-se que este se aplica apenas à estimativa de produção de sedimentos acumulada ou em eventos de elevada erosão. No caso das Bacias de Pai João e Santo Antônio, sua aplicação fica comprometida pelo fato de não haver dados suficientes para sua validação.

Na avaliação individual de eventos pouco erosivos nas três bacias o modelo HIDROSED2 não apresentou resultados satisfatórios, com diferenças de até 900% em relação à estimativa realizada por outros métodos aplicados neste estudo, entretanto não se pode descartar erros e

incertezas na estimativa dos valores tomados como referência. Por outro lado, na estimativa anual de produção de sedimentos realizada na Bacia Experimental de Aiuaba o modelo apresentou resultados satisfatórios em comparação com o método da curva-chave de sedimentos. Avalia-se que o modelo pode ser aplicado para planejamento em sistemas com características semelhantes à BEA.

Os resultados sugerem ainda o aprimoramento da modelagem baseada na física de processos, por outro lado esta abordagem necessita de um grande número de dados e parâmetros medidos em campo para sua validação, o que sugere a necessidade de expansão e aprimoramento de monitoramento de variáveis hidrológicas e sedimentológicas em bacias hidrográficas, com a elaboração de bancos de dados, além de pesquisas e estudos em áreas experimentais.

RECOMENDAÇÕES

- O monitoramento das descargas sólidas de leito nas bacias a fim de avaliar a contribuição desta parcela do transporte para produção de sedimentos, minimizando erros na estimativa de produção de sedimentos.
- Determinar na Bacia de Santo Antônio onde há escoamento de base durante todo o ano, uma curva-chave para o fluxo de base, uma somente para eventos e outra para eventos no período seco, a fim de minimizar os erros na estimativa de produção de sedimentos.
- Avaliar a distribuição espacial do sedimento nas bacias.
- Avaliar o efeito de escala através do monitoramento de subbacias nas áreas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPEL, K.J. (2006). **Characterisation of badlands and modeling of soil erosion in the Isábena watershed, NE Spain**. Msc Thesis, Potsdam University, Potsdam, Germany.

ACHITE, M.; OUIILLON, S. (2007). Suspended sediment transport in a semiarid watershed, Wadi Abd, Algeria (1973-1995). **Journal of Hydrology**. 343: 187-202.

ALI, K.F.; DE BOER, D.H. (2007). Spatial patterns and variation of suspended sediment yield in the upper Indus River basin, northern Pakistan. **Journal of Hydrology**. 334: 368-387.

ARAÚJO (2004). Relatório de Estágio Pós-doutoral. The University of Birmingham/ CAPES/ UFC, 133p.

ARAÚJO, J.C., BELO, P.S.C., SILVA, R.A.C., GERMANO, C.A., MEDEIROS, P.H.A. (2004). Bacia Experimental de Aiuaba, CE. *In*: Righetto, A.M. (Org.) **Implantação de bacias experimentais do semi-árido**. Relatório Técnico, FINEP, Natal.

ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A.; GÜNTNER, A. (2005). Influence of reservoir sedimentation on water yield in the semiarid region of Brazil. *In*: **Sediment Budgets** (ed. by D. Walling & A. Horowitz), 301–307. IAHS Publ. 292, IAHS Press, Wallingford, Oxfordshire, UK.

ARAÚJO, J. C., GÜNTNER, A.; BRONSTERT A. (2006). Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal-Journal des Sciences Hydrologiques**, 51(1): 157-170, DOI 10.1623/hysj.51.1.157

ARAÚJO, J.C. (2006). As barragens de contenção de sedimentos para conservação de solo e água no semi-árido. *In*: KÜSTER, A.; MELCHERS, I.; MARTÍ, J.F. (Org.) **Tecnologias apropriadas para terras secas – Manejo sustentável de recursos naturais em regiões semi-áridas no Nordeste do Brasil**. Fundação Konrad Adenauer, GTZ, Fortaleza, 157-168.

ARAÚJO, J.C. (2007). Entropy-based equation to assess hillslope sediment production. **Earth Surface Processes and Landforms**, 32(13): 2005 – 2018, DOI 10.1002/esp.1502.

ARAÚJO, J. C. ; FARIAS, T. R. L. ; LINARD, A. F. G.(2007). Eficiência de Retenção em Barragens de Contenção de Sedimentos do Tipo Marco Zero. *In*: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, São Paulo.

ARAÚJO, L. C. M. (2005). **Análise de Susceptibilidade à Erosão dos Solos da Estação Ecológica de Aiuaba – Ce**. 119f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BALE, M.; BILLER, D.; LOPES, I.V.; BASTOS FILHO, G.S. (1997) **Successful Natural Resource Management Practices in Brazil**. USA. World Bank, p. 12-13 (LATEN Dissemination Note,18).

BATHURST, J.C., Wicks, J.M; O'Connell, P.E. (1995). The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In: **Computer Models of Watershed Hydrology** (ed. By V.P.Singh), 563-594. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA.

BICALHO, C.C. (2006). **Estudo do Transporte de sedimentos em suspensão na Bacia do rio Descoberto**. 123p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos)-Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

BOGÁRDI, J. (1974). **Sediment Transport in Alluvial Streams**. Akadémiai Kiadó, Budapest, 826p.

BROWN, C.B. (1943). Sediment Transportation. In: **Engineering Hydraulics**, H. Rouse, ed., John Wiley & Sons, New York.

BRUNE, G. M. (1953) **Trap efficiency of reservoirs**. Trans. Am. Geophys. Union 34(3):407-418.

CANTÓN, Y.; DOMINGO, F.; SOLÉ-BENET, A.; PUIGDEFÁBREGAS, J. (2001). Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. **Journal of Hydrology** 252: 64-84.

CARVALHO, N. O. (1994). **Hidrossedimentologia prática**. CPRM, Rio de Janeiro, 372p.

CAVALCANTE, S. P. P.; ARAÚJO, J. C.; FARIAS, T. R. L. (2003) Caracterização Geotécnica e da Erodibilidade dos Solos da Bacia Experimental do Neco – AIUABA CE. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XIII**, Curitiba. Anais... Curitiba: Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

CEARÁ (2001). **Manual técnico operativo do PRODHAM**. 177f. Secretaria de Recursos Hídricos, Fortaleza.

CHANG, H. H. (1988). **Fluvial Processes in River Engineering**. Krieger Publishing Company, Malabar, Flórida.

CHELLA, M.R.; FERNANDES, C.V.S.; FERMIANO, G.A.; FILL, H.D.; SANTOS, I. (2005). Avaliação do Transporte de Sedimentos no Rio Barigüi. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol 10, n.3, 105-111.

CHEN, C.-N.; TSAI, C.-H.; TSAI, C.-T. (2006). Simulation of sediment yield from watershed by physiographic soil erosion-deposition model. **Journal of Hydrology** 327: 293-303.

CHOW, V.T. (1959). **Open-Chanel Hydraulics**. McGraw-Hill Int.,New York.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R; MAYS, L.W. (1988). **Applied Hydrology**. McGraw-Hill Int.,New York.

COSTA, A.C. (2007). **Hidrologia de uma Bacia Experimental em Caatinga conservada no semi-árido brasileiro**. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CREUTZFELDT, B. (2006). **Remote sensing based characterization of land cover and terrain properties for hydrological modeling in the semi-arid Northeast of Brasil**. Final Year Work, Potsdam University, Potsdam, Germany.

DE VENETE, J.; POESEN, J.; VERSTRAETEN, G.; ROMPAEY, A.V.; GOVERS, G. (2007). Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain. **Global and Planetary Change**. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.05.002.

DNMET (1992) **Normais Climatológicas (1961 – 1990)**. Departamento Nacional de Meteorologia do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Brasília, DF.

EICHERT, B. (2008). **Relatório de Estágio**. Grupo de Estudos Hidrossedimentológicos do Semi-Árido, 4p.

EINSTEIN, H. A. (1942) **Formulas for the Transportation of Bed Load**. Trans. ASCE, 107. pp 561-573.

FIGUEIREDO, E. E.; BATHURST, J. C. (2005). Relationship between simulated sediment yield and scale in a semiarid region of Brazil. (Proc.VII Symposium of IAHS) 110-118. **Sediment Budgets 2, IAHS Publication 292**, Foz do Iguaçu, Brasil.

FLANAGAN, D. C.; LIVINGSTON S. J. Eds. (1995). **WEPP User Summary**. USDA. Disponível em : <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain>. Acesso em: 23 jan 2008.

FUNCEME (2001). **Levantamento semi-detalhado dos solos da microbacia hidrográfica do Riacho Vazante, Aratuba/CE**. 53p. FUNCEME, Fortaleza.

FUNCEME (2008). **Séries Pluviométricas dos Postos Aiuaba (1978-2007), Pai João (2000-2007) e Aratuba (1974-2007)**. Disponível em: <http://www.funceme.br/DEPAM/index.htm>. Acesso em: 21 jan 2008.

GÜNTNER, A. (2002). **Large-scale hydrological modeling in the semi-arid North-East of Brazil**. PIK-Report No. 77. PhD thesis Potsdam Institute for Climate Research, Germany.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2003). Large-Scale Hydrological Modeling of a semi-arid Environment: Model, Development, Validation and Application. *In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J.C. (eds.) Global Change and Regional Impacts*. Springer Verlag, Berlin.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. (1994). **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**. Academic Press, San Diego, 588p.

KALIN, L.; GOVINDARAJU, R.S.; HANTUSH, M.M. (2003). Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph. **Journal of Hydrology** 276: 89-111.

KLIK, A.; JESTER, W.; RAUTER, C. (2005) Sediment transport in a small agricultural watershed-evaluation of WEPP simulations with measured data. (Proc.VII Symposium of IAHS) 127-135. **Sediment Budgets 2, IAHS Publication 292**, Foz do Iguaçu, Brasil.

LEMOS, J. R. (2006) **Florística, Estrutura e Mapeamento da Vegetação de Caatinga da Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará**. 142 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Biociências, Departamento de Botânica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

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

LOPES, W. T. A. (2003). **Efeitos de Escala na Modelagem Hidrossedimentológica na Região Semi-árida da Paraíba**. 196f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

LUKEY, B.T.; SHEFFIELD, J.; BATHURST, J.C.; HILEY, R.A.; MATHYS, N. (2000). Test of the SHETRAN technology for modelling the impact of reforestation on badlands runoff and sediment yield at Draix, France. **Journal of Hydrology** 235: 44–62.

MAMEDE, G. L. (2008) Reservoir Sedimentation in Dryland Catchments: Modelling and Management. Tese de doutorado. Instituto de Geo-Ecologia, Universidade de Potsdam, Alemanha

MANTOVANI, W. (2007). Conservação da Biodiversidade: importância das serras úmidas no nordeste semi-árido brasileiro. *In: OLIVEIRA, T.S.; ARAÚJO, F.S. (eds.) Diversidade e conservação da Biota na Serra de Baturité, Ceará*. Edições UFC, COELCE, Fortaleza.

MAO, L.; COMITI, F.; ANDREOLI, A.; LENZI, M.A.; SCUSSEL, G.R. (2005). Bankfull and bed load effective discharge in a steep boulder-bed channel. (Proc.VII Symposium of IAHS) 189-196. **Sediment Budgets 1, IAHS Publication 291**, Foz do Iguaçu, Brasil.

MARTÍNEZ-CARRERAS, N.; SOLER, M.; HERNÁNDEZ, E.; GALLART, F. (2007). Simulating badland erosion with KINEROS2 in a small Mediterranean mountain basin (Vallcebre, Eastern Pyrenees). **Catena** 71: 145–154.

MATEOS, L.; GIRÁLDEZ, J.V. (2005). Suspended load and bed load in irrigation furrows. **Catena** 64: 232–246.

MEDEIROS, P.H.A. (2005). **Medida e Modelagem da Interceptação em uma Bacia Experimental do Semi-árido**. 70f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MEDEIROS, P.H.A.; ARAÚJO J.C. (2005). Modelagem da interceptação no semi-árido brasileiro: aplicação do modelo de Gash na Bacia Experimental de Aiuaba - CE. In: **XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, João Pessoa - PB. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

MOLLE, F.; CADIER, E. (1992). **Manual do Pequeno Açude**. SUDENE-DPG-PRN-DPP-APR, Recife, 523p.

MÜLLER, E. N.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G.; BATALLA, R. J.; ARAÚJO, J.C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2006). **Interim Report**. SESAM PROJECT– Sediment Export from large Semi-Arid Catchments: Measurement and Modelling, 78p.

NASCIMENTO, M. M. (2007). 109f. **Unidades de relevo e processos erosivos na microbacia Vazante, Aratuba-CE**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models- Part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrologic Engineering**, nº1 10, pag 282-290.

NAVAS, A.; WALLING, D. E.; QUINE, T. A.; MACHIN, J.; SOTO, J. (2005). The pattern of soil redistribution along a transect in the central Ebro basin (NE Spain) and its controls. (Proc.VII Symposium of IAHS) 189-196. **Sediment Budgets 1, IAHS Publication 291**, Foz do Iguaçu, Brasil.

ONDA, Y.; KATO, H.; TANAKA, Y.; TSUJIMURA, M.; DAVAA, G.; OYUNBAATAR, D. (2007). Analysis of runoff generation and soil erosion processes by using environmental radionuclides in semiarid areas of Mongolia. **Journal of Hydrology**, 333: 124– 132.

PEREIRA, R.C..M. (1982). Solos. In: J.G.B. Oliveira (Editor), **Projeto Aiuaba**, Fortaleza.

REINING, L. (1992). **Erosion in Andean hillside farming: characterization and reduction of soil erosion by water in small scale cassava cropping systems in the southern central cordillera of Colombia**. Hohenheim tropical agricultural series;1, Margraf, 219p.

RESTREPO, J.D.; KJERFVE, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975–1995) and revised water discharge and sediment load estimates. **Journal of Hydrology**, 235: 137–149.

RESTREPO, J.D.; KJERFVE, B.; HERMELIN, M.; RESTREPO, J.C. (2006). Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. **Journal of Hydrology**, 316: 213–232.

ROOSE, E. J. (1977) **Application of the Universal Soil Loss Equation of Wischmeier and Smith in West Africa**. 177-187. In: Greenland, D.J.; R. Lal (Ed) 1977. Soil Conservation and Management in the humid tropics. Wiley. Chichester, New York, Brisbane, Toronto.

ROVIRA, A.; BATALLA, R.J.; SALA, M. (2005). Fluvial sediment budget of a Mediterranean river: the lower Tordera (Catalan Coastal Ranges, NE Spain). **Catena** 60:19–42.

SANTOS, I.; FILL, H.D.; SUGAI, M.R.S.; BUBA, H.; KISHI, R.T.; MARONE, E.; LAUTERT, L.F.C. (2001). **Hidrometria Aplicada**. LACTEC-Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba, 372p.

SILVA, A. F. M. S. (2007). 119f. **Análise da Suscetibilidade à Erosão dos Solos na Microbacia do Riacho dos Barros, Município de Aratuba-Ceará**. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SOUZA FILHO, E.T. (2006). **Microbacia hidrográfica do Riacho Vazante, Aratuba, Ceará: solos, uso e percepção de seus agricultores**. 55f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SOUSA, G. (2007). **MODFIPE – Um modelo distribuído de base física para simulação do escoamento e erosão do solo**. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SPAROVEK, G.; BACCHI, O.O.S.; COOPER, M.; FILIPPE, J.; CORRECHEL, V.; JUHASZ, C.E.P. (2005). Sediment deposition in riparian ecosystems evaluated by different methods. (Proc.VII Symposium of IAHS) 285-293. **Sediment Budgets 1, IAHS Publication 291**, Foz do Iguaçu, Brasil.

SRINIVASAN, V.S.; SANTOS, C.A.G.; GALVÃO, C.O. (2003). Erosão hídrica do Solo no Semi-árido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol 8, n.2, 57-73.

SZUPIANY, R.; TRENTO, A.; ALVAREZ, A.M. (2005). Transporte de Sedimentos de Fondo en el Rio Salado (Santa Fe, Argentina). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Vol 10, n.1, 79-88.

TUCCI, C.E.M. (1998). **Modelos hidrológicos**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 669p.

VANLIERDE, E.; SCHUTTER, J.; MEYS, J.F.A.; MOSTAERT, F.; JACOBS, P. (2005). Contributions of authigenic iron compounds to fluvial suspended sediment concentrations and fluxes in the Nete sub-basin, Belgium. (Proc.VII Symposium of IAHS) 54-63. **Sediment Budgets 1, IAHS Publication 291**, Foz do Iguaçu, Brasil.

VERICAT, D.; BATALLA, R. J. (2006). Sediment transport in a large impounded river: the lower Ebro, NE Iberian Peninsula. **Geomorphology** 79: 72–92.

VERRÍSSIMO, C. U. V. (2007). **Relatório Preliminar de Geologia da Bacia Experimental de Aiuaba**. Fortaleza. Grupo de Estudos Hidrossedimentológicos do Semi-Árido, 6p.

VERSTRAETEN, G.; POESEN, J. (2001). Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. **Geomorphology** 40: 123–144.

WOOLHISER, D.A., SMITH, R.E., GOODRICH, D.C. (1990). **KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual**. U S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 130 p.

WILLIAMS, J.R. (1975): Sediment-yield prediction with universal soil equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources: **Proceedings of the sediment-yield workshop**, USDA Sedimentation Lab., Oxford, MS, November 28 – 30, 1972. ARS-S-40. 244-252.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning, **Agricultural Handbook N° 537**. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.

ZHU, T. X.; LUK, S. H.; CAI, Q.G. (2002). Tunnel erosion and sediment production in the hilly loess region, North China. **Journal of Hydrology** 257: 78-90.