

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: RECURSOS HÍDRICOS
MESTRADO

ALEXANDRE CUNHA COSTA

**HIDROLOGIA DE UMA BACIA EXPERIMENTAL EM CAATINGA
CONSERVADA NO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO**

FORTALEZA-CE
2007

ALEXANDRE CUNHA COSTA

HIDROLOGIA DE UMA BACIA EXPERIMENTAL EM CAATINGA CONSERVADA NO
SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

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.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo

Co-orientador: Prof. Dr. Horst Frischkorn

FORTALEZA-CE
2007

ALEXANDRE CUNHA COSTA

HIDROLOGIA DE UMA BACIA EXPERIMENTAL EM CAATINGA CONSERVADA NO
SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO

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: 24/08/2007

BANCA EXAMINADORA

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

Dr. Horst Frischkorn (Co-orientador)
Universidade Federal do Ceará

PhD. Nilson Campos
Universidade Federal do Ceará

PhD. Sérgio Koide
Universidade de Brasília

À minha família: minha esposa, meus pais e irmãos, aos meus avós Sátiro e Esther e ao povo do sertão semi-árido.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. José Carlos de Araújo pela brilhante orientação e por ter dado todas as condições práticas para a realização dessa dissertação. Ao prof. Horst Frischkorn por todos os excelentes momentos de co-orientação, que não foram poucos. Para ambos agradeço a fácil convivência e a amizade que também foram essenciais durante essa investigação.

À Teresa Farias, ao Pedro Medeiros, ao Paulo Belo, à Vanda Malveira, ao George Mamede, à Anny Jackline Rosas, ao Rodolfo Sabiá e aos novos integrantes do grupo HidroSed (Mário e Yuri) pelo companheirismo, ótima convivência e troca de experiências científicas.

Aos colegas do projeto *SESAM*: prof. Axel Bronstert, Andreas Güntner, Eva Mueller, Till Francke e Ramón Batalha, pelas contribuições práticas e pelos ensinamentos na ciência hidrologia.

Aos mestres e lutadores do campo: Sr. Antônio Francisco da Silva (Tico) e Dona Socorro, Hosana Américo, Dona Leontina Américo, Dona Socorro Américo, Dona Itabaraci Américo, Maria Américo, Antônio Reis e Eremilto da Silva, que proporcionaram o encontro do conhecimento teórico e prático, marco “zero” para essa investigação e pelo ótimo convívio e amizade.

À profa. Sandra Santaella pelos os ótimos momentos de ensino-aprendizagem e de amizade durante a investigação e o curso de mestrado.

Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), em nome do Sr. Manoel Alencar e da Grasiely Tavares, e à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), em nome do Pres. e prof. Eduardo Sávio Martins, do Bosco Accioly Filho, do Humberto Sobrinho e do Ricardo Martins, pela relação institucional prática e objetiva que possibilitaram o pleno andamento dessa dissertação.

Aos companheiros de estudos hidrológicos do semi-árido: Marjella de Vries, Pieter van Oel, Anne Leskens e prof. Maarten Kroll da *Universiteit Twente*.

Ao prof. César Veríssimo, à prof. Carísia Gomes e ao Walber Cordeiro pelas discussões sobre a hidrogeologia de Aiuaba. Ao Carlos Germano pela parceria nos trabalhos de campo e laboratorial. Ao prof. Bemvindo Gomes pelas contribuições científicas no estudo de traçadores naturais.

À Coordenação do curso de pós-graduação em Irrigação e Drenagem (CMID), em nome dos professores Adunias Texeira, Claudivan Feitosa, Benito Azevedo e Eunice de Andrade, pelas as condições formidáveis de instalação e trabalho que possibilitaram a realização dessa dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), em nome dos funcionários Betidaves da Silva, Erivelton Ferreira, Dalya Borges, Raimundo Xavier e Umbelina Caldas Neta.

Aos companheiros de turma da pós-graduação: Magno, Eloneide, Itarciane, Silva, Danilo, Charles, Marcus, Andréa, Fernando Peroba, Sarah, Elisângela, Francisco José, Fernando, Orleani, Tatiana Falcão, Alexandre Gomes e Beatriz.

Ao prof. Marco Aurélio de Holanda pela a disponibilidade de utilização do micro-molinete do DEHA.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida e pelo financiamento ao Projeto *PROSED* (processo 552411/2005-1) que essa dissertação é parte integrante.

Aos meus amigos e familiares que me ajudaram em todos os momentos: meus tios Henrique Cunha, Paulão Falcão e Zé Eduardo Bastos; minhas tias Aila Cunha, Iara Cunha e Eveline Alves; Dona Leda e Sr. Kelber Rodrigues; e especialmente aos meus pais Moacir e Joyce, meus irmãos Lídia e Davi e minha esposa Keylane, com vocês consigo seguir adiante e lutar por um mundo livre e sem opressões.

“A tolerância é um pré-requisito numa sociedade em que a investigação venha a florescer. A liberdade de palavra e pensamento é a grande promotora de uma sociedade livre, na qual o investigador possa deixar que a verdade o conduza aonde quiser. Neste sentido, todos podem contribuir para o bem em jogo. Não significa que todos teremos as mesmas opiniões em tudo, mas garante que nenhum caminho será fechado por censuras artificiais.

Para o homem, em verdade, uma existência não examinada não vale a pena viver.”

Bertrand Russel, *História do Pensamento Ocidental*,
p. 504.

“(…) quando você falou que eu deveria virar pintor, achei impraticável e nem quis escutar. O que me tirou as dúvidas foi a leitura de um livro que esclarecia a perspectiva, o *Guide to the ABC of Drawing*, de Cassage; e uma semana depois desenhei uma cozinha com fogão, cadeira, mesa e janela – tudo no seu lugar, sobre suas próprias pernas – quando antes conseguir dar uma noção de profundidade e acertar a perspectiva correta num desenho era, para mim, um ato de bruxaria ou do mais puro acaso.”

Vincent Van Gogh, em carta ao seu irmão Theo, que lhe sugerira tornar-se pintor. *Carta nº 184*, p. 331.

RESUMO

O objetivo geral foi quantificar e avaliar os principais processos hidrológicos, incluindo a produção de sedimentos, da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) para o período de 2003-2007. A BEA, com área de 12 km², está localizada no sertão dos *Inhamus* em área de conservação ambiental do bioma caatinga na Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba, Ceará, pertencente à bacia do Alto Jaguaribe. Realizou-se caracterização da fisiografia, medição de variáveis hidrológicas, avaliação de processos chuva-deflúvio na bacia hidrográfica e no reservatório que a controla. Conclui-se que: o processo de infiltração do açude da BEA (capacidade de 59.700 m³) é relevante e da mesma ordem de grandeza da evaporação; a recarga subterrânea direta ao lago é desprezível em relação à evaporação e à infiltração; durante os eventos chuva-deflúvio a evaporação, a infiltração e a recarga subterrânea são desprezíveis em relação ao deflúvio afluente e à precipitação direta sobre o lago. Conclui-se, dos eventos chuva-deflúvio e produção de sedimentos, que: o coeficiente de *runoff* (*CR*) dos eventos é extremamente baixo, sendo as lâminas d'água escoadas menores que as lâminas interceptadas pela vegetação; o Número de Curva (CN) médio por evento foi 42, com máximo de 59 e mínimo de 27; a produção de sedimentos apresentou valores entre 9 e 291 kg/km² para eventos de 2006-2007, e média de 97 kg/km² por evento; o escoamento superficial é efêmero: o tempo de deflúvio foi somente 64% maior que o tempo da precipitação por evento; as perdas elevadas no escoamento superficial ocorrem, em parte, por perdas em trânsito no riacho principal; a lâmina escoada na bacia do riacho secundário foi oito vezes maior que na bacia do riacho principal em 2007. Inferiu-se que o mecanismo de geração de deflúvio superficial predominante é o *hortoniano* e que, se relevante, a contribuição do escoamento subsuperficial deve ocorrer a uma profundidade menor que 15 cm. O *CR* médio anual da BEA foi 6,54% (máximo de 31,08% e mínimo de 0,13%). No ano de 2004 a lâmina escoada na BEA foi 35 vezes maior que a soma das lâminas escoadas nos demais anos. Dos 1543 dias monitorados, em apenas 139 dias ocorreu escoamento (9%), sendo 28 dias de escoamento nos anos não-chuvosos (1,8%). A produção de sedimentos em 2007 foi cinco vezes maior que em 2006, e para o biênio 2006-07 o mês de maior escoamento (abril de 2007) foi responsável por 71% da produção de sedimentos. Comparando-se o *CR* anual da BEA com outras bacias no rio Jaguaribe, a BEA foi uma das que apresentou menor coeficiente de *runoff*. Formulou-se a hipótese de a BEA ser uma área de recarga de aquífero fraturado, que condiciona processos hidrológicos superficiais.

Palavras-Chave: Balanço Hídrico, Chuva-deflúvio, Produção de Sedimentos, Bacia Experimental.

ABSTRACT

The general objective of this study was to quantify and evaluate the main hydrological processes, including sediment yield, of the Aiuba Experimental Basin (AEB), for the years 2003-2007. The AEB, with 12 km² of area, is located in the *Inhamus* hinterland, in an environmental conservation area of the *Caatinga* (stunted sparse forest) biome in the Aiuba Ecological Station (ESEC), Ceará, Brazil, located in the Upper Jaguaribe river basin. The basin's physiography was described, the hydrological variables were measured and the rainfall-runoff processes in the hydrographic basin and its controlling reservoir were evaluated. It can be concluded that: the infiltration process within AEB's reservoir (59.700 m³ of capacity) is relevant and similar to evaporation losses; the subsurface recharge direct to the lake is negligible in relation to evaporation and infiltration; during rainfall-runoff events evaporation, infiltration and subsurface recharge are negligible in relation to streamflow and precipitation direct to the lake. It is concluded, on base of rainfall-runoff and sediment yield events, that: the runoff coefficient (*RC*) per event is extremely low and the effective precipitation is lower than rainfall interception losses; the average Curve Number (*CN*) per event was 42 with maximum of 59 and minimum of 27; the average sediment yield per event was 97 kg/km² with range of 9-291 kg/km² during on 2006-2007; the surface flow is ephemeral: the duration of runoff was only 64% greater than the duration of rainfall per event; the high losses of surface flow was due to mainly transmission losses in the main river; the flow depth in the secondary stream basin was eight times greater than the flow depth in the main stream basin in 2007. It is inferred that predominant mechanism of surface runoff generation is the *hortanian* and that, if relevant, the subsurface flow contribution should occur in a soil depth lower than 15 cm. The average annual *RC* of AEB was 6,54% with maximum of 31,08% and minimum of 0,13%. In the year of 2004 the flow depth in AEB was 35 times greater than sum of the other monitored years. On 1543 days monitored, in only 139 days streamflow occurred (9%), 28 days of which in regular and dry years (2003, 2005, 2006, 2007). The sediment yield in 2007 was five times greater than that in 2006, and the month of peak flow (april/2007) was responsible by 71% of sediment yield of 2006 and 2007. The annual *RC* of AEB and of others basins in Jaguaribe river was compared, the AEB presented one of the lowest runoff coefficients. It is formulated a hypothesis that AEB is an area with fractured aquifer recharge, which drives surface hydrological process.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Diagrama hidrológico de um evento chuvoso em uma porção de uma bacia hidrográfica, fonte: Haan, Barfield e Hayes, 1993.....	34
FIGURA 2.2 – Inter-relação do destacamento, transporte e deposição do sedimento, adaptado de Meyer e Wischmeier (1969 apud HAAN; BARFIELD; HAYES 1993).....	38
FIGURA 2.3 – Um sistema fluvial idealizado, adaptado de: Schumm (1977 apud HAAN; BARFIELD; HAYES 1993).....	39
FIGURA 3.1 – Localização da Bacia Experimental de Aiuaba em relação à Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, fonte: Araújo, J. et al., 2004a.....	42
FIGURA 3.2 – Localização da Bacia Experimental de Aiuaba em relação à Estação Ecológica e ao município de Aiuaba.....	43
FIGURA 3.3 – Visão geral do açude Boqueirão, exutório da BEA, no momento de coleta de dados de nível d'água do limnígrafo de bóia na torre tranqüilizadora das águas. Data: 29-03-2004.....	44
FIGURA 3.4 – Relação entre o nível d'água e a área inundada no açude Boqueirão, fonte: Araújo, J. et al., 2004a.....	44
FIGURA 3.5 – Relação entre o nível d'água e o volume de acumulação no açude Boqueirão, fonte: Araújo, J. et al., 2004a.....	45
FIGURA 3.6 – Curva Hipsométrica da Bacia Experimental de Aiuaba, fonte: Araújo, J. et al. (2004a).....	46
FIGURA 3.7 – Poços no entorno da Bacia Experimental de Aiuaba, data: 10/05/2007. Foto do autor.....	47
FIGURA 3.8 – Regiões pluviometricamente homogêneas, fonte: FUNCEME, 2007.....	49
FIGURA 3.9 – Distribuição mensal da precipitação na Estação Ecológica do município de Aiuaba (1979-2005). As caixas são limitadas pelos percentis, a linha vermelha marca a média, e as cruces são os <i>outliers</i> , fonte: Creutzfeldt, 2006.....	50
FIGURA 3.10 – Mapa de vegetação da Estação Ecológica de Aiuaba. Classificação das fisionomias vegetais de acordo com a quantidade de folhas verdes presentes nas imagens CBERS-2, convertidas em imagem <i>NDVI</i> , confirmadas em campo, fonte: Lemos, 2006.....	52

FIGURA 3.11 – Vegetação de pequeno porte situada em área típica do embasamento cristalino, data: 03-05-2007.....	53
FIGURA 3.12 – Vegetação de maior porte situada próxima à calha do riacho principal. Data: 05-03-2007. Foto do Autor.....	53
FIGURA 3.13 – A-Perfil-diagrama representando a fisionomia de Caatinga arbustiva-arbórea alta densa. B-Fotografia mostrando a citada fisionomia em campo, fonte: Lemos, 2006.....	55
FIGURA 3.14 – A-Perfil-diagrama representando a fisionomia de Caatinga arbustiva-arbórea alta aberta. B-Fotografia mostrando a citada fisionomia em campo, fonte: Lemos, 2006.....	56
FIGURA 3.15 – Mapa dos principais tipos de solos da Bacia Representativa do Açude Bengüê, onde a Bacia Experimental de Aiuaba está totalmente inserida (as duas sub-bacias no quadrante vermelho), fonte: Creutzfeldt, 2006.....	57
FIGURA 3.16 – Pontos dos perfis de solos distribuídos espacialmente, tendo como base a delimitação da BEA realizada por Araújo, J. et al. (2004a).....	60
FIGURA 3.17 – Geologia geral da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), detalhe em azul (delimitação baseada em Araújo et al., 2004a), tendo como base Araújo, L. (2005).....	61
FIGURA 4.1 – Diagrama do material e dos métodos desta pesquisa, em que CF representa a tarefa: “caracterização da fisiografia”, MM a “medição e monitoramento”, AP a “avaliação de processos” e SH a “síntese hidrológica”.....	63
FIGURA 4.2 – Diagrama de interdependência entre os resultados dos processos hidrológicos, em que ABH representa o processo: “trocas hídricas na bacia hidráulica”, ECD: “eventos chuva-deflúvio” e PS: “produção de sedimentos”. As cores azul e verde indicam processos na bacia hidráulica e na bacia hidrográfica, respectivamente.	64
FIGURA 4.3 – Compatibilidade de dados para delimitação da BEA: em amarelo as curvas de nível da carta planialtimétrica, em vermelho as curvas de nível da base da <i>SRTM</i> , em azul claro a rede de drenagem digitalizada e em azul escuro o traçado da BEA.....	66
FIGURA 4.4 – Régua limnimétrica instaladas no açude Boqueirão, a partir de 1,60 m da cota mínima do açude, dispostas a cada metro em um total de quatro régua. Data: 29-05-2004	69
FIGURA 4.5 – Torre tranquilizadora das águas no ponto mais profundo do açude Boqueirão, em que o limnígrafo de bóia foi instalado. Data: 11-01-2003.....	69

FIGURA 4.6 – Exemplo de correlação entre as medidas diárias do limnógrafo e as das réguas limnimétricas, para correção do dado automático do limnógrafo em períodos de desajuste da medida.	70
FIGURA 4.7 – Estação Climatológica da FUNCEME instalada nas proximidades da BEA, com medidas automáticas a cada hora de: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e da sua rajada máxima, radiação incidente e pressão atmosférica. Data: 05-03-2007. Foto do autor.....	72
FIGURA 4.8 – Estação Climatológica 1 instalada na Sede da ESEC de Aiuaba, com medidas automáticas a cada hora de: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e da sua rajada máxima, radiação incidente e pressão atmosférica. Data: 27-03-2007. Foto do autor.	73
FIGURA 4.9 – Tanque Evaporimétrico Classe A instalado na Estação Pluviométrica 1 com medidas realizadas diariamente por meio de micrometro e de tanque tranquilizador. Data: 19-02-2003, fonte: Araújo, J. et al., 2004a.	74
FIGURA 4.10 – Estação Pluviométrica 1 com pluviômetro de báscula (resolução de 0,254 mm) e sensor de umidade de solo conectados a um módulo de memória. Medidas automáticas da chuva acumulada (a cada 5 min e 6 h) e umidade de solo (a cada 1 h). Data: 02-02-2003.	75
FIGURA 4.11 – Estação Pluviométrica 2 com pluviômetro de báscula (resolução de 0,254 mm) e sensor de umidade de solo conectados a um módulo de memória. Medidas automáticas da chuva acumulada (a cada 5 min e 6 h) e umidade de solo (a cada 1 h). Data: 02-02-2003.	76
FIGURA 4.12 – Estação Pluviométrica 3 com pluviômetro de báscula (resolução de 0,254 mm) e sensor de umidade de solo conectados a um módulo de memória. Medidas automáticas da chuva acumulada (a cada 5 min e 6 h) e umidade de solo (a cada 1 h). Data: 02-02-2003.	76
FIGURA 4.13 – Pluviômetros do tipo <i>Ville de Paris</i> sob a vegetação. Data: 09-03-2004, fonte: Medeiros, 2005.....	77
FIGURA 4.14 – Exemplo de calha com pequeno reservatório conectado ao tronco de árvore. Data: 09-03-2004, fonte: Medeiros, 2005.	78
FIGURA 4.15 – Diagrama para computação da taxa de escoamento submerso, em cfs, através da calha Parshall de 1 ft de largura de estrangulamento, em que o eixo das ordenadas corresponde o valor medido em H_A em ft, fonte: Chow, 1973.	79

FIGURA 4.16 – Detalhes da calha Parshall de 0,305 m de largura de estrangulamento, com capacidade de medição de vazão entre 3 a 456 L/s. Datas: 12-01-2003 (a) e 02-03-2004 (b).	80
FIGURA 4.17 – Detalhes do medidor de nível d'água automático instalado no ponto de medição de H_A , possuindo uma proporção em que 1 cm de coluna d'água equivale a 1 mm no papel milimetrado. Datas: 10-05-2007 (a) e 23-03-2007 (b). Foto do Autor.....	80
FIGURA 4.18 – Régua limnimétrica instalada imediatamente a jusante da calha Parshall, para realização de curva-chave, no intuito de não se perder dados de vazões máximas acima da capacidade de medição da calha Parshall. Data: 23-03-2007. Foto do autor.	81
FIGURA 4.19 – Medidor automático de nível d'água no ponto H_B da calha Parshall, que possui como princípio de medição a variação da pressão da coluna de ar de uma mangueira colocada no ponto H_B , provocada pela alteração do nível d'água nesse ponto. Data: 20-05-2007. Foto do autor.....	82
FIGURA 4.20 – Torre de coleta automática de sedimentos do ramo ascendente do hidrograma. Figuras 4.20a a 4.20c: data em 21-06-2005 e Figura 4.20d: data em . 20-05-2007. Figura 4.20d: Foto do autor.....	83
FIGURA 4.21 – Local de coleta de amostras de sedimentos na confluência dos dois riachos principais da BEA. Data: 23-03-2007. Foto do Autor.....	85
FIGURA 4.22 – Torre de coleta automática de sedimentos do ramo ascendente do hidrograma elaborada em <i>in loco</i> , instalada no segundo maior riacho da BEA. Data: 07-03-2007. Foto do Autor.....	86
FIGURA 4.23 – Torre de coleta automática de sedimentos do ramo ascendente do hidrograma elaborada em <i>in loco</i> , instalada no riacho principal da BEA. Data: 07-03-2007. Foto do Autor.	87
FIGURA 4.24 – Ambiente do Banco de Dados Hidrológicos da Bacia Experimental de Aiuaba.....	88
FIGURA 4.25 – Exemplo de arquivo com os dados armazenados da régua limnimétrica (Estação Limnimétrica).	88
FIGURA 5.1 – Delimitação da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) e da Sub-bacia da Estação Fluviométrica 1 (SB-EF1), com as demais estações de monitoramento hidrológico. Os dois riachos principais aparecem destacados da hidrografia geral com linhas de espessura	

maior. EINT é a Estação de Interceptação, CS o Coletor de Sedimentos, ES a Estação Sedimentológica, EL a Estação Limnimétrica e EP a Estação Pluviométrica.	99
FIGURA 5.2 – Perfil de declividades e altitude do riacho principal da BEA.....	101
FIGURA 5.3 – Perfil de declividades e altitude do riacho secundário da BEA.....	101
FIGURA 5.4 – Localização dos pontos de coleta de amostras para caracterização dos solos de leitos de riachos na BEA e na SB-EF1.....	102
FIGURA 5.5 – Perfis das seções dos riachos principal e secundário da BEA.....	104
FIGURA 5.6 – Nível d’água diário do reservatório Boqueirão, BEA (07/02/2003 a 30/04/2007) e da precipitação sobre o lago (09/01/2003 a 30/04/2007).....	106
FIGURA 5.7 – Valores diários da temperatura do ar e da radiação de onda-curta nas proximidades da BEA (01/01/2003 a 30/04/2007).....	106
FIGURA 5.8 – Valores diários de velocidade do vento e umidade relativa do ar nas proximidades da BEA (01/01/2003 a 30/04/2007).....	107
FIGURA 5.9 – Valores diários da pressão atmosférica nas proximidades da BEA (01/01/2005 a 30/04/2007).....	107
FIGURA 5.10 – Valores horários de nível d’água do reservatório Boqueirão e da precipitação sobre o lago, BEA (22/03 a 22/05/2006).....	109
FIGURA 5.11 – Valores horários de temperatura do ar e umidade relativa do ar nas proximidades da BEA (22/03 a 22/05/2006).....	109
FIGURA 5.12 – Valores horários de radiação de onda-curta e velocidade do vento nas proximidades da BEA (22/03 a 22/05/2006).....	110
FIGURA 5.13 – Valores horários de pressão atmosférica e precipitação sobre o lago do reservatório Boqueirão, BEA (22/03 a 22/05/2006).....	110
FIGURA 5.14 – Comparação da precipitação diária monitorada nas estações pluviométricas, onde a diagonal corresponde à linha de valores iguais.....	112
FIGURA 5.15 – Comparação da umidade média do solo diária monitorada dos sensores de umidade nas estações pluviométricas da BEA. No gráfico a diagonal corresponde à linha de valores iguais.....	114
FIGURA 5.16 – Precipitação média diária e perda diária por interceptação na BEA (2003 - 2007).....	116

FIGURA 5.17 – Precipitação média diária e umidade média diária do solo na BEA (2003 - 2007).....	116
FIGURA 5.18 – Relação entre sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) em amostras dos riachos da BEA (2007).	118
FIGURA 5.19 – Relação entre desnível d'água medido no açude da BEA e evaporação potencial na bacia, em que a diagonal corresponde à linha de valores iguais.....	120
FIGURA 5.20 – Relação entre desnível d'água menos evaporação potencial e nível médio diário do açude da BEA para o período de março a agosto de 2006, selecionando os dias sem chuvas e sem escoamento superficial.	121
FIGURA 5.21 – Perdas volumétricas acumuladas por evaporação e por trocas hídricas subterrâneas no açude Boqueirão da BEA, março a julho de 2006.....	122
FIGURA 5.22 – Hidrograma afluente ao açude da BEA, no período de 22/03 a 30/06 de 2006, obtido através do balanço hídrico no lago.....	123
FIGURA 5.23 – Comparações entre o deflúvio afluente original da série e os seus valores modificados pelos testes de consistência.....	126
FIGURA 5.24 – Comparações entre o deflúvio afluente diário com passos horário e diário (CDH), e entre o deflúvio afluente diário com passo horário e os seus valores modificados pelos testes TC1 e TC3 com passo diário.....	128
FIGURA 5.25 – Comparação entre o deflúvio afluente médio diário com passo horário e deflúvio afluente diário com passo diário calculado a partir de leitura manual das régua limnimétricas (precisão de 1 cm). A diagonal representa a linha de valores iguais.....	129
FIGURA 5.26 – Calha do vertedouro com dois canais: um principal do trecho 1 a 3 e um secundário do trecho 1 a 2. Data: 10-05-2007. Foto do Autor.	132
FIGURA 5.27 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BEA no período chuvoso de 2003.	133
FIGURA 5.28 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BEA no período chuvoso de 2004.	133
FIGURA 5.29 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BEA no período chuvoso de 2005.	134
FIGURA 5.30 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BEA no período chuvoso de 2006.	134

FIGURA 5.31 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BE no período chuvoso de 2007.	135
FIGURA 5.32 – Relação entre precipitação (P) média da BEA e os parâmetros de intensidade média ($I_{média}$), de intensidade máxima em 5 minutos ($I_{máx,5min}$) e de intensidade máxima em 30 minutos ($I_{máx,30min}$).	136
FIGURA 5.33 – Comparação entre o coeficiente de <i>runoff</i> (CR) e a porcentagem das perdas por interceptação da chuva em relação ao total precipitado (Pint) por evento na BEA (2003 – 2007).	139
FIGURA 5.34 – Relação entre volume escoado e produção de sedimentos de eventos chuva-deflúvio da BEA em 2006 e 2007.	140
FIGURA 5.35 – Duração da precipitação (P), duração do deflúvio afluente (Qa) e relação entre as durações do deflúvio afluente e da precipitação na BEA (2003 – 2007).	141
FIGURA 5.36 – Precipitação média da BEA a cada 5 minutos e hidrograma afluente ao açude Boqueirão a cada 30 minutos do evento chuva-deflúvio de 1/1/2007.	142
FIGURA 5.37 – Relação entre precipitação média na BEA e deflúvio afluente na escala de evento.	142
FIGURA 5.38 – Relação entre precipitação média na BEA e deflúvio afluente na escala diária.	143
FIGURA 5.39 – Relação entre as condições antecedentes de umidade média do solo ao evento ($\theta_{antecedente}$) a 15 cm de profundidade e o CN na BEA (2003 – 2007).	143
FIGURA 5.40 – Hidrograma afluente ao açude Boqueirão, hidrograma na EF1 e hietograma da precipitação média da BEA em 01 de janeiro de 2007.	146
FIGURA 5.41 – Relação entre volume escoado na BEA e na EF1 e volume escoado na BEA em dias de escoamento no ano de 2007.	147
FIGURA 5.42 – Relação entre a precipitação e a lâmina escoada mensais na BEA (2003 - 2007), em que os valores de lâmina escoada estão em escala logarítmica.	151

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Fontes de maior predominância na geração de deflúvio em eventos chuva-deflúvio, baseado em: ASCE (1957), Gray (1973), Sklash, Farvolden e Fritz (1976) e Chow, Maidment e Mays. (1988).	36
TABELA 3.1 – Granulometria e matéria orgânica de perfis de solos da BEA e do seu entorno levantados por Araújo, L. (2005) e por Cavalcante, Araújo e Farias (2003). Na Tabela, nda significa ausência de dados.....	58
TABELA 3.2 – Densidade real, massa específica aparente seca e condutividade hidráulica saturada de perfis de solos da BEA e do seu entorno levantados por Araújo, L. (2005) e por Cavalcante, Araújo e Farias (2003). Na Tabela, nda significa ausência de dados.....	59
TABELA 4.1 – Descrição das características de cada elemento da fisiografia da BEA.....	65
TABELA 4.2 – Processos hidrológicos e suas respectivas variáveis monitoradas na Bacia Experimental de Aiuaba (2003 - 2007).	68
TABELA 5.1 – Parâmetros Fisiográficos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) e da Sub-bacia controlada pela Estação Fluviométrica 1 (SB-EF1).....	100
TABELA 5.2 – Granulometria do solo do leito dos riachos de acordo com a classificação da USDA (apud HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993). BEA, 2007.....	102
TABELA 5.3 – Densidade real (D_p), massa específica aparente seca (ρ_b), porosidade (n) e condutividade hidráulica saturada (K_s) do solo do leito dos riachos da BEA, 2007.	103
TABELA 5.4 – Períodos em que foram utilizados os dados climatológicos da Estação Climatológica da ESEC (EC1), das Estações da FUNCEME (Assaré e Aiuaba) e da Estação do INMET (Tauá).....	105
TABELA 5.5 – Concentrações médias de sólidos suspensos totais (SST) no riacho principal da BEA (seção Estação Fluviométrica 1 – EF1) e no riacho secundário (seção Coletor de Sedimentos 3 – CS3) em dois eventos chuva-deflúvio. Na última coluna apresenta-se a razão entre as concentrações em EF1 e em CS3.	117
TABELA 5.6 – Concentrações médias de sólidos totais (ST) e de sólidos suspensos totais (SST) na BEA: Estação Fluviométrica 1 (EF1); Coletor de Sedimentos 2 (CS2); riacho principal, seção do Coletor de Sedimentos 3 (CS3); e no encontro dos dois riachos.	119

TABELA 5.7 – Termos e resultados estimados para a avaliação do erro global do método do balanço hídrico no passo horário para o período de 22/03 a 30/06 de 2006.	124
TABELA 5.8 – Valores do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) para os testes de consistência.	126
TABELA 5.9 – Valores do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) para os testes de consistência com passo diário (TC1 e TC3) e para a comparação dos resultados do balanço hídrico com passos diário e horário (CDH).	128
TABELA 5.10 – Propriedades geométricas das seções levantadas no vertedouro do açude da BEA, sendo numeradas em ordem crescente no sentido de montante para jusante.	130
TABELA 5.11 – Propriedades geométricas das seções trapezoidais equivalentes das levantadas no vertedouro do açude da BEA, sendo numeradas em ordem crescente no sentido de montante para jusante.	131
TABELA 5.12 – Resultados da equação 4.12 para dois métodos de solução.	131
TABELA 5.13 – Parâmetros hidrológicos de eventos chuva-deflúvio da BEA, sendo P a precipitação, I a intensidade, Qap a vazão afluente de pico, Qa a vazão afluente, $\theta_{\text{antecedente}}$ a umidade média do solo a 15 cm de profundidade anterior ao evento, Int as perdas por interceptação, PInt porcentagem das perdas por interceptação em relação à precipitação, CR o coeficiente de <i>runoff</i> e CN o Número de Curva.	137
Tabela 5.14 – Valores médios de variáveis climatológicas na estação da FUNCEME de quatro eventos chuva-deflúvio.	138
TABELA 5.15 – Produção de Sedimentos de eventos chuva-deflúvio da BEA em que P é a precipitação, SST a concentração de sólidos suspensos totais e SY a produção de sedimentos.	140
Tabela 5.16 – Coeficientes de determinação entre o deflúvio afluente diário, umidade média do solo diária a 15 cm de profundidade e coeficiente de <i>runoff</i> (CR) na BEA (2003 – 2007).	144
Tabela 5.17 – Coeficientes de determinação entre o deflúvio afluente por evento, umidade média do solo antecedente a 15 cm de profundidade e coeficiente de <i>runoff</i> (CR) na BEA (2003 – 2007).	144
TABELA 5.18 – Características das vazões monitoradas na EF1 da BEA em 2007.	146

TABELA 5.19 – Valores médios mensais da precipitação (P), da lâmina escoada (LE) e do coeficiente de <i>runoff</i> (CR), observando-se que os dados de 2003 não incluíram o mês de janeiro e os dados de 2007 são de janeiro a abril.	148
TABELA 5.20 – Síntese anual de 2003 a 2007 da precipitação (P), da lâmina escoada (LE) e do coeficiente de <i>runoff</i> (CR), observando-se que os dados de 2003 não incluíram o mês de janeiro e os dados de 2007 são de janeiro a abril.	148
TABELA 5.21 – Valores mensais da precipitação (P), da lâmina escoada (LE), do coeficiente de <i>runoff</i> (CR) e da produção de sedimentos (SY) na BEA (2003 – 2007).	150
TABELA 5.22 – Dados de síntese hidrológica da BEA e de outras bacias experimentais monitoradas (acima de quatro anos de medição contínua) no rio Jaguaribe, Ceará, em que CR é o coeficiente de <i>runoff</i>	152

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1 – Características físicas e hidrológicas da Bacia Experimental de Aiuaba para o período de 2003 a 2004, fonte: Araújo, J. et al. (2004a) ^(*)	46
--	----

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área da bacia hidráulica
A_{BACIA}	área da bacia
$A_{seção}$	área da seção
C	coeficiente de <i>Chézy</i>
CN	Número de Curva
c_p	calor específico
CR	coeficiente de <i>runoff</i>
D	déficit da pressão de vapor
Dh	altura hidráulica
D_p	densidade real
E	entradas no volume de controle
Ea	evaporação do método aerodinâmico
E_{global}	erro global para o período chuvoso
E_{NS}	coeficiente de eficiência
Eo	lâmina de evaporação
Er	evaporação do balanço de energia
erro _{int}	erro médio em cada intervalo em que ocorreram entradas superficiais ao açude
g	aceleração da gravidade
H_A	altura da coluna d'água no ponto a montante do estrangulamento
H_B	altura da coluna d'água no ponto a jusante do estrangulamento
I	lâmina de infiltração
$I_{máx,30min}$	intensidade máxima em 30 minutos
$I_{máx,5min}$	intensidade máxima em 5 minutos
$I_{média}$	intensidade média
Int	perdas por interceptação

$Int_{diária}$	interceptação medida no passo diário
Int_{evento}	interceptação do evento
k	coeficiente do vertedouro
K_S	condutividade hidráulica saturada
LE	lâmina escoada
n	coeficiente de <i>Manning</i>
N	número total de intervalos
nda	ausência de dados
n_p	porosidade
N_p	intervalos de tempo em que ocorreu precipitação sobre o lago do açude
O	saídas no volume de controle
P	precipitação
$P_{diária}$	precipitação medida no passo diário
P_{evento}	precipitação do evento
$PInt$	porcentagem das perdas por interceptação em relação à precipitação
Pl	precipitação direta sobre o lago
Q	deflúvio
Qa	deflúvio afluente
Qap	pico do deflúvio afluente
Q_{CP}	vazão da calha Parshall
$Q_{CP-Pico}$	vazão de pico da calha Parshall
Qeo	vazão de evaporação
Qi	vazão de infiltração
$Q_{máx}$	vazão máxima observada
Qo	vazão observada
Qpl	vazão de precipitação direta sobre o lago
Qrs	vazão de recarga subterrânea

Q_s	vazão de sangria
Q_{sin}	vazão simulada
Q_u	vazão d uso d'água
r_a^a	resistência aerodinâmica
R_h	raio hidráulico
R_n	radiação líquida absorvida pela superfície da água
R_s	lâmina de recarga subterrânea
S	volume de armazenamento
$SedT$	sedimentos transportados
S_o	declividade
SST	sólidos suspensos totais
ST	sólidos totais
SY	produção de sedimentos
t	tempo
U	lâmina de uso d'água
w	largura do vertedouro
W_{CP}	largura do estrangulamento da calha Parshall
y	lâmina d'água de sangria
α	coeficiente de Coriolis
$\sum E_{EST}$	todas as entradas estimadas ao açude do período chuvoso
$\sum S_{EST}$	todas as saídas estimadas ao açude do período chuvoso
Δ	gradiente da pressão do vapor de saturação
ΔH	diferença da lâmina d'água do reservatório
ΔH_{OBS}	diferença de nível entre a altura do nível d'água do açude no início e no final do período chuvoso
Δx	distância horizontal entre a seções
Δy	diferença da altura d'água entre as seções

γ	constante psicométrica
λ	calor latente de vaporização da água
$\theta_{\text{antecedente}}$	umidade média do solo a 15 cm de profundidade anterior ao evento
ρ_{PA}	densidade do ar
ρ_{β}	massa específica aparente seca
ρ_{ω}	densidade da água
ρ_p	massa específica real da partícula

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	26
1.1 Caracterização do Problema	26
1.2 Objetivos.....	29
2 REVISÃO DA LITERATURA	30
2.1 Fisiografia de Bacias	30
2.2 Processos Hidrológicos	31
2.2.1 <i>Princípios Físicos</i>	31
2.2.2 <i>Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica</i>	32
2.2.3 <i>Eventos Chuva-Deflúvio e Produção de Sedimentos</i>	33
2.3 Síntese Hidrológica de Regiões Semi-Áridas.....	40
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	42
3.1 Localização e Características Gerais	42
3.2 Climatologia e Hidrologia Regionais	47
3.3 Vegetação	51
3.4 Solos	57
3.5 Geologia	60
4 MATERIAL E MÉTODOS	63
4.1 Caracterização da Fisiografia	64
4.2 Medição e Monitoramento	67
4.1.1 <i>Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica</i>	68
4.1.2 <i>Eventos Chuva-Deflúvio</i>	74
4.1.3 <i>Produção de Sedimentos</i>	82
4.1.4 <i>Banco de Dados Hidrológicos e Síntese do Monitoramento</i>	87
4.3 Avaliação de Processos	89
4.3.1 <i>Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica</i>	89
4.3.2 <i>Eventos Chuva-Deflúvio e Produção de Sedimentos</i>	95
4.4 Síntese Hidrológica	97
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	98
5.1 Caracterização da Fisiografia	98
5.2 Medição e Monitoramento	104
5.2.1 <i>Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica</i>	104

5.2.2 <i>Eventos Chuva-Deflúvio</i>	111
5.2.3 <i>Produção de Sedimentos</i>	117
5.3 Avaliação de Processos	120
5.3.1 <i>Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica</i>	120
5.3.2 <i>Eventos Chuva-Deflúvio e Produção de Sedimentos</i>	136
5.4 Síntese Hidrológica	148
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	156
APÊNDICES	164

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do Problema

As regiões semi-áridas cobrem quase um terço da superfície terrestre, e nelas habitam em torno de 20% da população mundial (GAISER et al., 2003).

O Nordeste Brasileiro (NEB) é parte dessas regiões no mundo, na qual as ações antrópicas vêm causando degradação dos recursos naturais e das condições de vida humana, agravando a ocorrência de secas prolongadas (GAISER; FERREIRA; STAHR, 2003).

O NEB contém em seus limites uma área de aproximadamente 950.000 km² chamada de *polígono das secas*, onde vivem cerca de 18 milhões de pessoas ou 11% da população brasileira (IBGE, 2003). A região é um ambiente semi-árido caracterizado por contexto ecológico frágil com alta variabilidade espacial e temporal das chuvas, elevados índices de evaporação, histórico de anos consecutivos secos e grandes enchentes.

Esses aspectos naturais associados ao cultivo e pastoreio excessivo, desmatamento desenfreado e uso de técnicas inadequadas de manejo dos solos e das águas fazem com que em regiões ocorram perdas de safras agrícolas (CEARÁ, 2005) e, de acordo com Freire e Pacheco (2005), perda de fertilidade do solo, da biodiversidade, destruição de *habitats* naturais e, conseqüentemente, desproteção do solo e erosão hídrica superficial, iniciando-se, assim, o processo de desertificação em áreas semi-áridas.

Também, devido à erosão hídrica, a taxa de produção de sedimentos de bacias hidrográficas eleva-se, promovendo gradativa redução da disponibilidade das águas armazenadas nos reservatórios superficiais, a principal fonte hídrica do semi-árido do NEB (ARAÚJO, J.; GÜNTNER; BRONSTERT, 2006).

Dessa forma, já se prevê, em decorrência de mudanças climáticas, possíveis cenários de crises ambientais, econômicas e sociais nas próximas décadas para regiões do semi-árido do NEB, em especial para o Ceará, como apresentado por Krol, Jaeger e Bronstert (2003), Araújo, J. et al. (2004b) e Bronstert et al. (2005).

Recentemente, a principal cobertura vegetal do semi-árido nordestino, a caatinga, foi reconhecida como uma das 37 grandes regiões naturais do planeta, conforme estudo coordenado pela *Conservation International* (TABARELLI; SILVA, 2003 apud LEMOS, 2006).

De acordo com Lemos (2006), grandes regiões naturais são ecossistemas que ainda abrigam, pelo menos, 70% de sua cobertura vegetal original, ocupando áreas superiores a 100.000 km². Segundo Gil (2002 apud LEMOS, 2006) esse ecossistema é considerado estratégico nos estudos das grandes mudanças globais.

Nesse contexto, este trabalho se baseou na seguinte questão científica:

- Como se caracterizam os principais processos hidrológicos, considerando-se também a produção de sedimentos, de uma bacia em área de caatinga preservada?

Responder essa questão se insere no desafio atual de promover informação e instrumentos para avaliação conjunta da disponibilidade hídrica e da produção de sedimentos em bacias hidrográficas de regiões semi-áridas e se justifica, principalmente, em relação às seguintes questões:

- (i) Aperfeiçoamento da qualidade de séries hidrometeorológicas em zonas semi-áridas, para o refinamento de modelos hidrológicos, e assim seguir para predição do impacto futuro de mudanças ambientais naturais e antropogênicas em sistemas hidrológicos (VALLET-COULOMB et al., 2001).
- (ii) Levantamentos de dados do presente clima, assim como estudos de longo tempo de monitoramento, para estudos de possíveis mudanças climáticas (CANTÓN et al., 2001).
- (iii) Monitoramento continuado e experimentação do deflúvio e dos processos de erosão do solo em diferentes escalas em áreas dominadas por eventos hidrológicos extremos (POESEN; HOOKE, 1997 apud CANTÓN et al., 2001).
- (iv) Monitoramento de dados hidrológicos para entendimento de processos hidrológicos e, portanto, para a avaliação de impactos (AMATYA et al., 2003 apud MUNGABE; HODNETT; SENZANJE, 2007).

- (v) Estudos hidrológicos em áreas de preservação ambiental para que seus parâmetros sejam referência para outras situações de uso, particularmente no contexto do semi-árido (RIGHETTO et al., 2004b).
- (vi) Ligação entre o entendimento dos processos hidrológicos em pequenas (<10 km²) bacias de pesquisas e as necessidades dos gerenciadores da água, que requerem entendimento funcional de sistemas hidrológicos em meso-escala (>100-1000 km²) (SOULSBY et al., 2004).
- (vii) Possibilidade de extensão e validação do modelo hidrológico para regiões semi-áridas (*WASA - Water Availability in Semi-Arid Enviroments*) como pré-requisito para futuro aperfeiçoamento (GÜNTNER, 2002; GÜNTNER; BRONSTERT, 2003; GÜNTNER; BRONSTERT, 2004).

Esse trabalho é parte integrante dos projetos de pesquisas *SESAM (Sediment Export from large Semi-Arid Catchments: Measurement and Modelling)* (MÜLLER et al., 2005; MÜLLER et al. 2006) e *PROSED (Produção de Sedimentos de Pequenas Bacias sob Diferentes Contextos Geoambientais)*. Para mais informações sobre o projeto *SESAM*, referir-se a <http://brandenburg.geoecology.uni-potsdam.de/projekte/sesam/index.php>.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é quantificar e avaliar os principais processos hidrológicos, incluindo a produção de sedimentos, na Bacia Experimental de Aiuaba – BEA, para o período de 2003-2007.

Os objetivos específicos são:

1. **Caracterizar** a fisiografia da BEA, determinando a área da bacia hidrográfica e o traçado da rede de drenagem, incluindo determinação de parâmetros fisiográficos clássicos, como também levantamento das principais características de seções dos riachos principais.
2. **Medir** e monitorar as principais variáveis hidrológicas envolvidas nos processos de trocas hídricas na bacia hidráulica, de eventos chuva-deflúvio e de produção de sedimentos da bacia hidrográfica.
3. **Avaliar** os processos de trocas hídricas na bacia hidráulica, de eventos chuva-deflúvio e de produção de sedimentos na bacia hidrográfica da BEA.
4. **Sintetizar** a hidrologia da BEA para o período de 2003-2007, em termos de escoamento superficial, de precipitação e da produção de sedimentos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fisiografia de Bacias

De acordo com Villela e Mattos (1975), existe uma estreita correspondência entre o regime hidrológico e as características físicas ou a fisiografia de uma bacia, sendo, portanto de grande utilidade prática o conhecimento destes elementos, pois, ao estabelecerem-se relações e comparações entre eles e dados hidrológicos, podem-se determinar indiretamente os valores hidrológicos de outras áreas.

Villela e Mattos (1975), Silveira (1993) e Araújo, J. et al. (2004a) apontam a área de drenagem, a forma superficial da bacia, o sistema de drenagem e as características do relevo como os elementos principais da fisiografia de uma bacia para o conhecimento de sua hidrologia superficial.

Segundo Villela e Mattos (1975), a forma superficial da bacia possui estreita relação com o seu tempo de concentração, tendo uma grande variabilidade para as pequenas bacias, dependendo principalmente da estrutura geológica do terreno.

Também, as ramificações e as propriedades físicas (comprimento, declividades e sinuosidade) dos principais rios da rede de drenagem são importantes indicadores da velocidade em que água deixa a bacia. Segundo Harrelson, Rawlins e Potyondy (1994), o perfil de seções, como a análise do material que compõem o canal do rio, são também dados relevantes para a caracterização desta rede de drenagem.

Em relação ao relevo de uma bacia, Villela e Mattos (1975) citam que o método das quadrículas é uma forma eficiente de se obter a declividade média e a curva hipsométrica da bacia, uma forma de representar graficamente o relevo médio da bacia.

Muito desses parâmetros podem ser estimados diretamente de mapas planialtimétricos ou automaticamente por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) acoplado a rotinas matemáticas, por exemplo, tendo como base arquivos digitais da rede de drenagem e do Modelo Numérico do Terreno (MNT) (LEÃO et al., 2004; COSTA, C. et al., 2007).

2.2 Processos Hidrológicos

2.2.1 Princípios Físicos

Neste item, faz-se um resumo dos conceitos físicos gerais para os principais processos hidrológicos apresentados por Chow, Maidment e Mays (1988).

Um consistente mecanismo necessário para desenvolvimento de modelos hidrológicos é provido pelo *Teorema de Transporte de Reynolds*, também chamada de *equação geral do volume de controle*.

O *Teorema de Transporte de Reynolds* emprega leis físicas que são normalmente aplicadas em uma massa discreta de uma substância e aplica essas leis para um fluido escoando continuamente através de um volume de controle.

Dessa forma, o *Teorema* sintetiza em uma única formulação matemática para fluidos newtonianos as seguintes leis físicas: conservação da massa ou continuidade, conservação dos momentos ou 2º lei de Newton e conservação da energia ou 3º lei da termodinâmica.

Utilizando-se do *Teorema de Transporte de Reynolds* e da conservação da massa, considerando-se um volume de controle em que a água possui densidade constante, chega-se a uma equação amplamente aplicada em estudos hidrológicos, chamada de balanço hídrico:

$$\frac{dS}{dt} = E(t) - O(t) \quad (2.1)$$

em que dS/dt é a taxa de mudança do volume de armazenamento (S) no tempo (t); E(t) são as entradas no volume de controle; e O(t) as saídas.

Tendo como base fundamental o *Teorema* citado, utilizaram-se também outras formulações físicas e empíricas e propriedades físicas do meio, para tratar de escoamento em canais abertos e em meio poroso, balanço de energia e processos de transporte.

2.2.2 Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica

Quando se pretende estimar um componente das trocas hídricas da bacia hidráulica, seja de entrada ou de saída, utiliza-se a equação do balanço hídrico (MOLLE, 1989; CAMPOS, 1996; VALLET-COULOMB et al., 2001; MOTZ; SOUZA; ANNABLE, 2001; ARAÚJO, J. et al., 2004a). Algumas vezes a referida equação é acoplada a balanços de mistura de concentrações químicas (MOLLE, 1989; VALLET-COULOMB et al., 2001) ou de métodos de análise isotópica (SANTIAGO, 1984; MOTZ; SOUZA; ANNABLE, 2001).

Então, durante eventos chuva-deflúvio em bacias hidrográficas controladas nos seus exutórios por reservatórios superficiais, o deflúvio total gerado na bacia hidrográfica pode ser acessado através da aplicação do balanço hídrico na bacia hidráulica (ver em ARAÚJO, J. et al., 2004a).

Baseando-se em Molle (1989) e Araújo, J. et al. (2004a), os componentes de entrada do balanço hídrico em uma bacia hidráulica são: precipitação direta sobre o lago, deflúvio direto afluente e recarga subterrânea, e os componentes de saída seriam: evaporação direta do lago, infiltração, uso d'água e vertimento (ou sangria).

A variação do volume no tempo e a precipitação são comumente estimadas através de medidas diretas do nível d'água do reservatório e da lâmina d'água precipitada em estações hidrológicas. Além disso, utilizam-se também as relações área-volume-profundidade para transformação de grandezas volumétricas em lâminas, e vice-versa (ver em VALLET-COULOMB et al., 2001; MOTZ; SOUZA; ANNABLE, 2001; ARAÚJO, J. et al., 2004a).

A evaporação do reservatório pode ser aproximada por meio da evaporação medida em tanque evaporimétrico, sendo recomendado a sua utilização para passos mensais (SHUTTLEWORTH, 1993), devido às diferenças físicas entre o tanque e os reservatórios reais (inércia térmica, tamanho, turbidez, salinidade, albedo e existência de microclima) (MOLLE, 1989). Campos (1996) e Motz, Souza e Annable (2001) utilizaram tanque evaporimétrico para estimativa da evaporação aos passos anuais e mensais, respectivamente.

Também utiliza-se o método do balanço de energia, o princípio aerodinâmico e o método combinado ou método de Penman para estimativas em diversos passos de tempo da evaporação em lagos a partir de dados meteorológicos (radiação incidente, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento) (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; SHUTTLEWORTH, 1993; ALLEN et al., 1998; VALLET-COULOMB et al., 2001; GÜNTNER, 2002; COSTA, A., 2006b).

As trocas hídricas subterrâneas, sejam recarga subterrânea ou infiltração, podem ser aproximadas indiretamente por meio da aplicação do balanço de mistura de concentrações químicas (MOLLE, 1989; VALLET-COULOMB et al., 2001) ou por meio de métodos de análise isotópica (SANTIAGO, 1984; MOTZ; SOUZA; ANNABLE, 2001).

Campos (1996), para estimativa da vazão de regularização de açudes no Nordeste, não levou em conta o balanço líquido entre a recarga subterrânea e a infiltração. No entanto, Molle (1989) observou perdas por infiltração na ordem 10% dos volumes evaporados em três reservatórios de aproximadamente um milhão de m³, quando se considera a evaporação estimada a partir de tanque classe A como igual ao do reservatório. O autor observou também infiltração média como responsável por 30% do rebaixamento de nove açudes (variando de 1,3 a 0,03 milhões de m³) quando se utiliza o balanço das concentrações químicas.

Esse fato deve-se, principalmente, à infiltração na bacia hidráulica, que pode se dar através de intercâmbios com lençóis freáticos situados nas encostas da bacia e no leito do riacho barrado, por baixo da parede da represa e/ou através da parede do açude (MOLLE, 1989).

Deve-se lembrar que o valor do componente procurado ou residual estimado do balanço hídrico contém uma incerteza que reflete os erros ou incertezas dos outros componentes do balanço hídrico, como mostrado por Motz, Souza e Annable (2001) na estimativa da infiltração vertical de um lago na Florida (EUA).

2.2.3 Eventos Chuva-Deflúvio e Produção de Sedimentos

Há certo tempo vem sendo reconhecido que a bacia hidrográfica é um sistema excessivamente complexo, e que uma gota d'água pode seguir em um elevado número de caminhos entre a

precipitação e a superfície. Essas incertezas dificultam a modelagem de processos como, por exemplo, vazão nos rios ou evapotranspiração (WOOLHISER, 1982).

Na Figura 2.1 são apresentados processos hidrológicos durante um evento chuvoso em uma porção de uma bacia hidrográfica, em que pode ocorrer: precipitação, interceptação, evaporação, evapotranspiração, infiltração, percolação, escoamento de água subterrânea, escoamento superficial, escoamento subsuperficial, armazenamento superficial, detenção superficial e precipitação direta sobre o canal (HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993).

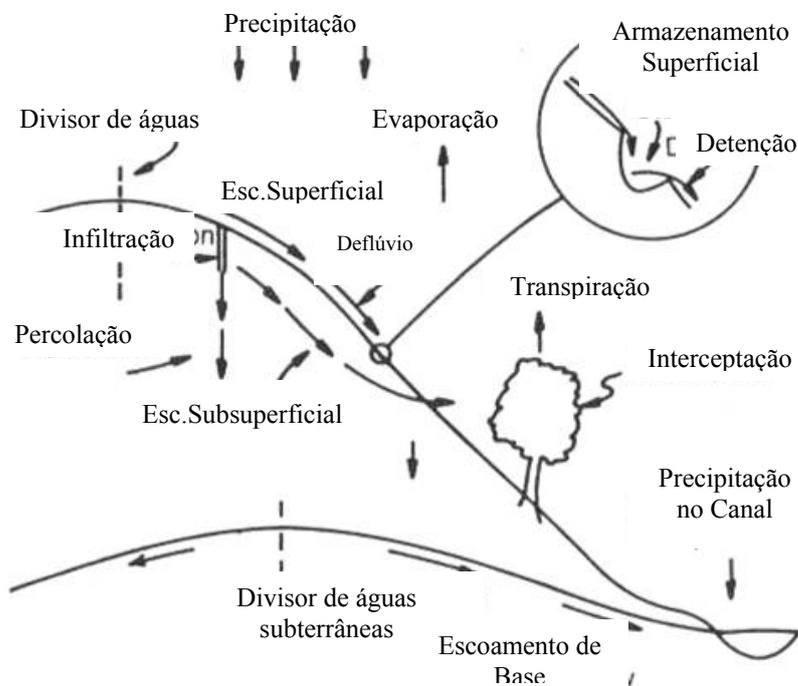


FIGURA 2.1 – Diagrama hidrológico de um evento chuvoso em uma porção de uma bacia hidrográfica, fonte: Haan, Barfield e Hayes, 1993.

Todos esses processos possuem um papel central na hidrologia. Contudo, a precipitação, a infiltração, o escoamento superficial, o armazenamento superficial, a detenção superficial e o deflúvio dos rios são os de maior importância na hidrologia, considerando-se a centralidade do processo chuva-deflúvio (HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993).

A tradicional explicação para geração de deflúvio em eventos chuvosos se encontra no conceito de escoamento superficial de Horton (1933) apud Chow, Maidment e Mays (1988), também chamado de escoamento superficial *hortoniano*, como apresentado em ASCE (1957).

De acordo com Horton, quando a intensidade da chuva (i) é menor que a capacidade de infiltração do solo (f) toda a água é absorvida pelo solo e não há escoamento superficial, caso contrário o escoamento superficial (*hortoniano*) ocorre a uma taxa de $(i - f)$.

Chorley (1979) explica que o escoamento superficial *hortoniano* é a origem do pico do hidrograma em rios, como também o motor da erosão hídrica superficial.

Entretanto, Sklash, Farvolden e Fritz (1976), Merot, Durand e Morisson (1995), Mortatti et al. (1997), Ladouche et al. (2001), Tardy, Bustillo e Boeglin (2004) mostraram em diversas bacias hidrográficas, por meio de traçadores naturais, que a maior parcela do deflúvio gerado nos seus exutórios em eventos chuva-deflúvio é de água armazenada na bacia (zonas não-saturadas e saturadas) anterior ao evento.

No entanto, Turner et al. (1992 apud CLARK; FRITZ 1997) mostraram que a contribuição ao deflúvio da água armazenada na bacia anterior ao evento foi de apenas 25% em bacias hidrográficas em regiões semi-áridas no Oeste australiano.

Então, para eventos chuva-deflúvio em regiões semi-áridas espera-se a predominância do escoamento superficial *hortoniano* e, se for o caso, do escoamento subsuperficial em caminhos preferências do terreno, pois ambos possuem estreita relação com a contribuição da água do próprio evento chuvoso. Cantón et al. (2001), Srinivasan, Santos e Galvão (2003) e Mungabe, Hodnett e Senzanje (2007) observaram a predominância de escoamento superficial *hortoniano*, em suas respectivas áreas de estudo, todas no semi-árido.

Conceitualmente, baseando-se no esquema de Sklash, Farvolden e Fritz (1976), as fontes de maior predominância em eventos chuva-deflúvio estão descritas na Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Fontes de maior predominância na geração de deflúvio em eventos chuva-deflúvio, baseado em: ASCE (1957), Gray (1973), Sklash, Farvolden e Fritz (1976) e Chow, Maidment e Mays. (1988).

Fonte Temporal	Fonte Espacial	Fonte por Mecanismo de Escoamento
<i>Evento</i>	<i>Deflúvio Superficial</i>	<i>Escoamento Superficial Hortoniano</i>
<i>Pré-Evento</i>	<i>Deflúvio Subsuperficial ou</i>	<i>Escoamento Superficial por Saturação</i>
	<i>Escoamento de Base*</i>	<i>Subsuperficial</i>
	<i>Precipitação Direta no Canal</i>	<i>Escoamento Subsuperficial</i>
		<i>Escoamento da Água Subterrânea</i>
		<i>Precipitação Direta no Canal</i>

*Nesse trabalho, adotou-se como escoamento de base todo o deflúvio' subsuperficial, incluindo o escoamento da água subterrânea e o escoamento subsuperficial (zona não-saturada do solo).

As fontes temporais do deflúvio podem ser definidas como: *evento* e *pré-evento*. O *evento* (em inglês *event* ou *storm water*) se refere à parte do processo chuva-deflúvio que é adicionado à bacia por uma chuva particular (SKLASH; FARVOLDEN; FRITZ, 1976). O *pré-evento* (*pre-event* ou *prestorm water*) descreve toda a água presente na bacia antes de uma chuva particular (SKLASH; FARVOLDEN; FRITZ, 1976).

As fontes espaciais do deflúvio podem ser definidas como: *deflúvio superficial*, *deflúvio subsuperficial* e *precipitação direta no canal* do rio. O *deflúvio superficial* (*surface runoff*) é a maior parte do movimento direto da água imediatamente acima da superfície do solo para a área do canal do rio (ASCE, 1957).

O *deflúvio subsuperficial* (*subsurface runoff*) responde pela maior parte do movimento direto da água abaixo da superfície do solo para área do canal do rio, também chamado de escoamento de base (*base flow*). A *precipitação direta no canal* (*channel precipitation*) é a precipitação que cai diretamente sobre a superfície dos corpos hídricos (GRAY, 1973).

As fontes por mecanismos do deflúvio podem ser aproximadas como: *escoamento superficial hortoniano* (já mencionado), *escoamento superficial por saturação subsuperficial*, *escoamento subsuperficial*, *escoamento da água subterrânea* e *precipitação direta no canal*.

O escoamento superficial por saturação subsuperficial (*saturation overland flow* ou *Partial area overland flow*) é produzido quando o deflúvio subsuperficial ou a percolação da água satura o solo perto da superfície inferior de um declive ou de bancos de areia de rios ocorrendo, depois, o escoamento superficial (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

O escoamento superficial por saturação subsuperficial do solo difere do escoamento superficial hortoniano. No primeiro caso ocorre infiltração até a saturação do solo atingindo as camadas mais superficiais, causando o escoamento superficial (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). O escoamento por saturação subsuperficial pode ser um componente dinâmico, uma mistura complexa da precipitação direta sobre áreas parciais, também da vazão do escoamento subsuperficial e da água subterrânea perto dessas áreas parciais (SKLASH; FARVOLDEN; FRITZ, 1976).

O escoamento subsuperficial (*subsurface flow* ou *interflow*) é a água infiltrada na superfície do solo e que se move lateralmente através das camadas superficiais do solo até o retorno à superfície em algum ponto de declive (*return flow*), para então escoar até os rios como deflúvio superficial, ou ser interceptado pelo próprio canal do rio; esta água não se torna parte do sistema do escoamento da água subterrânea (GRAY, 1973).

Segundo Moseley (1979 apud CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988), caminhos preferenciais do solo podem ocorrer em solos florestados, onde o escoamento subsuperficial pode ser muito mais rápido do que em massas de solos adjacentes.

O escoamento da água subterrânea (*groundwater flow*) é o escoamento que ocorre abaixo da superfície da água subterrânea, acontecendo nas camadas mais profundas do solo ou em rochas estratificadas (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). O mecanismo de precipitação direta no canal possui igual descrição como fonte espacial.

A erosão hídrica do solo resulta quando o solo é exposto por “forças” erosivas da energia da precipitação e do escoamento da água (HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993).

Segundo Meyer e Wischmeier (1969 apud HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993) a erosão do solo envolve destacamento, transporte e subsequente deposição. Haan, Barfield e Hayes (1993) descrevem resumidamente o processo da erosão hídrica conforme na Figura 2.2.

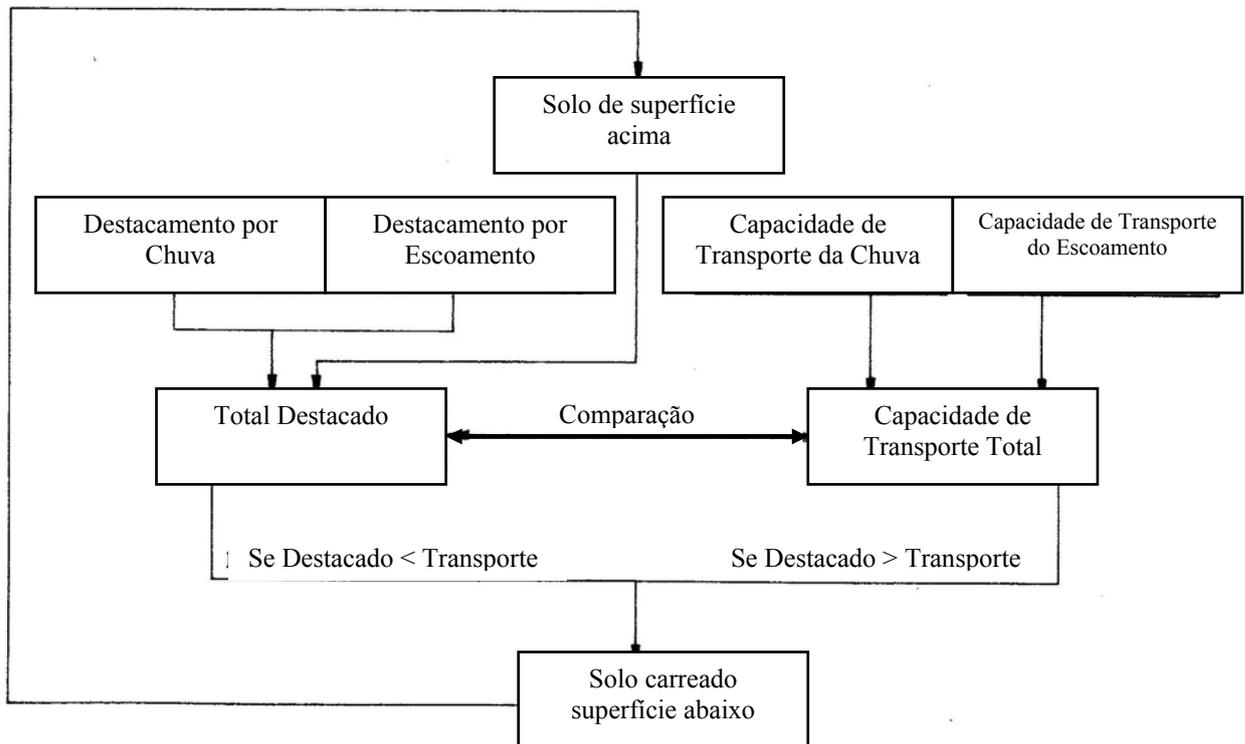


FIGURA 2.2 – Inter-relação do destacamento, transporte e deposição do sedimento, adaptado de Meyer e Wischmeier (1969 apud HAAN; BARFIELD; HAYES 1993).

O sedimento erodido é produzido pelo destacamento do solo devido à energia de impacto das gotas d'água da chuva e à força de cisalhamento do escoamento da água.

O solo mobilizado pode ser carregado superfície abaixo, dependendo da capacidade de transporte do escoamento da água e, em menor proporção, do impacto das gotas d'água da chuva (ver Figura 2.2.). O material não carregado fica depositado em encostas ou na rede de drenagem.

Baseando-se em Haan, Barfield e Hayes (1993), a erosão em encostas pode ocorrer nas seguintes situações: em pequenos canais erosivos (*rills*), laminar entre canais (*interrills*), em canais erosivos maiores e bem definidos (*gullies*), podendo ser efêmeros ou permanentes. Esses casos podem ocorrer em várias áreas da bacia hidrográfica, de forma dinâmica com combinação e/ou evolução dessas situações.

No caso de um sistema fluvial pode-se, basicamente, dividir a produção de sedimentos em três zonas: produção, transferência e deposição de sedimentos, considerando os processos mais relevantes (ver Figura 2.3).

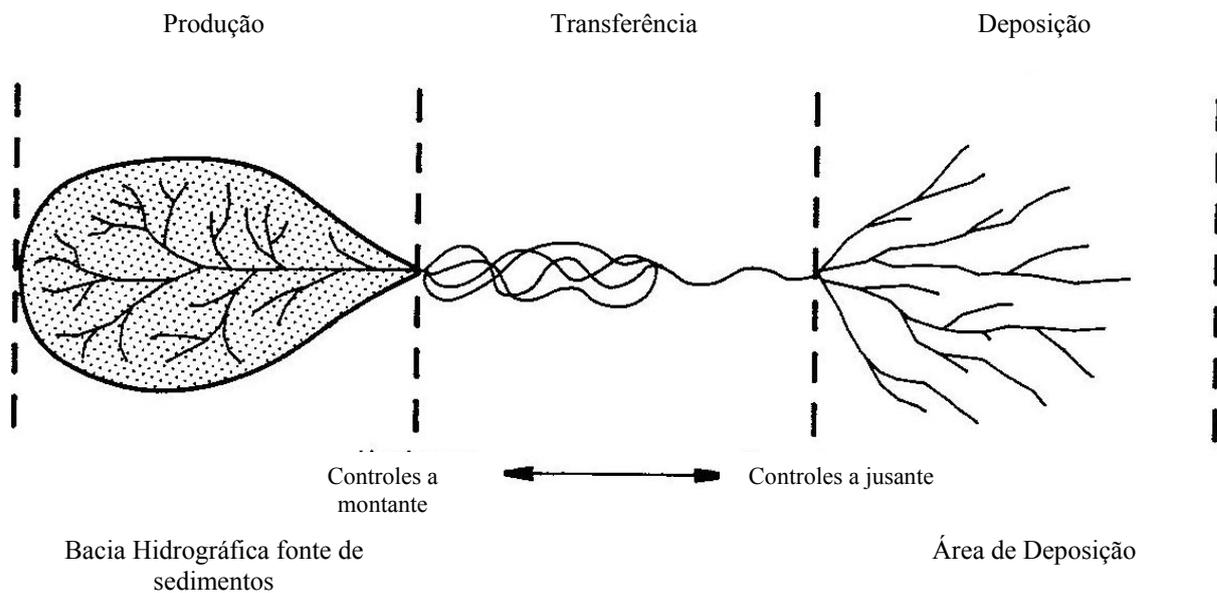


FIGURA 2.3 – Um sistema fluvial idealizado, adaptado de: Schumm (1977 apud HAAN; BARFIELD; HAYES 1993).

De acordo com dados experimentais de microbacias e parcelas mostradas por Srinivasan, Santos e Galvão (2003), a cobertura vegetal e/ou manejo dos solos e a declividade do terreno são fatores de grande influência na erosão hídrica dos solos.

A identificação dos processos hidrológicos mais relevantes no processo chuva-deflúvio e na produção de sedimentos requer métodos e parâmetros de inferência. Baseando-se em Chow, Maidment e Mays (1988), Haan, Barfield e Hayes (1993), Cantón et al. (2001), Knighton e Nanson (2001), Güntner (2002), Srinivasan, Santos e Galvão (2003), Araújo, J. et al. (2004a), Chella et al. (2005), Mishra et al. (2006) e Mungabe, Hodnett e Senzanje (2007) podem-se listar os seguintes métodos e parâmetros com esse fim.

1. Relações chuva-deflúvio:

- Tipologia de eventos chuva-deflúvio (eventos isolados, eventos múltiplos e eventos compostos).
- Coeficiente de *runoff* (ou de deflúvio ou de escoamento superficial, neste trabalho adotou-se o termo em inglês).
- Hietograma *versus* hidrograma de rios.
- Precipitação *versus* intensidade média.
- Precipitação *versus* intensidade máxima.

- Precipitação *versus* deflúvio.
- Pico do deflúvio *versus* intensidade máxima de chuva.
- Pico do deflúvio *versus* volume total do evento.
- Pico do deflúvio *versus* deflúvio.
- Condição antecedente de umidade do solo *versus* coeficiente de *runoff*.
- Condição antecedente de umidade do solo *versus* Número de Curva (modelo SCS).

2. Relações chuva-deflúvio e produção de sedimentos:

- Todas as relações citadas no item acima.
- Intensidade crítica de chuva (de 30 minutos, por exemplo) *versus* produção de sedimentos.
- Pico do deflúvio *versus* produção de sedimentos.
- Deflúvio *versus* produção de sedimentos.

2.3 Síntese Hidrológica de Regiões Semi-Áridas

Segundo Knighton e Nanson (2001), sínteses hidrológicas regionais são úteis quando há problemas causados por baixa densidade de estações e quando se deseja otimizar o uso de registros disponíveis, sendo uma informação fundamental para a gestão e o planejamento dos recursos hídricos.

Boa parte do conhecimento da hidrologia do semi-árido nordestino foi construída tendo como base sínteses hidrológicas realizadas por Aguiar (1939); SUDENE (1967 apud CADIER, 1994) e Cadier (1994: bacias experimentais e representativas feitas pela SUDENE de 1970 a 1990).

A partir de 1980 os grupos de pesquisa de universidades se tornam principais elaboradores de sínteses hidrológicas do nordeste (RIGHETTO, 2004a; CADIER, 1994). Destacam-se, nesse novo contexto, o projeto de pesquisa Implementação de Bacias Experimentais do Semi-árido (IBESA) coordenado por uma rede de universidades e instituições de pesquisa do semi-árido (RIGHETTO, 2004a).

Vários autores levantaram dados de monitoramento contínuo de bacias hidrográficas do semi-árido que devidamente tratados e sistematizados se tornaram sínteses hidrológicas dessas regiões:

- SUDENE, GEVJ (1967 apud CADIER, 1994) apresentam precipitação e lâmina escoada mensalmente e características de cheias durante três anos de monitoramento em bacias hidrográficas no Vale do Jaguaribe, Ceará.
- Cadier (1994) apresentou sínteses hidrológicas de diversas bacias do semi-árido nordestino, com avaliação de processos chuva-deflúvio em várias escalas e modelagem da lâmina escoada superficialmente.
- Cantón et al. (2001) apresentaram sínteses de microbacias no semi-árido espanhol com avaliação de processos chuva-deflúvio e produção de sedimentos.
- Knighton e Nanson (2001) apresentaram deflúvios médios anuais e seus coeficientes de variação de bacias hidrográficas de larga-escala no semi-árido australiano.
- Righetto (2004a) mostra estudos hidrológicos em várias bacias experimentais do semi-árido nordestino, depois de três anos do projeto IBESA.
- Mungabe, Hodnett e Senzanje (2007) apresentaram distribuição mensal e anual, e acumulado mensal de precipitação e de deflúvio de bacias experimentais. Também, mostraram o deflúvio contínuo diário e a precipitação mensal e anual *versus* o deflúvio mensal e anual, respectivamente.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Neste tópico, abordam-se as características hidroclimatológicas e geoambientais da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA): localização e características gerais, climatologia e hidrologia regionais, vegetação, solos e geologia.

3.1 Localização e Características Gerais

A Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) faz parte da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe (Figura 3.1), na região do Estado do Ceará denominada de *Inhamuns*. A BEA, considerando-se o sistema de coordenadas *UTM* (Zona 24S, SAD-69 *datum*), está entre as coordenadas 9.260.000 m - 9.255.000 m e 355.000 m - 361.000 m.

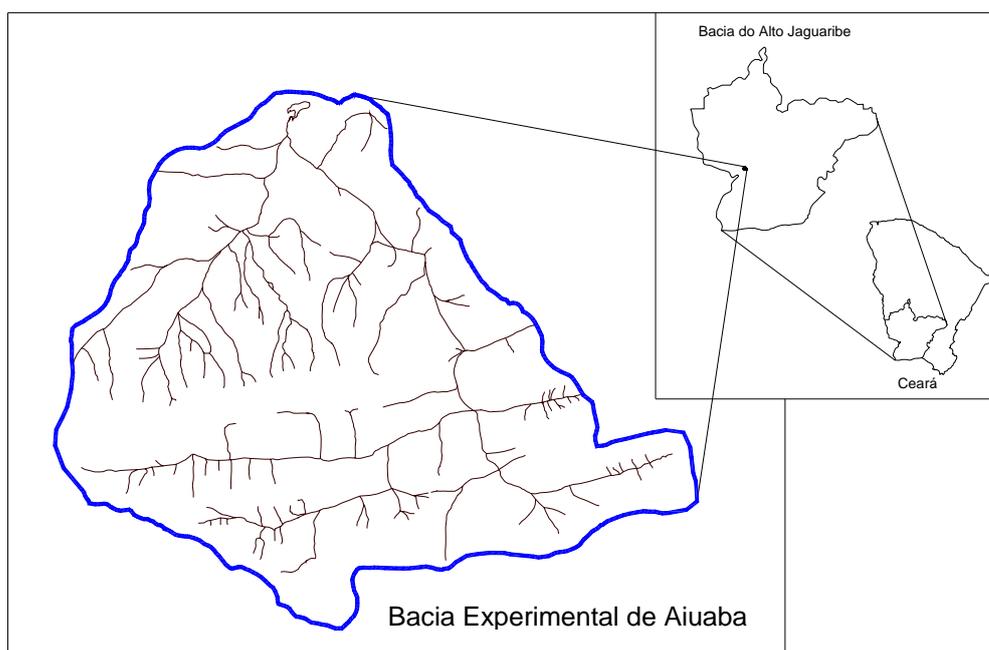


FIGURA 3.1 – Localização da Bacia Experimental de Aiuaba em relação à Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, fonte: Araújo, J. et al., 2004a.

A BEA está totalmente inserida no município de Aiuaba, localizando-se no setor sudoeste da Estação Ecológica deste município (ESEC de Aiuaba) (ver Figura 3.2). Estabelecida em 1978, a ESEC de Aiuaba está associada à manutenção da biodiversidade florística e faunística do bioma caatinga e representa um importante papel para o ciclo hidrológico da região devido,

principalmente, a sua cobertura florestal densa (ARAÚJO, J. et al., 2004a). Para descrição mais detalhada da ESEC de Aiuaba e de seu entorno, referir-se a Belo (2007).

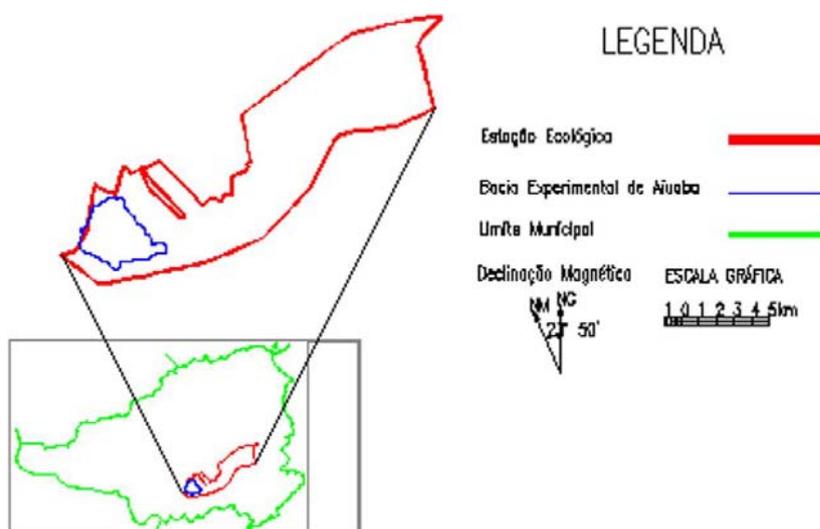


FIGURA 3.2 – Localização da Bacia Experimental de Aiuaba em relação à Estação Ecológica e ao município de Aiuaba.

A BEA possui uma área de 12,05 km² (ver capítulo 5.1) e rede de drenagem composta por riachos intermitentes, com dois riachos principais. O exutório é controlado por um pequeno reservatório ou açude, chamado de Boqueirão, com capacidade máxima de 59.700 m³, área da bacia hidráulica máxima de 7,12 ha e nível d'água máximo de 4,536 m, sendo o uso d'água basicamente para dessedentação de animais com o valor estimado de 1,0 m³ por dia (ARAÚJO, J. et al., 2004a).

Na Figura 3.3 é mostrada uma visão geral do açude Boqueirão, e nas Figuras 3.4 e 3.5 são apresentadas as relações nível d'água *versus* área inundada e nível d'água *versus* volume de acumulação.



FIGURA 3.3 – Visão geral do açude Boqueirão, exutório da BEA, no momento de coleta de dados de nível d'água do limnógrafo de bóia na torre tranqüilizadora das águas. Data: 29-03-2004.

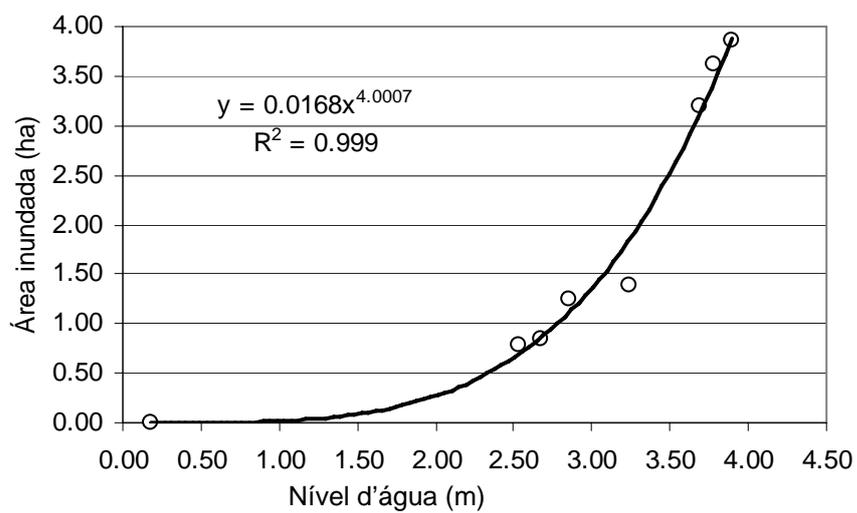


FIGURA 3.4 – Relação entre o nível d'água e a área inundada no açude Boqueirão, fonte: Araújo, J. et al., 2004a.

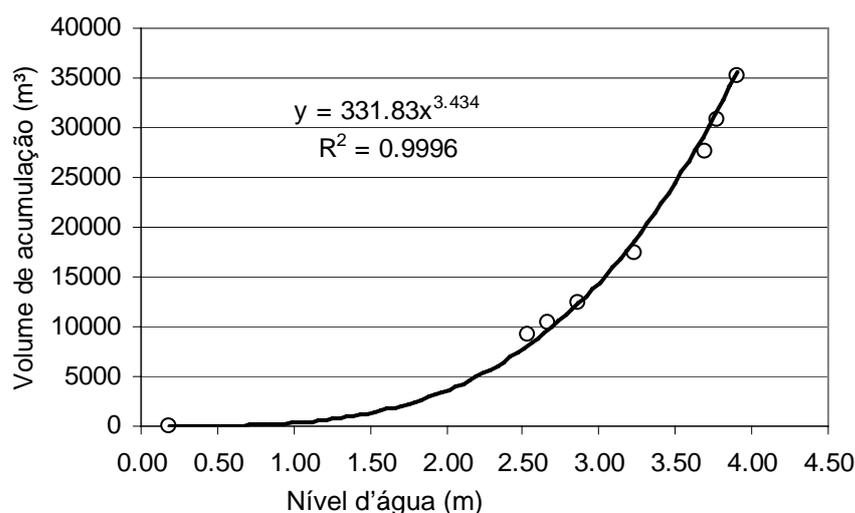


FIGURA 3.5 – Relação entre o nível d'água e o volume de acumulação no açude Boqueirão, fonte: Araújo, J. et al., 2004a.

O gráfico de área inundada *versus* nível d'água foi obtido através de sucessivas campanhas para determinação do contorno do lago, com auxílio de GPS. A área medida foi associada ao nível da água no momento da medição. Após as sete campanhas foi determinada, por regressão, a relação do nível d'água *versus* área. A relação entre nível d'água e volume de acumulação foi determinada pela integração da área em função da altura (ARAÚJO, J. et al., 2004a).

No Quadro 3.1. são apresentadas as principais características físicas e hidrológicas resultantes dos trabalhos realizados no período de 2002 a 2004 em Araújo, J. et al. (2004a), compreendendo os anos hidrológicos de 2003 e 2004. Na Figura 3.6 é apresentada a curva hipsométrica da BEA.

QUADRO 3.1 – Características físicas e hidrológicas da Bacia Experimental de Aiuaba para o período de 2003 a 2004, fonte: Araújo, J. et al. (2004a)^(*).

Característica	Valor	Unidade
Localização (coordenadas do exutório)	6°42'S - 40°17'W	(-)
Área	11,53	km ²
Perímetro	15,22	km
Cotas (mínima e máxima)	530 - 670	m
Declividade média	19,4	%
Comprimento do rio principal	6,08	km
Declividade do rio principal	18,09	m/km
Coefficiente de compacidade	1,26	(-)
Tempo de concentração	1,1	h
Densidade de drenagem	4,4	km/km ²
Comprimento de drenagem	46,53	km
Comprimento de rampa	124	m
Capacidade de acumulação do açude Boqueirão	59.700	m ³
Área da bacia hidráulica do açude Boqueirão	7,12	ha
Coefficiente de abertura α ($V=\alpha.h^3$)	620	(-)
Precipitação média	565,2	mm/ano
Evaporação média no lago	1.930,6	mm/ano
Coefficiente de escoamento superficial	3,0	%
Produção de sedimentos	2,39	ton.km ⁻² .ano ⁻¹
Erosividade média anual	5.460	MJ.mm.ha ⁻¹ .h ⁻¹
Erodibilidade média da bacia	0,035	ton.h.MJ ⁻¹ .mm ⁻¹

(*) Houve correção da área, do perímetro, do comprimento e declividade do rio principal, coeficiente de compacidade, comprimento e densidade da rede de drenagem da BEA no âmbito dessa pesquisa, ver capítulo 5.1.

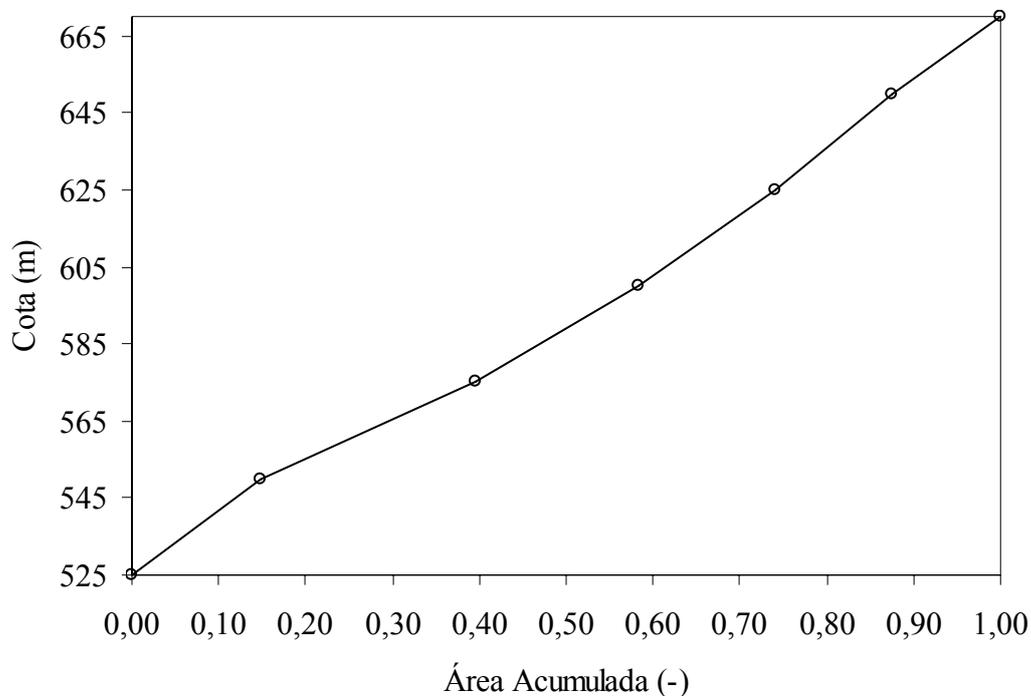


FIGURA 3.6 – Curva Hipsométrica da Bacia Experimental de Aiuaba, fonte: Araújo, J. et al. (2004a).

Esses resultados iniciais foram fundamentais para uma primeira aproximação das características hidrológicas superficiais da BEA. No entanto, já se observaram imperfeições na fisiografia, em termos de delimitação da área da bacia e do traçado da rede de drenagem.

Dessa forma realizou-se, nesta pesquisa, uma nova delimitação da bacia e um novo traçado da rede de drenagem, com levantamento também de características das seções dos principais riachos (ver tópicos 1.2, 4.1 e 5.1), para então se ter uma nova fisiografia da Bacia.

Em relação à água subterrânea, não há ainda na BEA dados consistentes. Contudo, no entorno da bacia existem três poços: um poço tubular instalado em aquífero fissural com capacidade de 18.000 L/h (localização no sistema *UTM* em E 356644 m; N 9259904 m), uma cacimba da ESEC de Aiuaba desativada devido à presença de água salobra (localização no sistema *UTM* em E 356254 m; N 9260099 m) e um outro que foi escavado diretamente no solo, funcionando também como um pequeno reservatório superficial (localização no sistema em *UTM* E 356238 m; N 9260243 m) (ver Figura 3.7).



(A) “Poço” escavado diretamente no solo, funcionando também como reservatório superficial. (B) Cacimba da ESEC de Aiuaba.

FIGURA 3.7 – Poços no entorno da Bacia Experimental de Aiuaba, data: 10/05/2007. Foto do autor.

3.2 Climatologia e Hidrologia Regionais

No Nordeste Brasileiro, o ciclo anual das chuvas e os períodos secos são controlados por uma circulação de larga-escala (WERNER; GERSTENGARBE, 2003), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) do Atlântico Norte que, segundo Xavier (2001), é a faixa correspondente

à convergência dos ventos tropicais (“alíseos” ou *trade winds*) do hemisfério norte, os quais sopram de nordeste.

A posição da ZCIT, influenciada pela Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e por eventos *El Niño* e *La Niña* (XAVIER, 2001; WERNER; GERSTENGARBE, 2003), determina as estações chuvosa e seca no Ceará. No estado, segundo Xavier (2001), o quadrimestre que representa a estação chuvosa se dá de fevereiro-maio.

No entanto, existem frentes frias originadas do Atlântico Sul que influenciam o regime de chuvas do sul Ceará, fazendo com que a região do *Cariri* tenha o quadrimestre mais chuvoso de janeiro-abril, como também se registram “ondas de leste” do Atlântico e “vórtices” (XAVIER, 2001).

Segundo Xavier (2001), o Ceará pode ser dividido em sete regiões pluviometricamente homogêneas (Figura 3.8), sendo o Sertão Central e *Inhamuns* as regiões com a menor precipitação média anual: cerca de 550 mm registrada de 1964-1996, e evaporação potencial média anual de 2.550 mm registrada de 1961-1990 em Tauá (DNMET, 1992).

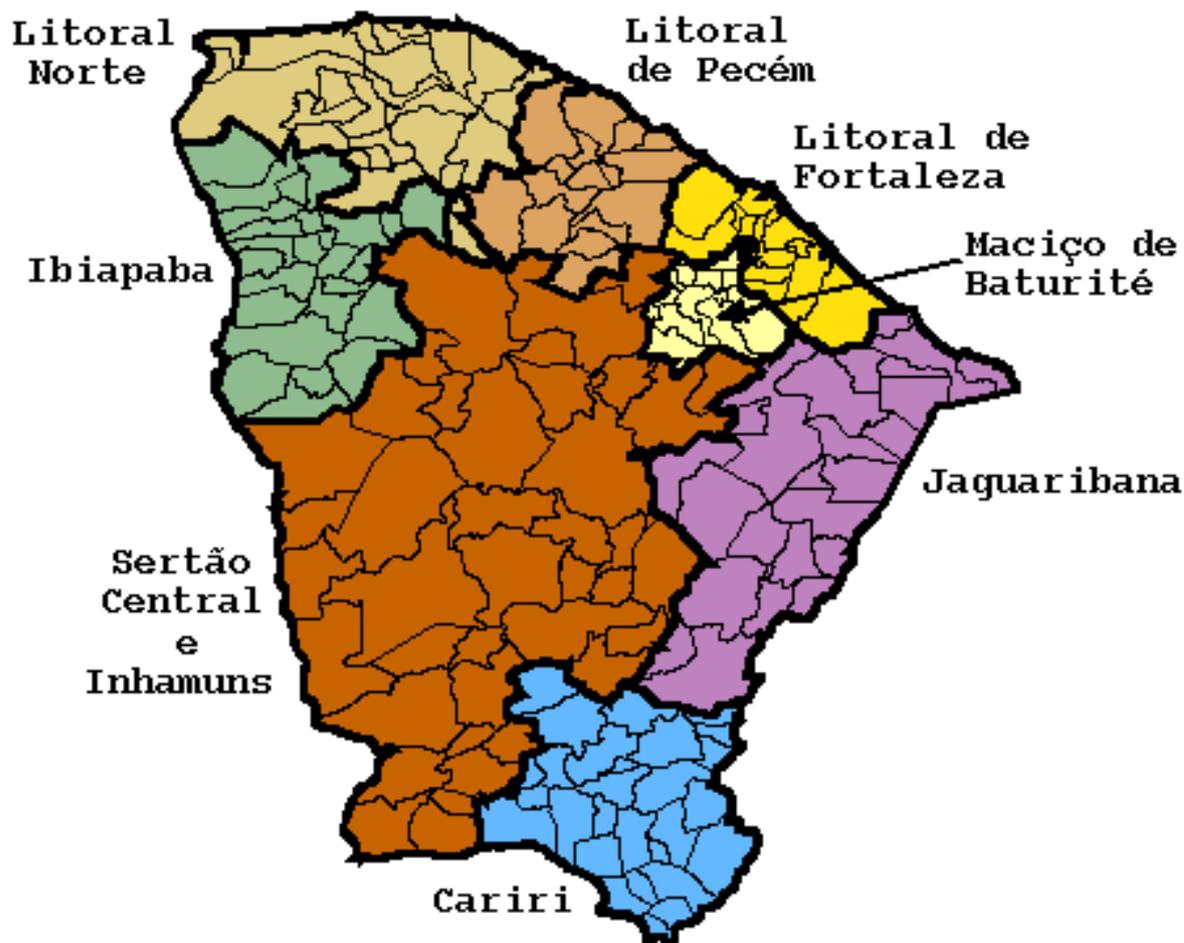


FIGURA 3.8 – Regiões pluviométricamente homogêneas, fonte: FUNCEME, 2007.

Os dados pluviométricos do posto da Estação Ecológica do município de Aiuaba (1979-2006) foram sistematizados por Creutzfeldt (2006) (Figura 3.9), mostrando uma estação chuvosa e uma seca bem definidas, sendo a primeira entre Dezembro/Janeiro a Maio, com coeficiente de variação interanual de 0,40 e a maior proporção da precipitação anual sendo concentrada em eventos chuvosos isolados com valores máximos acima de 160 mm.

Observa-se que o posto pluviométrico da ESEC de Aiuaba é compatível com a região pluviométrica na qual está inserida, segundo Xavier (2001). Contudo, em termos de distribuição intranual mensal, o posto da ESEC se aproxima mais da região do *Cariri*.

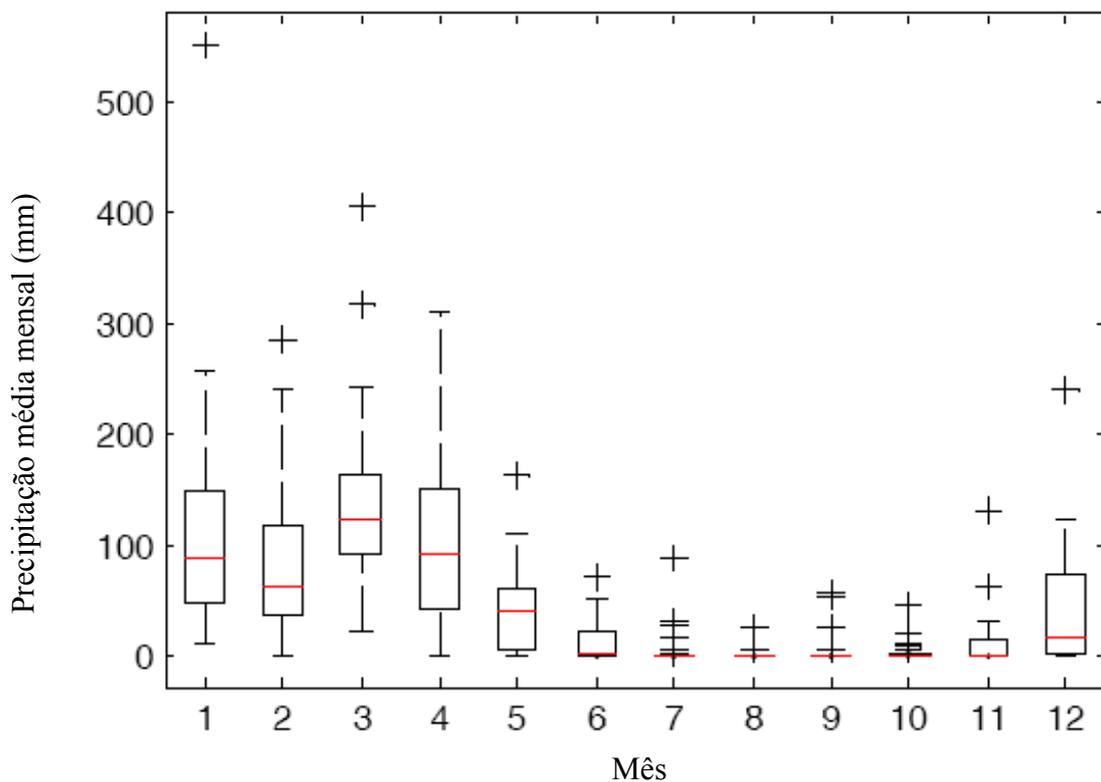


FIGURA 3.9 – Distribuição mensal da precipitação na Estação Ecológica do município de Aiuaba (1979-2005). As caixas são limitadas pelos percentis, a linha vermelha marca a média, e as cruzes são os *outliers*, fonte: Creutzfeldt, 2006.

Outros dados climatológicos foram medidos em Tauá no período de 1961-1990. Registrou-se temperatura média anual de 26,6°C com pouca 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).

Então, a evaporação potencial anual equivale-se a quase cinco vezes a precipitação média anual, com temperaturas elevadas, ar seco e alta insolação. A taxa de evapotranspiração real é também elevada e os eventos chuvosos concentrados, como os observados por Creutzfeldt (2006) na ESEC de Aiuaba, são responsáveis pela maior parte do deflúvio gerado.

De fato, segundo SUDENE (1980 apud FRISCHKORN; ARAÚJO; SANTIAGO, 2003), no Nordeste Brasileiro em torno de 78% da chuva corresponde à evapotranspiração real, 13% representa o deflúvio e 9% é percolado. De acordo com Duque (1980 apud FRISCHKORN;

ARAÚJO; SANTIAGO, 2003), é comum em anos chuvosos que metade da precipitação se concentre em um mês, com eventos isolados e elevada variabilidade espacial.

3.3 Vegetação

Este capítulo foi baseado no estudo de Lemos (2006) sobre florística, estrutura e mapeamento da cobertura da vegetação caatinga na ESEC de Aiuaba, para o último foi feita análise geográfica computadorizada, combinando dados cartográficos, de campo e de imagens orbitais para também validação do mapa.

O mapa temático resultante (Figura 3.10), com as classes de vegetação da ESEC de Aiuaba, possui uma escala aproximada de 1:50.000 e encontra-se acompanhado de perfis-diagramas específicos para cada fisionomia encontrada na Estação. A análise foi realizada a partir da quantidade de folhas verdes presentes nas imagens CBERS-2, convertidas em imagem *NDVI* ou *Normalized Difference Vegetation Index*, confirmadas em campo.

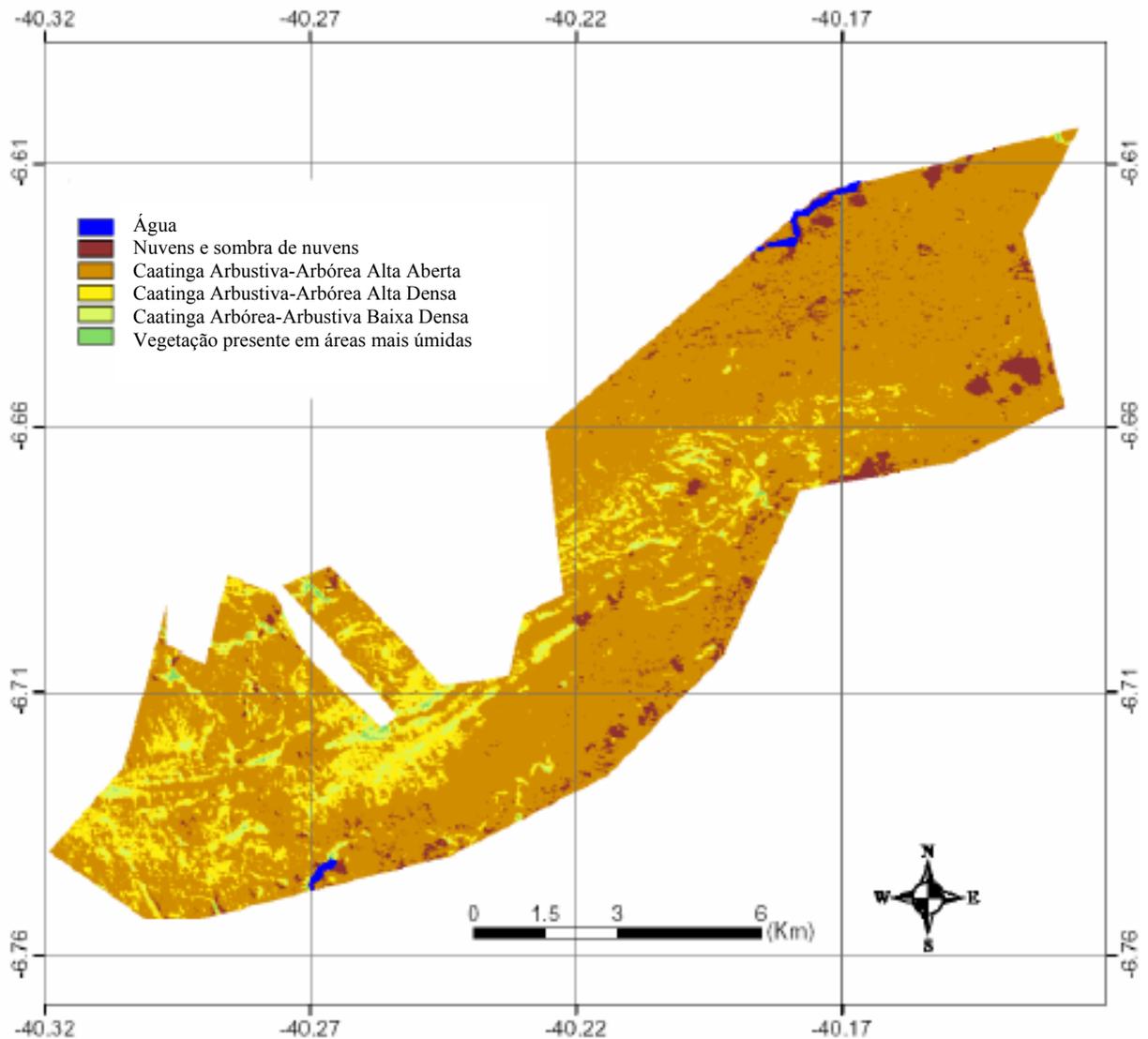


FIGURA 3.10 – Mapa de vegetação da Estação Ecológica de Aiuaba. Classificação das fisionomias vegetais de acordo com a quantidade de folhas verdes presentes nas imagens CBERS-2, convertidas em imagem NDVI, confirmadas em campo, fonte: Lemos, 2006.

A fisionomia da vegetação da ESEC de Aiuaba mostra que o valor médio das alturas é de 4,5 m com máximo 13 m, devido à alta densidade de indivíduos de alturas inferior a 5 m. Em termos de ocupação do espaço vertical, o diâmetro médio é de 7 cm com máximo de 45 cm.

Por meio de testes estatísticos, em termos florísticos, a área da ESEC de Aiuaba se agrupou primeiramente a uma área de caatinga estudada sobre sedimentos arenosos no Piauí e, posteriormente, a outra área de caatinga em área sedimentar também no Piauí, a uma área de carrasco e a uma área de transição de carrasco-caatinga, sendo todas as áreas citadas instaladas na bacia sedimentar do Meio-Norte, localizada geograficamente a oeste da ESEC.

E observou-se que o valor encontrado de diâmetro médio dos indivíduos na ESEC foi semelhante aos encontrados em áreas de caatinga instalada tanto no embasamento cristalino quanto sedimentar.

Em observações realizadas na BEA durante o presente trabalho, puderam-se constatar as afirmações acima: áreas com solos rasos e afloramento de rocha típicos do embasamento cristalino, com vegetação de menor porte (Figura 3.11a e 3.11b) e vegetação de maior porte (Baraúnas, por exemplo) localizada próxima à calha do riacho principal (Figura 3.12a e 3.12b).



(A) Vegetação esparsa em área de afloramento de rocha.

(B) Outro exemplo de vegetação no embasamento cristalino.

FIGURA 3.11 – Vegetação de pequeno porte situada em área típica do embasamento cristalino, data: 03-05-2007.



(A) Baraúna de maior porte da ESEC de Aiuaba.

(B) Segunda maior Baraúna da ESEC de Aiuaba.

FIGURA 3.12 – Vegetação de maior porte situada próxima à calha do riacho principal. Data: 05-03-2007. Foto do Autor.

Como a BEA está inserida na ESEC de Aiuaba, adotaram-se os perfis-diagramas das fisionomias mais predominantes da Estação, como sendo também os mais representativos da vegetação da BEA.

A BEA possui duas classes de vegetação principais: Caatinga Arbustiva-Arbórea Alta Densa, e Caatinga Arbustiva-Arbórea Alta Aberta. A primeira tem elementos arbóreos de até 8,5 m e espécies escandentes, a segunda possui árvores emergentes e esparsas com alturas entre 8 e 10 m. Ambas possuem espécies arbustivas altas entre 5 e 7 m, contudo, na primeira, tais árvores são encontradas mais densamente (LEMOS, 2006).

Nas Figuras 3.13 e 3.14 são apresentados os perfis-diagramas para cada classe de vegetação predominante na BEA. Na Figura 3.13 é representada a Caatinga Arbustiva-Arbórea Alta Densa e na Figura 3.14 é representada a Caatinga Arbustiva-Arbórea Alta Aberta.

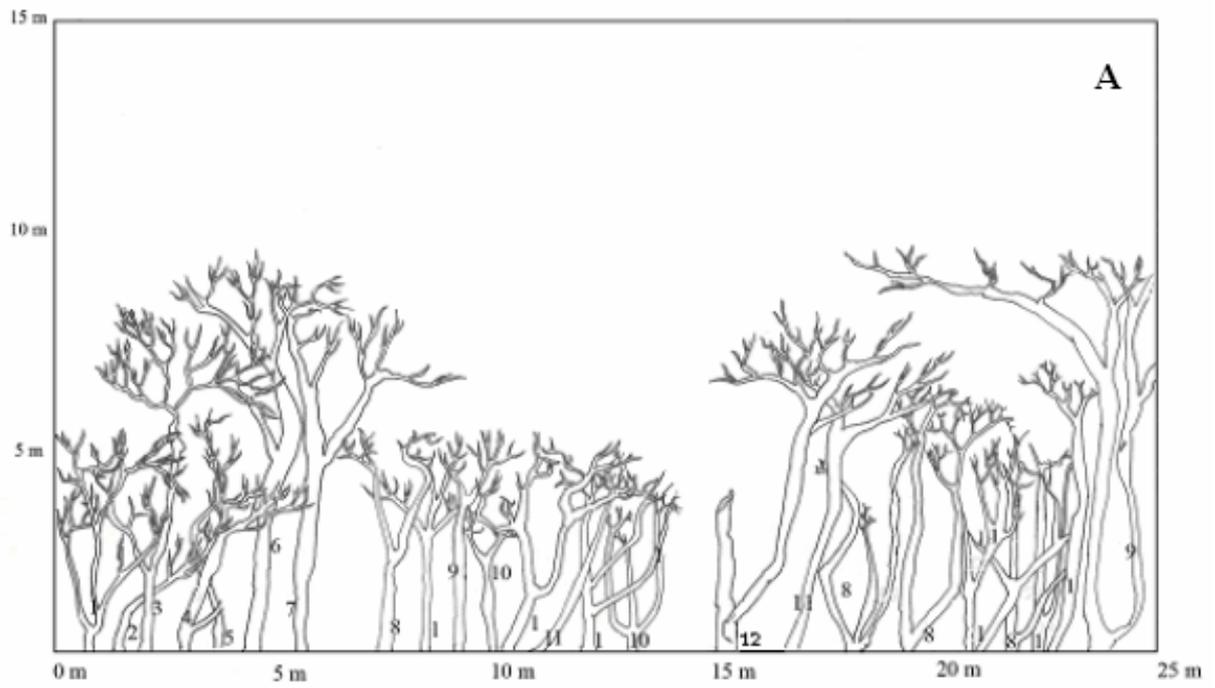


FIGURA 3.13 – A-Perfil-diagrama representando a fisionomia de Caatinga arbustiva-arbórea alta densa. B- Fotografia mostrando a citada fisionomia em campo, fonte: Lemos, 2006.

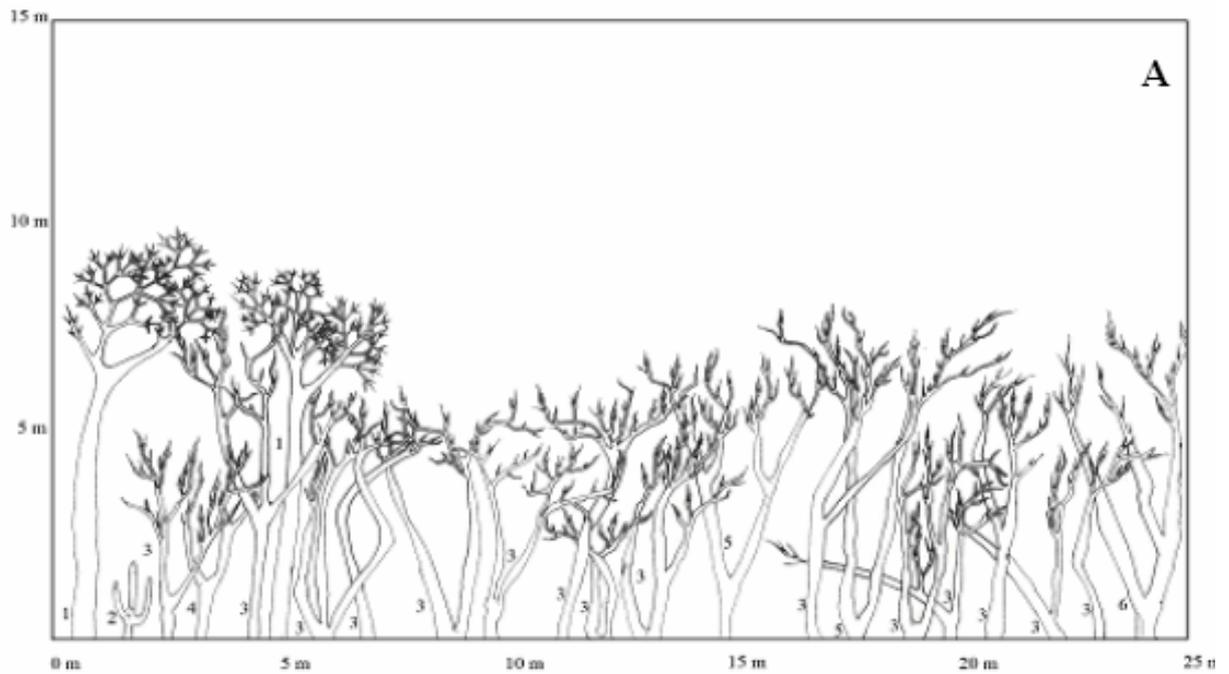


FIGURA 3.14 – A-Perfil-diagrama representando a fisionomia de Caatinga arbustiva-arbórea alta aberta. B-Fotografia mostrando a citada fisionomia em campo, fonte: Lemos, 2006.

3.4 Solos

Creutzfeldt (2006) elaborou para a Bacia Representativa do Açude Bengüê um mapa de solos, tendo como base os estudos de Pereira (1982) (Figura 3.15) Como a Bacia Experimental de Aiuaba está totalmente nessa bacia representativa (as duas sub-bacias no quadrante vermelho – Figura 3.15) foi possível identificar, em escala regional, os principais tipos de solos da BEA: Podzólico vermelho-amarelo, Planossolo solódico e Bruno não cálcico.

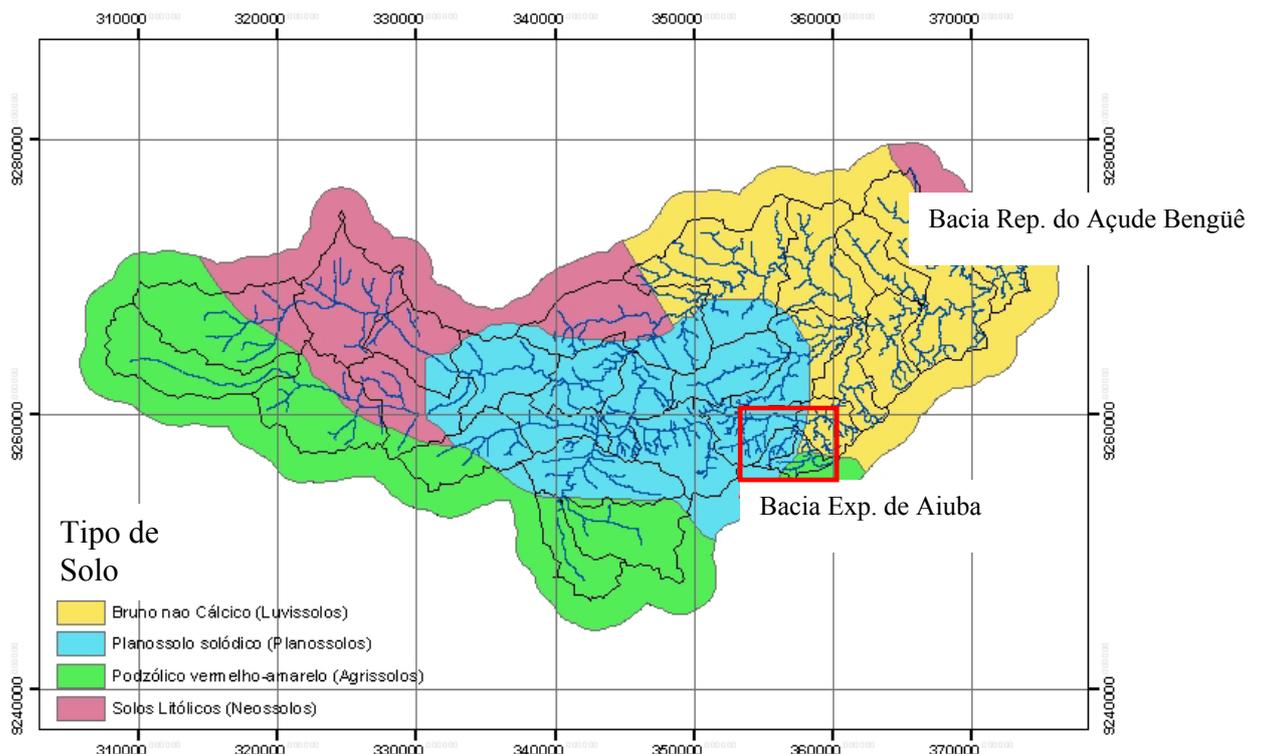


FIGURA 3.15 – Mapa dos principais tipos de solos da Bacia Representativa do Açude Bengüê, onde a Bacia Experimental de Aiuaba está totalmente inserida (as duas sub-bacias no quadrante vermelho), fonte: Creutzfeldt, 2006.

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 (ARAÚJO, L., 2005).

Os planossolos solódicos são solos moderadamente profundos a rasos também, mas raramente profundos, tendo, de modo geral, seqüência de horizontes A, B_t e C; e 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 (ARAÚJO, L., 2005).

Em trabalhos realizados *in situ*, levantaram-se perfis de solos da BEA para estudos de erodibilidade com base na Equação Universal de Perdas do Solo (ARAÚJO, L., 2005; CAVALCANTE; ARAÚJO; FARIAS, 2003). Nas Tabelas 3.1 e 3.2 são apresentados os parâmetros de solo levantados na BEA e em seu entorno, tendo como base os trabalhos de Araújo, L. (2005) e de Cavalcante, Araújo e Farias (2003).

TABELA 3.1 – Granulometria e matéria orgânica de perfis de solos da BEA e do seu entorno levantados por Araújo, L. (2005) e por Cavalcante, Araújo e Farias (2003). Na Tabela, nda significa ausência de dados.

Ponto	Prof.	Granulometria (USDA)					Classificação	Matéria Orgânica (%)
		Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)		
Furo 01	0-20 cm	7	37	35	19	2	<i>silte arenoso</i>	3,9
	20-35 cm	5	26	36	23	10	<i>silte arenoso</i>	2,8
	rocha							
Furo 03	0-20 cm	6	33	28	25	8	<i>silte arenoso</i>	1,72
	20-40 cm	12	23	2	35	28	<i>silte</i>	1,58
	40-50 cm	9	7	33	27	24	<i>silte arenoso</i>	1,57
	rocha							
Furo 04	0-20 cm	6	26	39	26	3	<i>silte arenoso</i>	1,39
	20-40 cm	5	25	15	26	29	<i>silte arenoso</i>	1,14
	rocha							
Furo 05	0-20 cm	6	4	30	56	4	<i>areia</i>	1,05
	20-40 cm	5	10	13	68	4	<i>silte arenoso</i>	0,81
	40-60 cm	nda	nda	nda	nda	nda	nda	0,52
	rocha							
Furo 06	0-20 cm	4	23	13	21	39	<i>silte arenoso</i>	3,73
	20-40 cm	4	15	26	27	28	<i>silte arenoso</i>	1,16
	rocha							
Ponto 20	0-30 cm	4	14	33	48	1	<i>silte arenoso</i>	1,06
	30-60 cm	6	23	27	43	1	<i>silte arenoso</i>	0,87
	rocha							
Ponto 23	0-30 cm	18	31	36	12	3	<i>silte</i>	1,29
	rocha							
Ponto 33	0-30 cm	8	48	39	5	0	<i>silte</i>	1,15
	rocha							

TABELA 3.2 – Densidade real, massa específica aparente seca e condutividade hidráulica saturada de perfis de solos da BEA e do seu entorno levantados por Araújo, L. (2005) e por Cavalcante, Araújo e Farias (2003). Na Tabela, nda significa ausência de dados.

Ponto	Prof.	Densidade Real (-)	Massa Específica Aparente Seca (g/cm ³)	Condutividade Hidráulica Saturada (mm/h)	Classificação da condutividade hidráulica ^(*)
Furo 01	0-20 cm	2,53	1,35	1,30	baixa
	20-35 cm rocha	2,52	nda	nda	nda
Furo 03	0-20 cm	2,62	1,49	nda	nda
	20-40 cm	2,59	nda	nda	nda
	40-50 cm rocha	2,54	nda	nda	nda
Furo 04	0-20 cm	2,62	1,97	10,08	moderada
	20-40 cm rocha	2,6	nda	nda	nda
Furo 05	0-20 cm	2,58	1,79	20,52	alta
	20-40 cm	2,6	nda	nda	nda
	40-60 cm rocha	2,55	nda	nda	nda
Furo 06	0-20 cm	2,56	1,62	1,48	baixa
	20-40 cm rocha	2,56	nda	nda	nda
Ponto 20	0-30 cm	2,43	1,6	13,7	moderada
	30-60 cm rocha	2,41	nda	2,6	baixa a moderada
Ponto 23	0-30 cm rocha	2,45	nda	20,9	alta
Ponto 33	0-30 cm rocha	2,68	1,44	2,1	baixa a moderada

^(*) (ver HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993).

Os pontos referidos na Tabela 3.2 são mostrados espacialmente na Figura 3.16, tendo como base a delimitação da BEA realizada por Araújo, J. et al. (2004a).

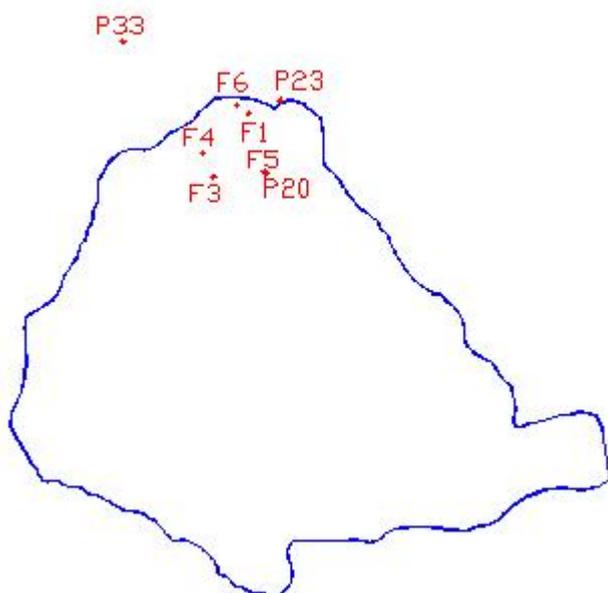


FIGURA 3.16 – Pontos dos perfis de solos distribuídos espacialmente, tendo como base a delimitação da BEA realizada por Araújo, J. et al. (2004a).

Conclui-se, com base nessas amostras de solos, que esse setor da BEA possui solos rasos e de permeabilidade alternando entre baixa e moderada, tendo consonância com as características gerais dos tipos principais de solos da bacia (bruno não cálcicos e podzólicos não espessos) e profundidade média de 20 a 50 cm (CADIER, 1994).

3.5 Geologia

Tendo como base o trabalho realizado por Araújo, L. (2005), foi possível identificar os principais tipos geológicos da BEA, delimitada em azul na Figura 3.17. Neste capítulo, baseou-se também no relatório elaborado por Veríssimo (2007) sobre a geologia geral da BEA.

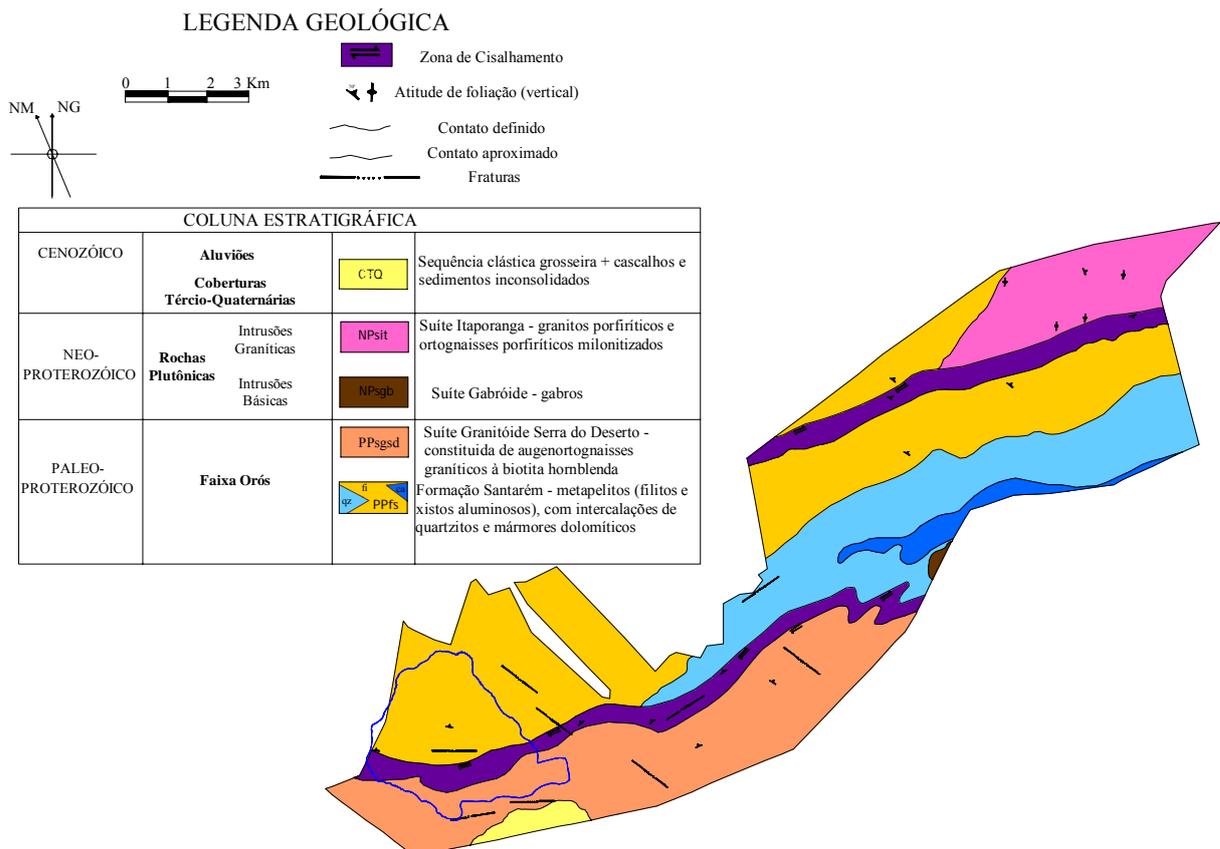


FIGURA 3.17 – Geologia geral da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), detalhe em azul (delimitação baseada em Araújo et al., 2004a), tendo como base Araújo, L. (2005).

No extremo sul da BEA ocorrem gnaisses acinzentados de textura fina a média contendo megacristais (augen) de feldspato. O bandamento composicional representa uma feição marcante deste litotipo, intercalando 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.

Os ortognaisses foram classificados por Oliveira et al. (1983 apud VERÍSSIMO, 2007) como gnaiss facoidal e recentemente incluídos na Suíte Granitóide Serra do Deserto de idade paleoproterozóica, representada por augenortognaisses graníticos à biotita e hornblenda.

Nas porções central e norte da BEA 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 mármore 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 sustentado uma serra, a qual se destaca na topografia local e constitui importante divisor de setores estruturais da BEA. A 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 (Suíte Granitóide Serra do Deserto) o padrão desenvolvido sobre filitos é predominantemente dendítico.

Os quartzitos caracterizam-se pelas cores cinza-esbranquiçadas e possuem granulação fina. São compactos e por vezes micáceos (muscovita), quando exibem aspecto sedoso e foliação insipiente. 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 bacia de Aiuaba. Possuem coloração cinza-escura, com tonalidades cinza-esverdeadas, brilho sedoso, 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) e como acessórios observam-se 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).

Todos os litotipos mapeados exibem uma foliação tectono-metamórfica representada por bandamento composicional nos gnaisses e xistosidade nos filitos e xistos, com orientação variando de E-W a NE-SW e valores médios de mergulhos entre 40° e 65° para N-NW, a qual sofre inflexões e verticalização próximo às zonas de cisalhamento dúcteis mapeadas.

As estruturas rúpteis também exercem forte controle na BEA capturando trechos de drenagem e afluentes do rio principal por quilômetros de distância, configurando um padrão tipicamente retangular. Especialmente no setor norte da bacia, observa-se um padrão fortemente estruturado e ortogonal da rede de drenagem, condicionada por fraturas e/ou falhas com orientação N-S e E-W.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O material e os métodos foram elaborados de acordo um ordenamento lógico para se atingir os objetivos deste trabalho, assim foram compostos pelas seguintes tarefas: caracterização da fisiografia (**CF**), medição e monitoramento (**MM**), avaliação de processos (**AP**) e síntese hidrológica (**SH**), em que o avanço na síntese ferramental se deu na ordem acima apresentada. Na Figura 4.1 é mostrado um diagrama explicativo dos tópicos principais do material e dos métodos.

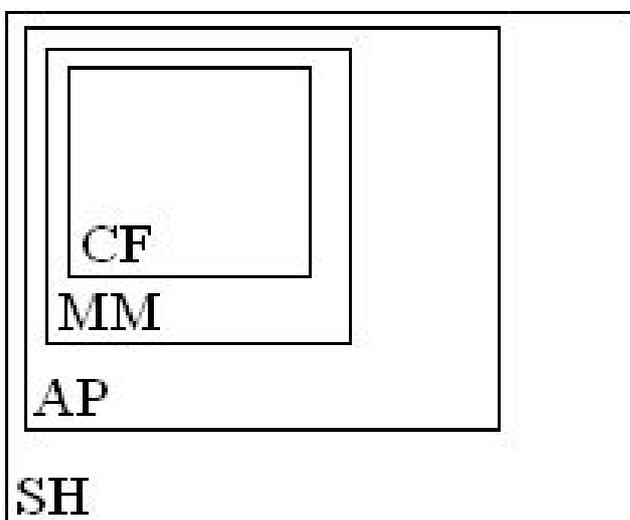


FIGURA 4.1 – Diagrama do material e dos métodos desta pesquisa, em que **CF** representa a tarefa: “caracterização da fisiografia”, **MM** a “medição e monitoramento”, **AP** a “avaliação de processos” e **SH** a “síntese hidrológica”

Nas tarefas **MM** e **AP**, os materiais e os métodos foram dispostos a tratar dos processos hidrológicos em estudo: (i) trocas hídricas na bacia hidráulica (**ABH**), (ii) eventos chuva-deflúvio (**ECD**) e (iii) produção de sedimentos (**PS**), sendo os dois últimos abordados para toda a bacia hidrográfica.

Neste contexto, levou-se em conta que os resultados de (iii) dependem dos resultados de (ii), que dependem dos resultados de (i), pois a avaliação das trocas hídricas na bacia hidráulica permite o acesso ao deflúvio total gerado na bacia (ver capítulo 2.2.2). Assim, o ordenamento das sub-tarefas nas tarefas **MM** e **AP** foram realizados conforme a essa lógica de interdependência de resultados: primeiramente, **ABH**; depois **ECD** e, por fim, **PS**.

Na Figura 4.2 é apresentado o diagrama de interdependência entre os resultados dos processos hidrológicos.

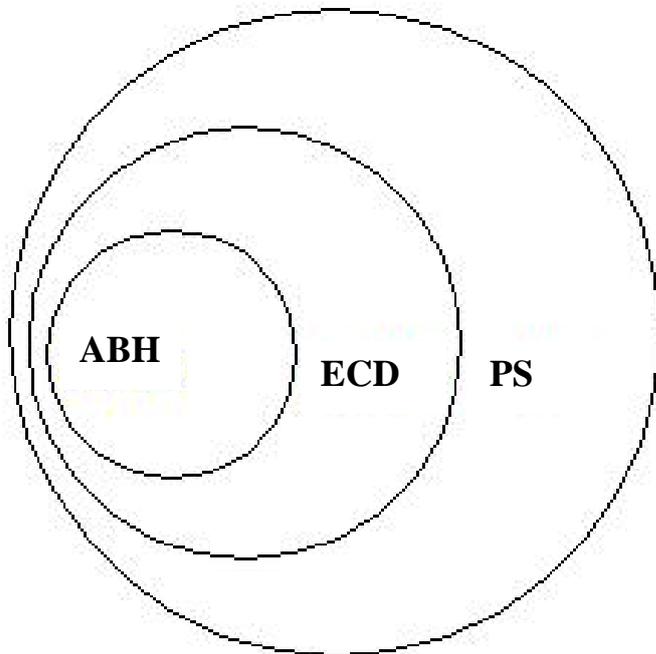


FIGURA 4.2 – Diagrama de interdependência entre os resultados dos processos hidrológicos, em que **ABH** representa o processo: “trocas hídricas na bacia hidráulica”, **ECD**: “eventos chuva-deflúvio” e **PS**: “produção de sedimentos”. As cores azul e verde indicam processos na bacia hidráulica e na bacia hidrográfica, respectivamente.

4.1 Caracterização da Fisiografia

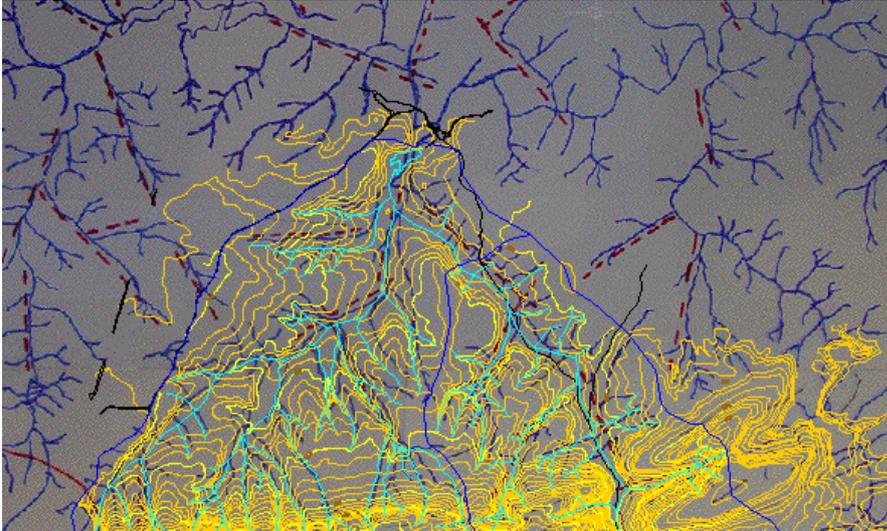
Existem na literatura várias características que determinam a fisiografia de uma bacia hidrográfica (VILLELA; MATOS, 1975; SILVEIRA, 1993; CADIER, 1994; HARRELSON; RAWLINS; POTYONDY, 1994; RIGHETTO, 2004a). Para a Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) estimaram-se as características descritas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Descrição das características de cada elemento da fisiografia da BEA.

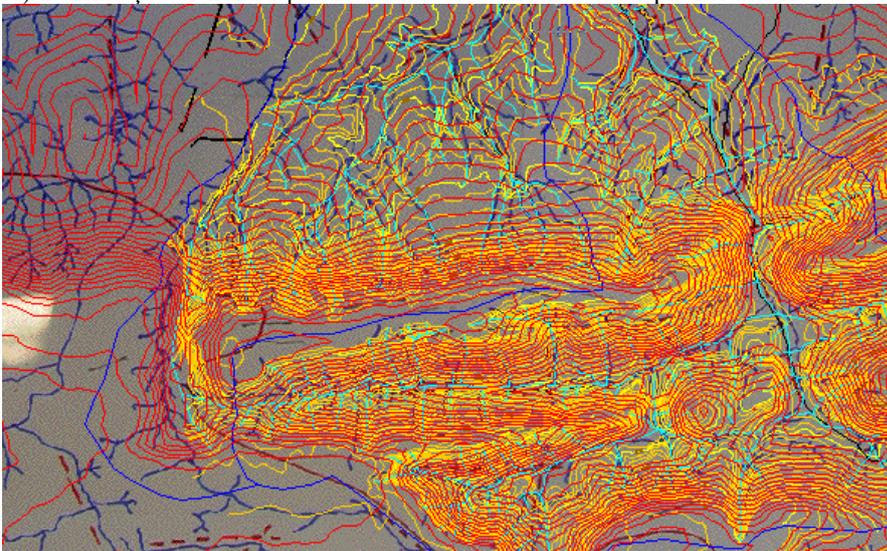
Elemento da Fisiografia	Características	Unidade
Área	Área	km ²
	Perímetro	km
Forma Superficial	Coefficiente de Compacidade	(-)
	Fator de Forma	(-)
Relevo	Declividade média da Bacia	%
	Altitude	m
	Curva Hipsométrica	(-)
Rede de Drenagem	Comprimento dos rios principais	km
	Perfil de declividade dos rios principais	(-)
	Declividade média dos rios principais	m/km
	Sinuosidade dos rios principais	(-)
	Comprimento Total dos rios	km
	Densidade da Rede de Drenagem	km/km ²
	Extensão média do Escoamento Superficial	m
	Perfis de seções da rede de drenagem	(-)
	Análise dos solos do leito dos rios	(-)

A área e o perímetro da BEA foram determinados a partir do conjunto de dados: curvas de nível da carta planialtimétrica em escala 1:10.000 elaborada por Araújo, J. et al. (2004a) com curvas de nível a cada 5 m, rede de drenagem digitalizada de cobertura aerofotogramétrica e curvas de nível a cada 5 m geradas a partir da base de dados *SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)*.

A delimitação da BEA deu-se inicialmente das curvas de nível da carta planialtimétrica compatibilizada com a rede de drenagem digitalizada (Figura 4.3a). Depois, onde faltavam informações da carta, complementou-se com as curvas de nível da base *SRTM* (Figura 4.3b). Vale salientar que parte do setor noroeste da BEA é delimitada por uma pequena estrada identificada na carta com o auxílio de GPS geodésico (ver em Araújo, J. et al., 2004a).



A) Delimitação da BEA a partir das curvas de nível da carta planialtimétrica e da rede de drenagem digitalizada.



B) Continuação da delimitação da BEA com o auxílio das curvas de nível da base *SRTM* em vermelho.

FIGURA 4.3 – Compatibilidade de dados para delimitação da BEA: em amarelo as curvas de nível da carta planialtimétrica, em vermelho as curvas de nível da base da *SRTM*, em azul claro a rede de drenagem digitalizada e em azul escuro o traçado da BEA.

A declividade média da BEA, as altitudes máxima e mínima e a curva hipsométrica foram adotadas dos resultados de Araújo, J. et al. (2004a).

A partir das recomendações descritas em Harrelson, Rwalins e Potyondy (1994) para caracterização da rede de drenagem, levantaram-se características de seções dos rios principais, incluindo análise dos solos de seus leitos a profundidade de 20 cm:

- Perfil das seções;
- Análise granulométrica por peneiramento e por sedimentação;
- Densidade real (D_p);
- Condutividade hidráulica saturada (K_s);

- Massa específica aparente seca (ρ_b);
- Porosidade (n_p);

O perfil das seções foi realizado diretamente no campo com trena, régua e nível; a análise granulométrica por peneiramento e por sedimentação, a densidade real, a condutividade hidráulica saturada, a massa específica seca e o teor de matéria orgânica foram realizados de acordo com NBR 7181, DNER ME 93-64, NBR 14545, NBR 7185 e NBR 13600, respectivamente. A determinação da umidade do solo foi realizada de acordo com a norma DNER ME 52-64.

A porosidade (n_p) foi determinada de acordo com Rawls et al. (1993):

$$n_p = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (4.1)$$

em que ρ_p é a massa específica real da partícula.

4.2 Medição e Monitoramento

Nesta tarefa realizou-se uma síntese do que foi produzido nos seguintes trabalhos: Araújo et al. (2004a), Medeiros (2005), Medeiros e Araújo (2005), Costa (2006a) e Costa (2006b) sobre instrumentação e medição; além de descrições sobre o Banco de Dados Hidrológicos e seu gerenciamento, como também sobre o monitoramento realizado na Bacia Experimental durante esta investigação. Na Tabela 4.2 são descritos os processos e as respectivas variáveis monitoradas na BEA.

TABELA 4.2 – Processos hidrológicos e suas respectivas variáveis monitoradas na Bacia Experimental de Aiuaba (2003 - 2007).

Processos Hidrológicos	Variáveis Hidrológicas Monitoradas				
Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica	Precipitação sobre o lago	Nível d'água do reservatório	Evaporação em tanque classe A	Dados Climatológicos ¹	
Eventos Chuva-Deflúvio	Precipitação sobre a bacia	Deflúvio Superficial em riacho	Interceptação	Umidade do solo	Dados Climatológicos ¹
Produção de Sedimentos	Concentração de Sedimentos Suspensos em riachos				

¹Os dados climatológicos são: temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar incidente e pressão atmosférica.

4.1.1 Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica

O nível d'água do reservatório vem sendo monitorado na Estação Limnimétrica, no exutório da BEA (açude Boqueirão). Quatro réguas limnimétricas e um limnígrafo de bóia (modelo Thalimedes, da marca OTT) foram instalados em janeiro de 2003. Esses instrumentos compõem a Estação Limnimétrica.

As réguas foram dispostas a cada metro, sendo a primeira instalada a partir de 1,60 m da cota mínima do açude, e o limnígrafo de bóia foi instalado em uma torre tranquilizadora das águas no ponto mais profundo do açude (ver Figuras 4.4 e 4.5).



FIGURA 4.4 – Réguas limnimétricas instaladas no açude Boqueirão, a partir de 1,60 m da cota mínima do açude, dispostas a cada metro em um total de quatro réguas. Data: 29-05-2004



FIGURA 4.5 – Torre tranquilizadora das águas no ponto mais profundo do açude Boqueirão, em que o limnógrafo de bóia foi instalado. Data: 11-01-2003.

As medidas do nível d'água do açude são feitas diariamente por meio de leituras manuais nas réguas limnimétricas (precisão de 1 cm) e no limnígrafo (precisão de 1 mm), e automaticamente a cada hora pelo limnígrafo (precisão de 1 mm).

As configurações do limnígrafo de bóia, tais como: hora, data, medida e intervalo de tempo da medida, e a coleta de dados armazenados em módulos de memória (*dataloggers*) se dá através de computador portátil (*laptop*), utilizando-se o programa *Hydras* fornecido pela OTT.

O limnígrafo de bóia é configurado, sempre que necessário, para um valor de medida real do nível d'água realizada nas réguas limnimétricas. Quando observados desajustes na medida automática, realizaram-se correções no nível medido pelo limnígrafo, tendo como base os valores medidos nas réguas.

Os desajustes ocorreram principalmente por procedimentos equivocados na operação do instrumento em campo, por intervenções (construção de abrigo por insetos dentro da torre tranqüilizadora) e pela presença de algas durante os períodos de nível baixo. Quando foi necessário corrigir as medidas automáticas do limnígrafo, utilizaram-se correlações diárias entre as medidas do limnígrafo e as das réguas limnimétricas (e.g., Figura 4.6).

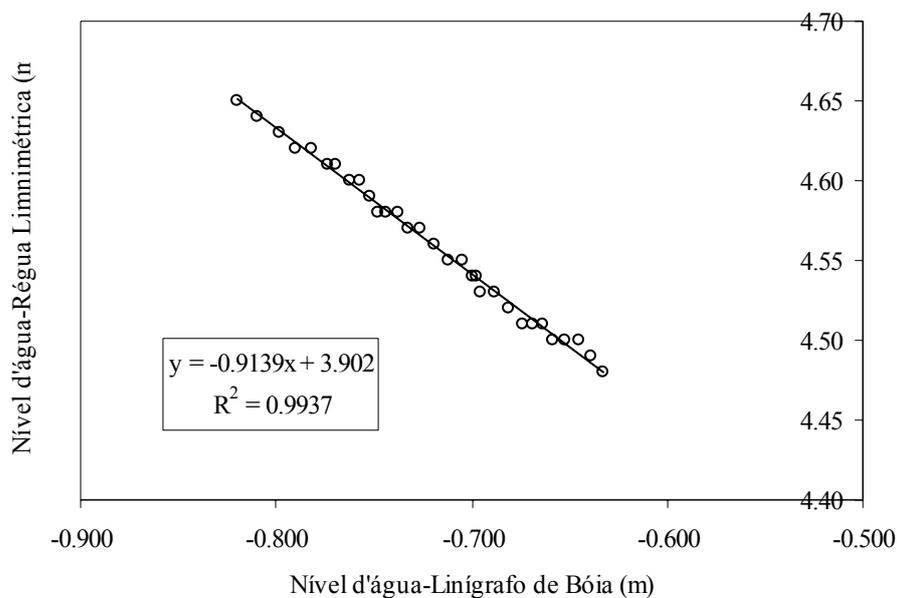


FIGURA 4.6 – Exemplo de correlação entre as medidas diárias do limnígrafo e as das réguas limnimétricas, para correção do dado automático do limnígrafo em períodos de desajuste da medida.

A evaporação sobre a superfície do açude Boqueirão vem sendo determinada através de dados monitorados em duas estações climatológicas e medidas realizadas no tanque evaporimétrico classe A, enquanto a precipitação sobre o lago por meio de dados da estação pluviométrica 1, a mais próxima do barramento (distância de 700 m aproximadamente).

Duas estações climatológicas foram instaladas na região da BEA. A primeira foi instalada a menos de 2 km do exutório da bacia e pertence à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) Esta estação climatológica da FUNCEME foi produzida pela Campbell, tendo sido instalada em dezembro de 2006, com coleta similar à das estações pluviométricas (ver sub-tópico 4.1.2).

A segunda estação climatológica dista 22 km do exutório da BEA e está localizada na Sede Administrativa da ESEC de Aiuaba. Esta estação foi cedida pelo PIK (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung) e é operada pela Universidade Federal do Ceará (UFC). A estação climatológica da ESEC de Aiuaba, denominada de Estação Climatológica 1 (EC1), foi produzida pela *DELTA-T* e foi instalada em agosto de 2005.

Ambas estações realizam medidas automáticas a cada hora de variáveis climatológicas: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento (na EC1 a medida é realizada a 3,5 m de altura e na estação da FUNCEME a 10 m), radiação de onda-curta ou incidente e pressão atmosférica.

A estação climatológica da FUNCEME mede ainda a velocidade e a direção da rajada máxima do vento. Nas Figuras 4.7 e 4.8 são apresentadas respectivamente a Estação Climatológica da FUNCEME e a Estação Climatológica 1.

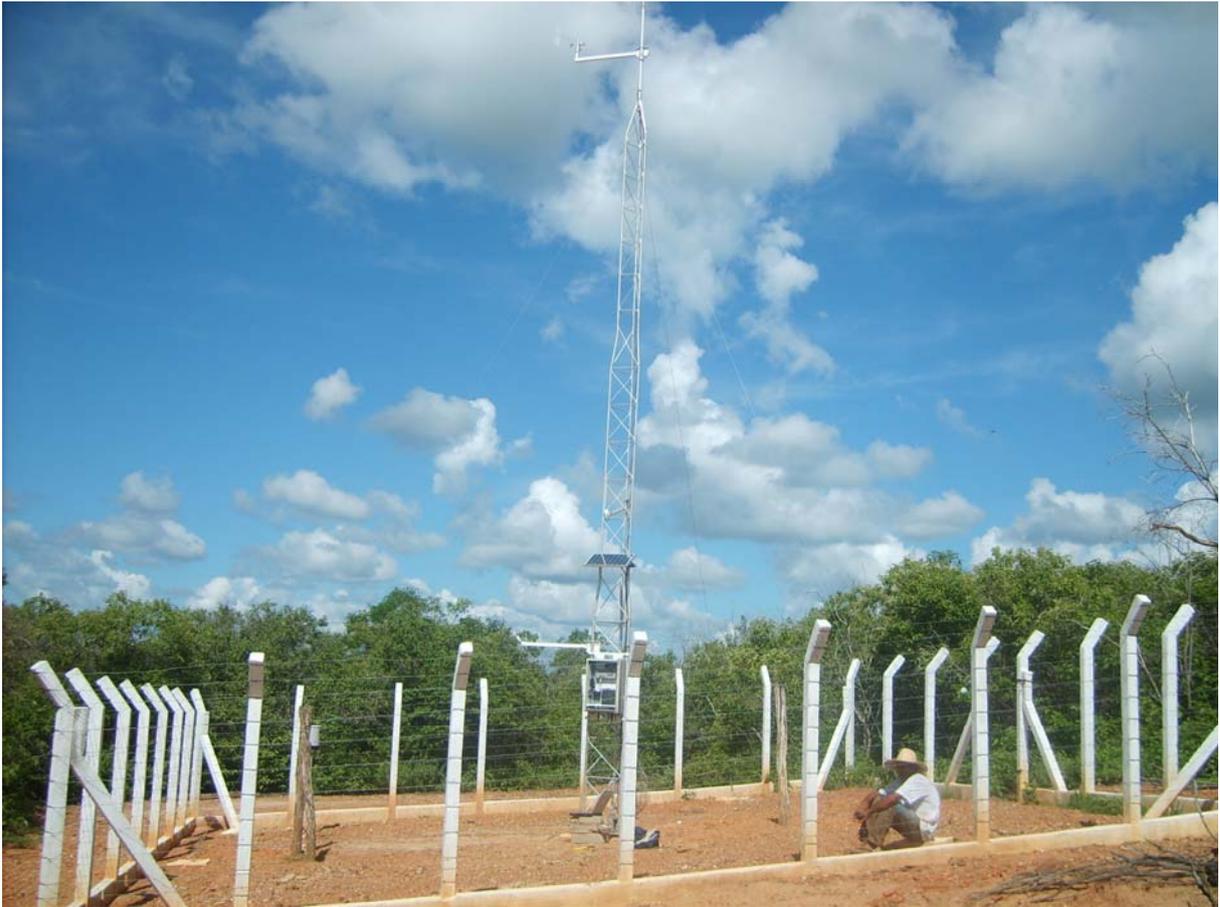


FIGURA 4.7 – Estação Climatológica da FUNCEME instalada nas proximidades da BEA, com medidas automáticas a cada hora de: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e da sua rajada máxima, radiação incidente e pressão atmosférica. Data: 05-03-2007. Foto do autor.



FIGURA 4.8 – Estação Climatológica 1 instalada na Sede da ESEC de Aiuaba, com medidas automáticas a cada hora de: precipitação, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento e da sua rajada máxima, radiação incidente e pressão atmosférica. Data: 27-03-2007. Foto do autor.

Um Tanque Evaporimétrico Classe A foi instalado em fevereiro de 2003 na Estação Pluviométrica 1. As medidas são realizadas diariamente por meio de micrômetro em tanque tranquilizador (Figura 4.9).



FIGURA 4.9 – Tanque Evaporimétrico Classe A instalado na Estação Pluviométrica 1 com medidas realizadas diariamente por meio de micrometro e de tanque tranquilizador. Data: 19-02-2003, fonte: Araújo, J. et al., 2004a.

4.1.2 Eventos Chuva-Deflúvio

A precipitação e a umidade do solo da bacia hidrográfica da BEA vêm sendo monitoradas a partir de três estações pluviométricas com sensores de umidade de solo, e a interceptação da precipitação por meio de um sítio experimental.

Três estações pluviométricas foram instaladas em janeiro de 2003, possuindo as seguintes especificações: pluviômetro de báscula com resolução de 0,254 mm; módulo de memória CR510 da Campbell, com 128 kB de memória; bateria recarregável com regulador de suporte e cabo (PS 12LA); painel solar de 10 Watts (MSX 10) e kit de aterramento do sistema de coleta de dados.

Em cada estação pluviométrica foi instalado, a uma profundidade de 15 cm, um sensor de umidade de solo do tipo TDR. Para a calibração dos sensores foram coletadas e umedecidas

amostras de solo, determinando-se suas umidades e associando-se às leituras correspondentes do sensor.

As medidas são realizadas automaticamente: chuva acumulada e intensidade de chuva a cada 5 min quando há evento chuvoso; chuva acumulada a cada 6 h continuamente; e umidade do solo instantânea a cada hora. As coletas são realizadas através de módulo de memória SM16M conectado ao teclado CR10KD da Campbell ou por meio de computador, utilizando-se o programa PC208W.

As estações automáticas foram denominadas Estação Pluviométrica 1 (EP1), Estação Pluviométrica 2 (EP2) e Estação Pluviométrica 3 (EP3). Durante o ano de 2004, devido a mudança de local, a EP2 foi denominada de Estação Pluviométrica 4 (EP4). No entanto, poucos meses depois, a estação foi reinstalada no local original e seus dados foram novamente registrados como EP2. Nas Figuras 4.10, 4.911e 4.12 são apresentadas, respectivamente, as estações EP1, EP2 e EP3.



FIGURA 4.10 – Estação Pluviométrica 1 com pluviômetro de báscula (resolução de 0,254 mm) e sensor de umidade de solo conectados a um módulo de memória. Medidas automáticas da chuva acumulada (a cada 5 min e 6 h) e umidade de solo (a cada 1 h). Data: 02-02-2003.



FIGURA 4.11 – Estação Pluviométrica 2 com pluviômetro de báscula (resoluo de 0,254 mm) e sensor de umidade de solo conectados a um módulo de memória. Medidas automáticas da chuva acumulada (a cada 5 min e 6 h) e umidade de solo (a cada 1 h). Data: 02-02-2003.



FIGURA 4.12 – Estação Pluviométrica 3 com pluviômetro de báscula (resoluo de 0,254 mm) e sensor de umidade de solo conectados a um módulo de memória. Medidas automáticas da chuva acumulada (a cada 5 min e 6 h) e umidade de solo (a cada 1 h). Data: 02-02-2003.

Em novembro de 2003 foi instalado um sítio experimental de interceptação na BEA, em área de 10 x 10 m², (i) dez pluviômetros do tipo *Ville de Paris* sob a vegetação; (ii) dez calhas com pequenos reservatórios conectados aos troncos de árvores representativas; e (iii) um pluviômetro do tipo *Ville de Paris* em área aberta contígua à área monitorada.

Por meio dos pluviômetros sob a vegetação é obtida a precipitação interna. Das calhas se obtém a Lâmina Escoda pelos troncos e do pluviômetro em área aberta se estima a precipitação acima da vegetação. A coleta do escoamento pelos troncos é realizada diariamente por meio de proveta graduada. Nas Figuras 4.13 e 4.14 são apresentados respectivamente os pluviômetros sob a vegetação e um exemplo de calha na Estação de Interceptação. Para maiores detalhes desta estação, ver Medeiros (2005) e Medeiros e Araújo (2005).



FIGURA 4.13 – Pluviômetros do tipo *Ville de Paris* sob a vegetação. Data: 09-03-2004, fonte: Medeiros, 2005.



FIGURA 4.14 – Exemplo de calha com pequeno reservatório conectado ao tronco de árvore. Data: 09-03-2004, fonte: Medeiros, 2005.

A medição do deflúvio superficial na BEA iniciou-se sistematicamente a partir de novembro de 2006 com a instalação de um medidor de nível d'água automático em uma calha Parshall, denominados conjuntamente de Estação Fluviométrica 1 (EF1). Essa estação controla uma sub-bacia na BEA de 7,54 km², localizando-se no riacho principal (ver capítulo 5.1).

Ainda em novembro de 2006 foi instalada uma régua limnimétrica imediatamente a jusante da calha Parshall para realização de curva-chave, no intuito de não se perder dados de vazões máximas acima da capacidade de medição da calha Parshall, que foi projetada de acordo com Chow (1973), feita de fibra de vidro. A calha possui capacidade de medição de 3 a 456 L/s, com as seguintes dimensões básicas: largura do estrangulamento de 0,3048 m, elevação de 0,914 m e comprimento total de 3,25 m. Segundo Chow (1973), a equação da calha Parshall para estas dimensões é dada por:

$$Q_{CP} = 4 \cdot W_{CP} \cdot H_A^{1.522} W^{0.026} \quad (4.2)$$

em que Q_{CP} é a vazão da calha Parshall em cfs, W_{CP} a largura do estrangulamento em ft e H_A a altura da coluna d'água no ponto a montante do estrangulamento em ft.

Quando a fração da altura da coluna d'água no ponto a jusante (H_B) sobre H_A exceder 0,7, o escoamento começa a se tornar submerso e a vazão é reduzida. Para tanto, deve-se corrigir a equação (4.2) por uma quantidade negativa, que pode ser estimada pelo diagrama da Figura 4.15, em que o eixo das ordenadas corresponde ao valor medido em H_A em ft.

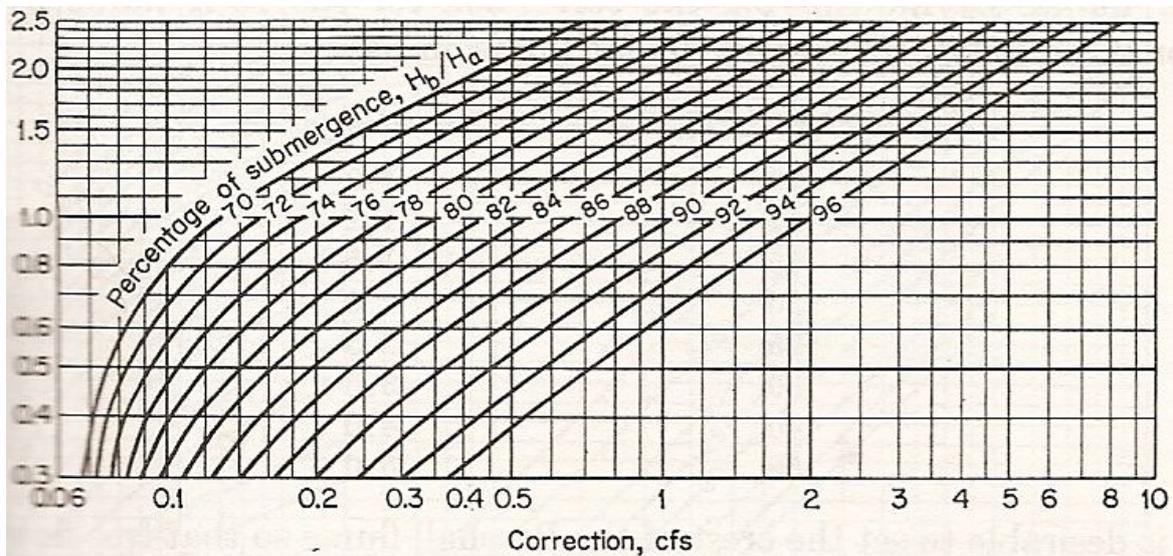


FIGURA 4.15 – Diagrama para computação da taxa de escoamento submerso, em cfs, através da calha Parshall de 1 ft de largura de estrangulamento, em que o eixo das ordenadas corresponde o valor medido em H_A em ft, fonte: Chow, 1973.

Segundo Chow (1973), a correção da vazão em cfs obtida pelo diagrama da Figura 4.15 deve ser multiplicada por um fator de correção, sendo para a calha Parshall de tamanho 0,305 m igual à unidade. Nas Figuras 4.16a e 4.16b são apresentados os detalhes da calha Parshall.

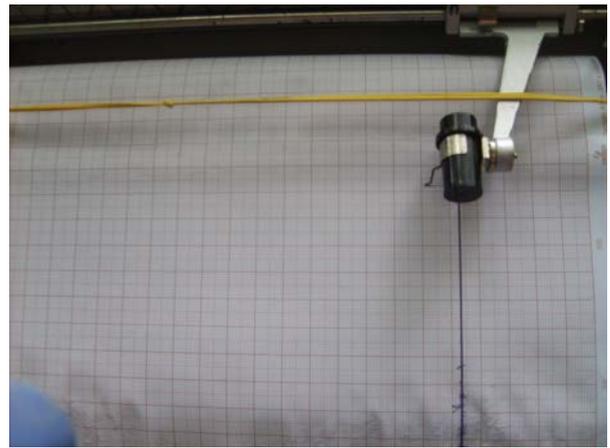


(A) Visão geral da calha Parshall.

(B) Calha Parshall em funcionamento.

FIGURA 4.16 – Detalhes da calha Parshall de 0,305 m de largura de estrangulamento, com capacidade de medição de vazão entre 3 a 456 L/s. Datas: 12-01-2003 (a) e 02-03-2004 (b).

O medidor de nível d'água automático é um instrumento eletrônico da década de 1980 fabricado pela OTT. O aparelho é um limnógrafo de bóia instalado no ponto de medição de H_A , marcando continuamente seu nível em papel milimetrado através de uma pena, na proporção em que 1 cm de coluna d'água equivale a 1 mm no papel. A velocidade de rotação para o registro foi ajustada para 5 mm por hora. No entanto, essa velocidade não é constante, mas crescente à medida em que o bulbo do papel é reduzido. Por essa razão recomenda-se registrar no papel, com a maior frequência possível, data e hora. Nas Figuras 4.17a e 4.17b são apresentados detalhes do medidor de nível d'água automático.



(A) Medidor automático sobre um suporte de ferro e madeira, coberto ainda por saco plástico para proteção contra as chuvas.

(B) Medidor automático em funcionamento, com marcação de um pequeno deflúvio superficial na calha Parshall.

FIGURA 4.17 – Detalhes do medidor de nível d'água automático instalado no ponto de medição de H_A , possuindo uma proporção em que 1 cm de coluna d'água equivale a 1 mm no papel milimetrado. Datas: 10-05-2007 (a) e 23-03-2007 (b). Foto do Autor.

A coleta de dados é realizada sempre quando for necessário trocar o rolo de papel milimetrado. Em relação à régua limnimétrica, fazem-se leituras manuais do nível d'água máximo logo após dos eventos chuva-deflúvio. É importante observar que o perfil vertical da seção controlada pela régua está sendo monitorado. Na Figura 4.18 é apresentado o local da instalação da régua limnimétrica.



FIGURA 4.18 – Régua limnimétrica instalada imediatamente a jusante da calha Parshall, para realização de curva-chave, no intuito de não se perder dados de vazões máximas acima da capacidade de medição da calha Parshall. Data: 23-03-2007. Foto do autor.

No início de maio de 2007 foi instalado um medidor automático de nível d'água no ponto H_B da calha Parshall, possuindo como princípio de medição a variação da pressão da coluna de ar de uma mangueira colocada no ponto H_B , provocada pela alteração do nível d'água nesse ponto (Figura 4.17a e Figura 4.19)



FIGURA 4.19 – Medidor automático de nível d'água no ponto H_B da calha Parshall, que possui como princípio de medição a variação da pressão da coluna de ar de uma mangueira colocada no ponto H_B , provocada pela alteração do nível d'água nesse ponto. Data: 20-05-2007. Foto do autor.

4.1.3 Produção de Sedimentos

A coleta de amostras para a análise de concentração de sedimentos em riachos começou a ser realizada automaticamente por meio da instalação da Estação Sedimentológica em junho de 2005.

Inicialmente, a estação localizava-se a jusante da calha Parshall, entretanto em outubro de 2006 o instrumento foi reinstalado a montante da calha para evitar qualquer influência na concentração de sedimentos devido à mudança no escoamento proporcionada pelo estrangulamento da calha.

A estação é composta por uma torre de coleta automática de sedimentos do ramo ascendente do hidrograma. Essa torre possui garrafas de 250 ml dispostas a cada 7 cm, no total de 16

garrafas. A água é coletada entrando nas garrafas através do tubo amarelo (ver Figuras 4.20b e 4.20c) e o ar que estava armazenado sai pelo sistema de respirador (tubos transparentes) que possui contato com a atmosfera no topo da torre. Nas Figuras 4.20 são apresentados detalhes da estação.



(A) Torre de coleta automática de sedimentos no ramo ascendente do hidrograma instalada, inicialmente, a jusante da calha Parshall. (B) Garrafas de 250 ml dispostas a 7 cm, no total de dezesseis (16).



(C) A água entra na garrafa através do tubo amarelo e o ar que estava armazenado sai pelo sistema de respirador (tubos transparentes) que possui contato com a atmosfera no topo da torre. (D) Torre de coleta de sedimentos re-instalada a montante da calha Parshall desde outubro de 2006.

FIGURA 4.20 – Torre de coleta automática de sedimentos do ramo ascendente do hidrograma. Figuras 4.20a a 4.20c: data em 21-06-2005 e Figura 4.20d: data em 20-05-2007. Figura 4.20d: Foto do autor

As coletas das amostras são realizadas logo após os eventos chuva-deflúvio para realização, a *posteriori*, de análise de concentração de sólidos suspensos totais em laboratório. Neste trabalho considerou-se a concentração de sedimentos suspensos igual à de sólidos suspensos totais, que é a massa de sólidos retidos por filtração (diâmetro de filtro de 0,54 μm), após de evaporação da água da amostra e pesagem do resíduo sólido, e dividido pelo volume da amostra (CANTÓN et al., 2001; CHELLA et al., 2005).

No ponto de estrangulamento da calha Parshall são realizadas também coletas manuais de sedimentos logo após os eventos, fazendo a re-suspensão de sedimentos antes da realização da coleta somente quando não há mais escoamento (apenas água armazenada na depressão da calha).

Considera-se que a concentração de sedimentos na EF1 é representativa da contribuição de toda a BEA, pois a seção de coleta controla 60% da bacia (ver capítulo 5.1) e situa-se muito próxima do reservatório. Considera-se, ainda, que a concentração de sedimentos suspensos representa o valor médio do evento no momento da coleta manual.

Durante esse trabalho, para se ter acesso a uma maior informação da concentração de sedimentos em riachos da BEA e avaliar as hipóteses acima, instalaram-se em março de 2007 três outros pontos de coleta, sendo um na confluência dos dois riachos principais, um no segundo maior riacho da BEA e um no riacho principal, mas a montante da calha Parshall.

As coletas na confluência dos riachos principais são realizadas manualmente durante o evento chuva-deflúvio. Para que as medições nas novas seções pudessem ser realizadas, foi suficiente realizar limpeza da vegetação no leito do riacho (ver Figura 4.21b). Na Figura 4.21a é apresentado o local definido para as coletas.



(A) Leito da confluência dos riachos, pela vegetação (B) Local de coleta manual de sedimentos, depois da rasteira identifica-se a esquerda a entrada do riacho principal e a direita a entrada do riacho secundário.

FIGURA 4.21 – Local de coleta de amostras de sedimentos na confluência dos dois riachos principais da BEA. Data: 23-03-2007. Foto do Autor.

Nos outros pontos foram instaladas duas torres de coleta automática de sedimentos (coletores de sedimentos) do ramo ascendente do hidrograma elaboradas *in loco*. O material utilizado foi: garrafas PET, madeira, mangueira, canudos, arame, pregos e massa *epoxi*. As torres possuem quatro garrafas: a menor com furo a 10 cm do chão, e as três maiores com furos dispostas a cada 7 cm.

A garrafa menor possui como respiradores canudos e as demais possuem como respiradores mangueiras, ambos os respiradores foram presos nas garrafas e na estrutura de madeira com pregos, arames e massa *epoxi*, como também as próprias garrafas de coleta. Nas Figuras 4.22 e 4.23 são apresentados detalhes das torres instaladas no segundo maior riacho da BEA e no riacho principal, respectivamente.

As coletas das amostras são realizadas logo após os eventos chuva-deflúvio e produção de sedimentos para realização *a posteriori* de análise de concentração de sólidos suspensos totais em laboratório.



(A) Torre de coleta de sedimentos instalada no leito do segundo maior riacho da BEA, sendo a Figura no sentido do fluxo.



(B) Vista lateral com detalhes das garrafas presas à estrutura de madeira, como aos respiradores.



(C) Detalhe dos furos realizados a cada 7 cm. Os furos possuem diâmetros em torno de 1 cm.



(D) Vista frontal com detalhe da primeira garrafa com furo a 10 cm da superfície do solo, sendo a Figura no sentido contra-fluxo.

FIGURA 4.22 – Torre de coleta automática de sedimentos do ramo ascendente do hidrograma elaborada em *in loco*, instalada no segundo maior riacho da BEA. Data: 07-03-2007. Foto do Autor.



(A) Material para instalação *in loco* da torre de coleta automática de sedimentos.



(B) Torre de coleta de sedimentos instalada no leito do riacho principal, sendo a Figura no sentido do fluxo.



(C) Detalhes dos respiradores presos na estrutura de madeira com arame.



(D) Vista frontal com detalhe da primeira garrafa com furo a 10 cm da superfície do solo, sendo a Figura no sentido contra-fluxo.

FIGURA 4.23 – Torre de coleta automática de sedimentos do ramo ascendente do hidrograma elaborada *in loco*, instalada no riacho principal da BEA. Data: 07-03-2007. Foto do Autor.

4.1.4 Banco de Dados Hidrológicos e Síntese do Monitoramento

O Banco de Dados Hidrológicos foi desenvolvido por Costa, A. (2006a) no intuito de facilitar o armazenamento e o tratamento de dados coletados, como o próprio monitoramento da BEA. O banco foi feito em ambiente *Microsoft Access*, que mostrou ser uma ferramenta eficiente para o propósito e com portabilidade suficiente, além de possuir interfaces com outros programas usuais em engenharia e espaço para codificação de algoritmos em linguagem *Visual Basic*.

Utilizando-se o banco de dados hidrológicos, o processamento de dados da BEA foi realizado da seguinte forma:

1. Coleta de dados brutos das estações.
2. Arquivamento temporário em computador.
3. Arquivamento em escritório de dados brutos.
4. Entrada e armazenamento de dados brutos no banco.
5. Tratamento de dados brutos e armazenamento final no banco.

Cada estação acima listada possui pastas específicas de acordo com o que está sendo monitorado e uma pasta com as coordenadas de cada estação, que possibilitou a construção de um mapa das estações que teve como base também a nova delimitação da BEA proposta neste trabalho.

Nas Figuras 4.24 e 4.25 são apresentados respectivamente o ambiente do banco de dados hidrológicos da Bacia Experimental de Aiuaba e um exemplo de como os dados são armazenados (Estação Limnimétrica, referente às régua limnimétricas).

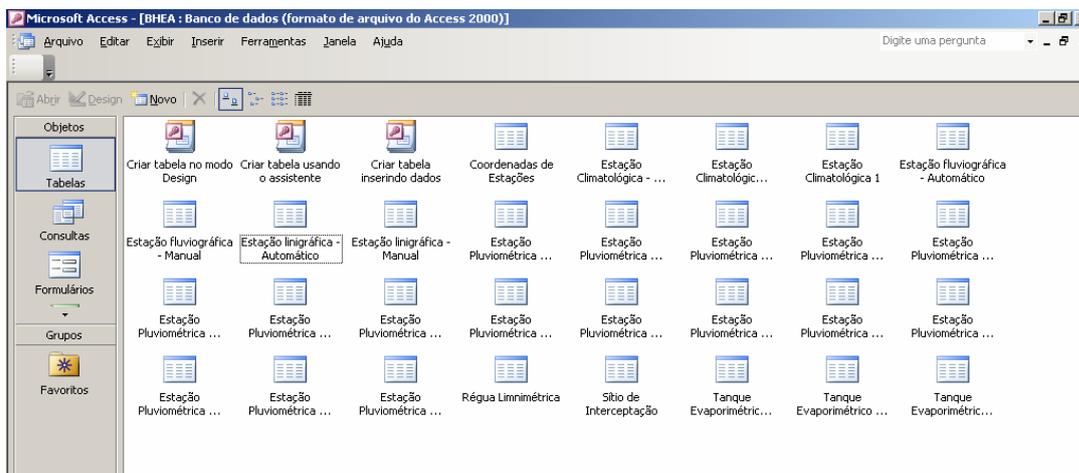


FIGURA 4.24 – Ambiente do Banco de Dados Hidrológicos da Bacia Experimental de Aiuaba.

Data	Hora	Nº Regua	Registro (m)	Nível d'água (m)
01/03/03	700	3	0.18	3.78
02/03/03	1400	3	0.15	3.75
03/03/03	1100	3	0.14	3.74
04/03/03	1100	3	0.15	3.75
05/03/03	1100	3	0.14	3.74
06/03/03	700	3	0.12	3.72
07/03/03	700	3	0.11	3.71
08/03/03	700	3	0.11	3.71
09/03/03	700	3	0.10	3.70
10/03/03	1700	3	0.09	3.69

FIGURA 4.25 – Exemplo de arquivo com os dados armazenados da régua limnimétrica (Estação Limnimétrica).

Nesta pesquisa, foi realizado o monitoramento da BEA durante um mês contínuo no período chuvoso de 2007, além das campanhas mensais periódicas. Em síntese realizou-se, na tarefa de medição e monitoramento:

- a. Manutenção e instalação de instrumentos.
- b. Coleta de dados hidrológicos.
- c. Gerenciamento do banco de dados.
- d. Avaliação de hipóteses da concentração de sedimentos suspensos de eventos na BEA.
- e. Elaboração de mapa das estações.

4.3 Avaliação de Processos

4.3.1 Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica

O deflúvio afluente à bacia hidráulica da BEA foi estimado aplicando-se a equação do balanço hídrico em reservatórios superficiais, em que se avaliaram as trocas hídricas no exutório da BEA (MOLLE, 1989; CAMPOS, 1996; VALLET-COULOMB et al., 2001; MOTZ; SOUZA; ANNABLE, 2001; ARAÚJO, J. et al., 2004a). Detalhando-se a equação 2.1, tem-se:

$$\frac{dS}{dt} = (Qa + Qpl + Qrs) - (Qeo + Qi + Qu + Qs) \quad (4.3)$$

em que Qa é o deflúvio afluente, Qpl a vazão de precipitação direta sobre o lago, Qrs a vazão de recarga subterrânea, Qeo a vazão de evaporação, Qi a vazão de infiltração, Qu vazão de uso d'água ou retirada d'água e Qs a vazão de sangria.

Outra forma de escrever a equação 4.3 é:

$$\int \Delta H.A(t).dt = \left(\int Qa.dt + \int Pl.A(t).dt + \int Rs.A(t).dt \right) - \left(\int Eo.A(t).dt + \int I.A(t).dt + \int U.A(t).dt + \int Qs.dt \right) \quad (4.4)$$

em que A é a área da bacia hidráulica e Pl , Rs , Eo , I e U são as lâminas correspondentes às vazões da equação 4.8. e ΔH é a diferença da lâmina d'água do reservatório. Considerando-se H , Pl , Rs , Eo , I e U constantes durante o intervalo incremental e dividindo-se todos os termos por $\int dt$, tem-se:

$$\Delta H \cdot \bar{A} = (\bar{Qa} + P\bar{A} + Rs\bar{A}) - (Eo\bar{A} + I\bar{A} + U\bar{A} + \bar{Qs}) \quad (4.5)$$

em que \bar{A} é a área média durante o intervalo dt equação 4.5 torna-se:

$$\bar{Qa} = (\Delta H - Pl - Rs + Eo + I + U + \bar{Qs}/\bar{A}) \cdot \bar{A} \quad (4.6)$$

em que \bar{Qa} é o deflúvio afluente médio (L/s), ΔH a diferença da lâmina d'água (mm/s) medida na estação limnimétrica, Pl a precipitação direta sobre o lago medida (mm/s) na EP1, Rs a recarga subterrânea (mm/s), Eo a evaporação (mm/s), I a infiltração (mm/s), U o uso d'água (mm/s) estimado por Araújo, J. et al. (2004a), \bar{Qs} a vazão de sangria (L/s) e \bar{A} a área média (m²) estimada pela relação área inundada *versus* altura do nível d'água (ARAÚJO, J. et al., 2004a). Com base na equação 4.6 e nas medidas de monitoramento das variáveis do lado direito da equação pode-se avaliar a vazão afluente ao reservatório. Mungabe, Hodnett e Senzanje (2007) utilizaram processo semelhante para obtenção da vazão afluente a um reservatório.

A evaporação potencial foi estimada por meio do método combinado ou método de Penman, de acordo com Chow, Maidment e Mays (1988):

$$Eo = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Er + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} Ea \quad (4.7)$$

em que Eo é evaporação (mm/s), Δ o gradiente da pressão do vapor de saturação (Pa/°C), γ a constante psicométrica (Pa/°C), Er evaporação (mm/s) do balanço de energia e Ea evaporação (mm/s) do método aerodinâmico.

Er foi determinado da seguinte forma:

$$Er = \frac{Rn}{\lambda \cdot \rho_w} \cdot 1000 \quad (4.8)$$

em que Rn é a radiação líquida absorvida pela superfície da água (W/m^2), λ o calor latente de vaporização da água (J/kg) e ρ_w a densidade da água (kg/m^3). Rn foi determinado de acordo com Shuttleworth (1993), considerando-se que o fator de nebulosidade (*factor cloudiness*) variou entre 0,9 e 0,1 (regiões semi-áridas) e que o albedo da água pode ser admitido como 0,05.

Ea foi determinado da seguinte forma:

$$Ea = \frac{\rho_{AR} \cdot c_p \cdot D}{\lambda \cdot \gamma \cdot \rho_w \cdot r_a^a} \cdot 1000 \quad (4.9)$$

em que ρ_{AR} é a densidade do ar (kg/m^3), c_p calor específico ($J/kg^{\circ}C$), D o déficit da pressão de vapor e r_a^a a resistência aerodinâmica (s/m). O valor de r_a^a foi estimado conforme em Allen et al. (1998).

Os dados climatológicos utilizados para solução da equação 4.7 foram temperatura ($^{\circ}C$) e umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s), radiação de onda-curta (W/m^2) e, quando possível, pressão atmosférica (hPa), sendo obtidos das estações climatológicas descritas no tópico 4.1.1 e da estação climatológica do município de Tauá, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os anos de 2003 e 2004.

No entanto, não foi possível avaliar a validade da evaporação potencial como evaporação real no lago do exutório da BEA, pois as trocas subterrâneas (R_s e I) se dão ao mesmo tempo em que a evaporação ocorre.

Assim, em dias sem chuvas, onde não há os termos de entrada, como precipitação ou deflúvio afluente, e quando o açude não está sangrando, foi possível avaliar o conjunto: evaporação, recarga subterrânea e infiltração, fazendo:

$$\Delta H + E_o = R_s - I \quad (4.10)$$

Já a vazão de sangria foi estimada para o período chuvoso de 2004, único ano em que o açude da BEA sangrou. Para tanto, necessitou-se aproximar uma equação do vertedouro (como em Araújo, J. et al., 2004a):

$$Q_s = k \cdot \int y^{0.5} \cdot w(y) \cdot dy \quad (4.11)$$

em que k é um coeficiente do vertedouro, y a lâmina d'água de sangria e $w(y)$ a largura do vertedouro em função da lâmina de sangria. Assim, estimou-se os valores do parâmetro k e de $w(y)$ para se estimar a vazão de sangria diretamente pela diferença entre a altura d'água e o nível máximo de armazenamento (4,536 m).

Contudo, não se tinha nenhum dado de vazão de sangria medida, dessa forma utilizou-se o seguinte procedimento para determinar o parâmetro k :

- a. Levantaram-se três seções no canal do vertedouro (a seção de controle e duas a jusante) e o perfil horizontal entre essas seções.
- b. Identificaram-se os níveis de máxima cheia observada em campo nessas seções pelos operadores da instrumentação da BEA.
- c. As seções foram transformadas em seções trapezoidais equivalentes e determinou-se a função $w(y)$ para a seção de controle.
- d. Utilizou-se a equação da energia (ver CHOW, 1973) para se estimar a vazão de sangria máxima ($Q_{\text{máx}}$) que passou nos dois trechos entre as três seções levantadas no canal do vertedouro:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{S_o - Q_{\text{máx}}^2 / C^2 A_{\text{SEÇÃO}}^2 Rh}{1 - \alpha Q_{\text{máx}}^2 / g A_{\text{SEÇÃO}}^2 Dh} \quad (4.12)$$

em que Δy é a diferença da altura d'água entre as seções (m), Δx a distância horizontal entre as seções (m), S_o a declividade (-), $A_{\text{SEÇÃO}}$ a área média entre as seções (m^2), C o coeficiente de Chézy (-), Rh o raio hidráulico (m), g a aceleração da gravidade (m/s^2), Dh a altura hidráulica (m) e α o coeficiente de Coriolis (adotou-se igual a unidade).

Como se tem uma equação e duas incógnitas ($Q_{\text{máx}}$ e C), aplicaram-se os seguintes métodos para se obter o valor da vazão $Q_{\text{máx}}$:

d.1. Utilizou-se uma formulação empírica-qualitativa (COWAN, 1956 apud CHOW, 1973) para a determinação dos coeficientes de *Manning* (n) nos dois trechos do canal do vertedouro, que foram usados para a estimativa *a posteriori* do coeficiente de *Chézy* em diversas formulações (PAVLOVSKII; MANNING; CHOW; GANGUILLET; KUTTER apud CHOW, 1973). Entrando na equação 4.12 com o coeficiente C e com a razão $\Delta y/\Delta x$ medida em campo, obteve-se o valor de $Q_{\text{máx}}$ para o primeiro trecho, no segundo trecho entrou-se com o valor de $Q_{\text{máx}}$ (continuidade) e do coeficiente C , obtendo-se $\Delta y/\Delta x$ para este trecho. Os valores do coeficiente C de uma mesma formulação que apresentaram o menor erro absoluto entre o $\Delta y/\Delta x$ estimado e o $\Delta y/\Delta x$ medido em campo para o segundo trecho foram os escolhidos para a determinação da vazão de sangria máxima observada ($Q_{\text{máx}}$).

d.2. Para o primeiro trecho formulou-se um problema de otimização em que a função objetivo foi:

$$\text{Minimizar: } \textit{Erro} = \left| \frac{\Delta y}{\Delta x} \textit{estimado} - \frac{\Delta y}{\Delta x} \textit{medido} \right| \quad (4.13)$$

sujeito aos valores “ C ” e “ $Q_{\text{máx}}$ ” positivos e não nulos. Esse problema foi tratado como de programação não-linear e solucionado pelo Método do Gradiente Reduzido Generalizado (VANDERPLAATS, 1984). O valor de $Q_{\text{máx}}$ encontrado foi utilizado para o segundo trecho, depois se aplicou a mesma formulação de otimização do primeiro para o segundo trecho, mas com o valor de $Q_{\text{máx}}$ fixo, e achou-se um valor do coeficiente C para este trecho. Os resultados dos valores do coeficiente C dos trechos e da vazão ($Q_{\text{máx}}$) foram comparados com os resultados do método descrito em d.1.

e. Com o valor da vazão de sangria máxima estimada e a função $w(y)$ foi possível por meio da equação 4.11 determinar o valor do parâmetro k .

Neste trabalho, a consistência do método do balanço hídrico para o acesso ao deflúvio afluente à bacia hidráulica do exutório da BEA foi avaliada por meio da estimativa do erro

global para todo o período chuvoso e de testes de consistência. Compararam-se também os resultados do balanço hídrico entre intervalos de tempo diferentes (horário e diário). Para tanto, escolheu-se o período chuvoso do ano de 2006 para esta avaliação.

O erro global foi estimado através da seguinte equação:

$$E_{global} = \Delta H_{OBS} - (\sum E_{EST} - \sum S_{EST}) \quad (4.14)$$

em que E_{global} é o erro global para todo o período chuvoso (mm), ΔH_{OBS} a diferença de nível entre a altura do nível d'água do açude no início e no final do período chuvoso (mm), $\sum E_{EST}$ são todas as entradas estimadas ao açude (mm) e $\sum S_{EST}$ todas as saídas estimadas ao açude (mm).

Considerou-se, conservadoramente, que todo o E_{global} se deu nos intervalos de tempo em que ocorreu precipitação sobre o lago do açude (N_p), então se avaliou, no final, o erro médio em cada intervalo ($erro_{int}$) em que ocorreram entradas superficiais ao açude:

$$erro_{int} = \frac{E_{global}}{N_p} \quad (4.15)$$

Os testes de consistência do balanço hídrico no passo horário foram realizados levando-se em conta os seguintes pontos:

- a. A evaporação (E_o), a infiltração (I) e a recarga subterrânea (R_s) na equação 4.6 iguais a zero, tendo como hipótese que as entradas por precipitação e deflúvio afluente são muito maiores que a evaporação e as trocas hídricas subterrâneas durante o evento chuva-deflúvio.
- b. A área média no intervalo horário igual à área final do intervalo e, depois, igual à área inicial do intervalo, para avaliação dos efeitos no deflúvio afluente devido à aproximação numérica da área média.
- c. Precipitação sobre o lago do açude igual a zero, para avaliação desse componente no balanço hídrico.
- d. Precipitação sobre o lago igual à medição na EP2 e os termos E_o , I e R_s iguais a zero, para avaliação na estimativa do deflúvio afluente quando não há dados consistentes de climatologia e da EP1.

Também, os testes de consistência dos itens “a” e “c” supracitados foram realizados para o balanço hídrico com passo diário.

E, finalmente, compararam-se os resultados do balanço hídrico entre duas fontes de medidas diferentes do nível d’água do açude: horário a partir de dados automáticos (precisão de 1 mm) e diário a partir de dados manuais (precisão de 1 cm). No período entre 2003 e 2007 em que ocorreram coincidência entre medidas automáticas e manuais, o deflúvio afluente diário foi avaliado entre as duas fontes de medidas do nível d’água.

4.3.2 Eventos Chuva-Deflúvio e Produção de Sedimentos

Os procedimentos mencionados no item 4.3.1, assim como a medição de: precipitação, interceptação, umidade do solo, concentração de sedimentos suspensos, deflúvio na Estação Fluviométrica 1 (EF1) em 2007 e variáveis climatológicas; permitiram avaliar processos hidrológicos em eventos chuva-deflúvio e produção de sedimentos, em duas escalas temporais: diária e por evento.

A avaliação por evento foi realizada quando se obteve resultado consistente do deflúvio afluente à bacia hidráulica no passo horário e informação de pelo menos duas estações pluviométricas.

Ainda, nessa avaliação foram estimados os seguintes parâmetros: (i) precipitação média e sua duração, intensidade média, intensidade máxima em 5 minutos, intensidade máxima em 30 minutos e condição antecedente de umidade do solo, a partir da EP1, EP2 e EP3 e do método do *polígono de Thiessen* para estimativa de valores médios para a BEA; (ii) deflúvio no exutório da BEA e sua duração, o deflúvio de pico e o coeficiente de *runoff*; (iii) Número de Curva (CN) para condições *AMC II*, pelo método de SCS (ver CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Para a estimativa do parâmetro CN desprezou-se a contribuição do deflúvio subsuperficial na formação do escoamento.

Quando possível, foi estimada a interceptação da chuva durante o evento e sua porcentagem em relação à precipitação média. No entanto, a interceptação foi monitorada a passo diário,

assim admitiu-se, como hipótese, linearidade entre interceptação sobre precipitação diária e interceptação sobre precipitação do evento, já que a maior parte da precipitação diária é devido a um evento de chuva. Dessa forma, utilizou-se a seguinte equação para determinação da interceptação do evento:

$$Int_{evento} = Int_{diária} \frac{P_{evento}}{P_{diária}} \quad (4.16)$$

em que Int_{evento} é a interceptação do evento (mm), P_{evento} a precipitação do evento (mm), $Int_{diária}$ a interceptação medida no passo diário (mm) e $P_{diária}$ a precipitação medida no passo diário (mm).

Em alguns eventos também foi possível determinar valores médios de variáveis climatológicas: temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação incidente e pressão atmosférica a partir dos dados da Estação Climatológica da FUNCEME próxima à BEA.

A produção de sedimentos em eventos chuva-deflúvio na BEA foi determinada considerando-se concentração média de sedimentos suspensos durante o deflúvio igual à concentração média de sedimentos transportados, desprezando-se o transporte de sedimentos de fundo. Assim, utilizou-se a seguinte relação:

$$SY = \frac{\int SedT \cdot Qa \cdot dt}{A_{BACIA} \int dt} \quad (4.17)$$

em que SY é a produção de sedimentos (kg/km^2) por unidade de tempo, $SedT$ a concentração média de sedimentos transportados (kg/L), Qa a vazão afluente (L/s) e A_{BACIA} a área da BEA (km^2).

4.4 Síntese Hidrológica

Realizou-se uma síntese hidrológica da BEA quantificando a precipitação média e a lâmina escoada a passo mensal e anual, em aproximadamente cinco anos de monitoramento (fevereiro de 2003 a abril de 2007). Buscaram-se relações entre precipitação média e lâmina escoada, como também os valores médios e os coeficientes de variação dessas variáveis.

Comparou-se esses resultados da BEA com as sínteses hidrológicas anuais de bacias experimentais e representativas do semi-árido nordestino descritas em Cadier (1994).

Quando possível, determinou-se também a produção de sedimentos nos passos mensal e anual, a partir dos resultados da avaliação do processo chuva-deflúvio e da produção de sedimentos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da Fisiografia

A delimitação da BEA e o traçado da sua rede de drenagem são expostos na Figura 5.1, assim como a delimitação da sub-bacia controlada pela Estação Fluviométrica 1 (EF1) e as estações de monitoramento hidrológico. Na Figura 5.1 também é mostrado os dois riachos principais da BEA, destacados da hidrografia da bacia com linhas de espessura maior. No riacho principal estão localizados a EF1, a ES e o CS2, e no riacho secundário está localizado o CS3.

De acordo com apresentado na Figura 5.1, verificou-se que as maiores elevações na BEA encontram-se próximas ao centro geométrico da bacia, que fazem parte da Serra do Rosilho que é sustentada pelos quartzitos (capítulo 3.5). Tanto o riacho principal quanto o secundário cortam esta Serra na cota 560 m, aproximadamente.

A montante da Serra do Rosilho (litotipo Suíte Granitóide Serra do Deserto) as declividades são mais acentuadas, e a jusante as declividades são mais aplainadas (Formação Santarém).

Como observado também por Veríssimo (2007), o rio principal configura um padrão tipicamente retangular (Figura 5.1), devido às estruturas dúcteis e rúpteis que controlam a rede de drenagem da BEA (capítulo 3.5). Percebe-se também pelo mapa da Figura 5.1, um padrão fortemente estruturado e ortogonal da rede de drenagem, condicionada por fraturas e/ou falhas com orientação N-S e E-W (capítulo 3.5).

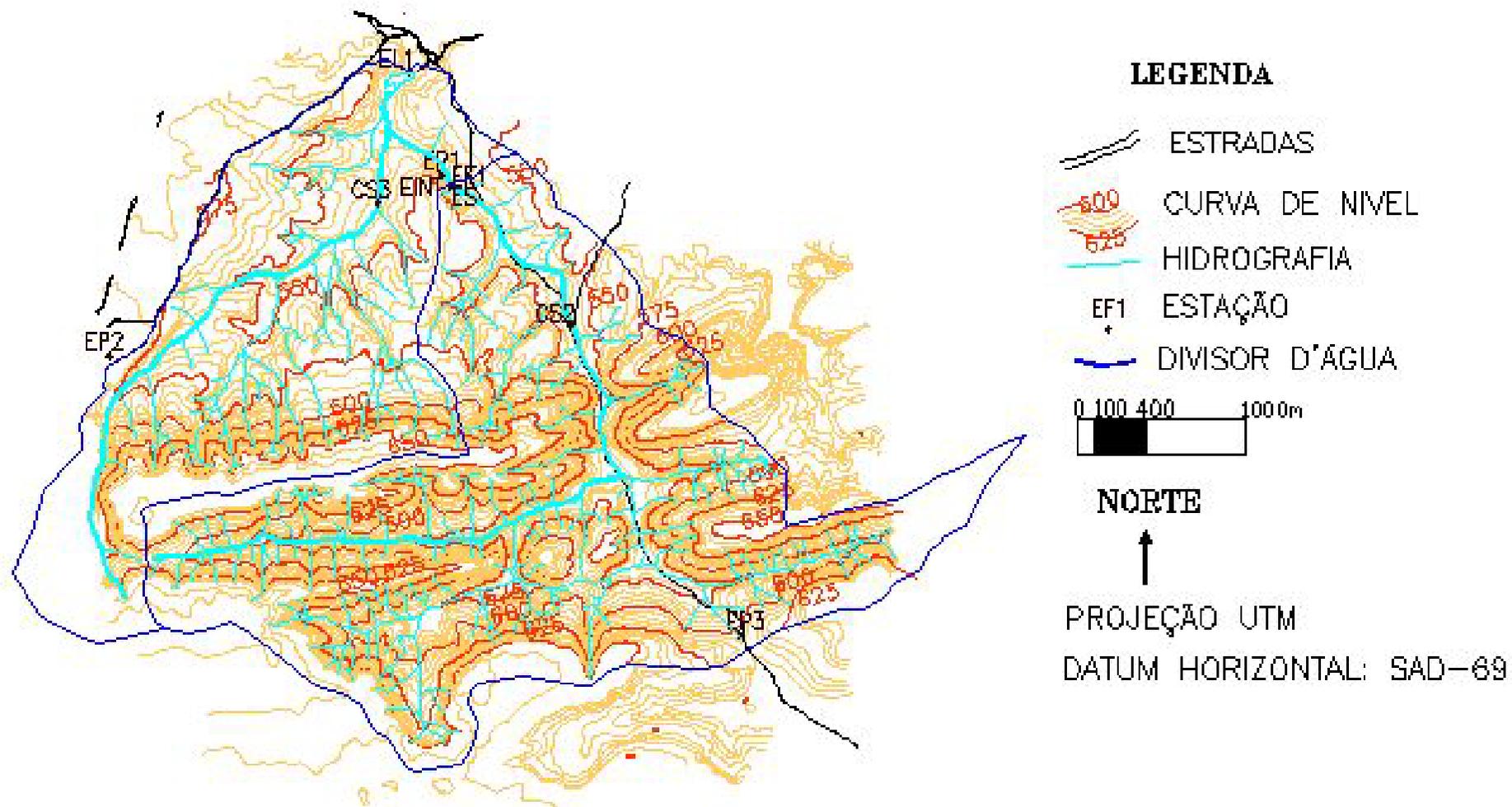


FIGURA 5.1 – Delimitação da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) e da Sub-bacia da Estação Fluviométrica 1 (SB-EF1), com as demais estações de monitoramento hidrológico. Os dois riachos principais aparecem destacados da hidrografia geral com linhas de espessura maior. EINT é a Estação de Interceptação, CS o Coletor de Sedimentos, ES a Estação Sedimentológica, EL a Estação Limnimétrica e EP a Estação Pluviométrica.

Na Tabela 5.1 é apresentado os parâmetros fisiográficos estimados para a BEA e para a Sub-bacia da EF1 (SB-EF1).

TABELA 5.1 – Parâmetros Fisiográficos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) e da Sub-bacia controlada pela Estação Fluviométrica 1 (SB-EF1).

Elemento da Fisiografia	Parâmetro	BEA	SB-EF1	Unidade	
Área	Área	12,05	7,54	km ²	
	Perímetro	17,24	16,03	km	
Forma Superficial	Coefficiente de Compacidade	1,4	1,6	(-)	
	Fator de Forma	0,3	0,3	(-)	
Relevo	Declividade média da bacia ¹	19,4	21,7	%	
	Altitude				
	Máxima ¹	670	(-)	m	
	Mínima ¹	630	(-)	m	
	Média	594	(-)	m	
	Mediana	589	(-)	m	
Rede de Drenagem	Comprimento total dos rios ²	52,30	34,33	km	
	Densidade da rede de Drenagem	4,3	4,6	km/km ²	
	Extensão média do Escoamento Superficial	58	55	m	
	Rios principais	Principal	Secundário	Principal	
	Comprimento	6,218	3,776	5,307	km
	Declividade média dos rios	10	17	12	m/km
	Sinuosidade	1,9	1,1	1,9	(-)

¹Valores estimados por Araújo, J. et al. (2004a), exceto a declividade média da SB-EF1.

²Não se consideraram os riachos de primeira ordem, pois existe um alto grau de subjetividade no seu traçado, pois são temporários.

A SB-EF1 controla mais de 60% da BEA, possuindo similares características fisiográficas com pequenas diferenças entre as declividades das bacias e dos rios principais, pois existe a tendência de aplainamento do terreno da BEA a jusante.

Bacias experimentais do semi-árido nordestino (RIGHETTO, 2004a; CADIER, 1994) de área entre 4,3 e 20,5 km² possuem valor médio de densidade de rede de drenagem de 2,09 km/km² com máximo de 5,42 km/km² e mínimo de 0,62 km/km², então a BEA possui elevado valor de densidade de rede de drenagem (o dobro da média de outras bacias).

Nas Figuras 5.2 e 5.3 são apresentados o perfil de declividades e a altitude dos riachos principal e secundário, respectivamente.

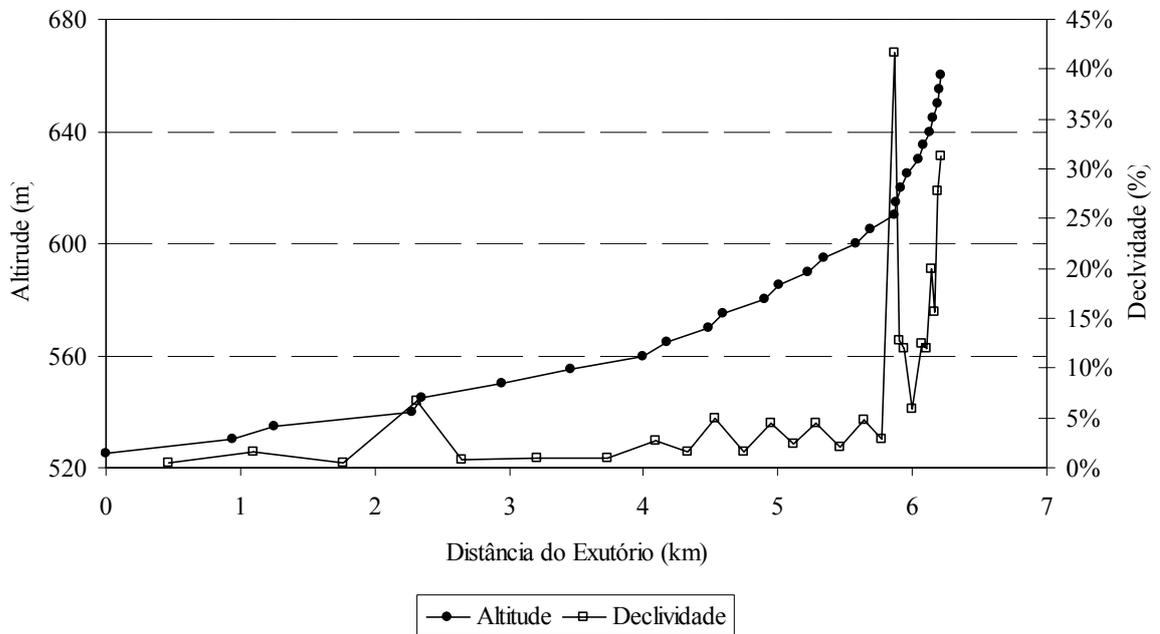


FIGURA 5.2 – Perfil de declividades e altitude do riacho principal da BEA.

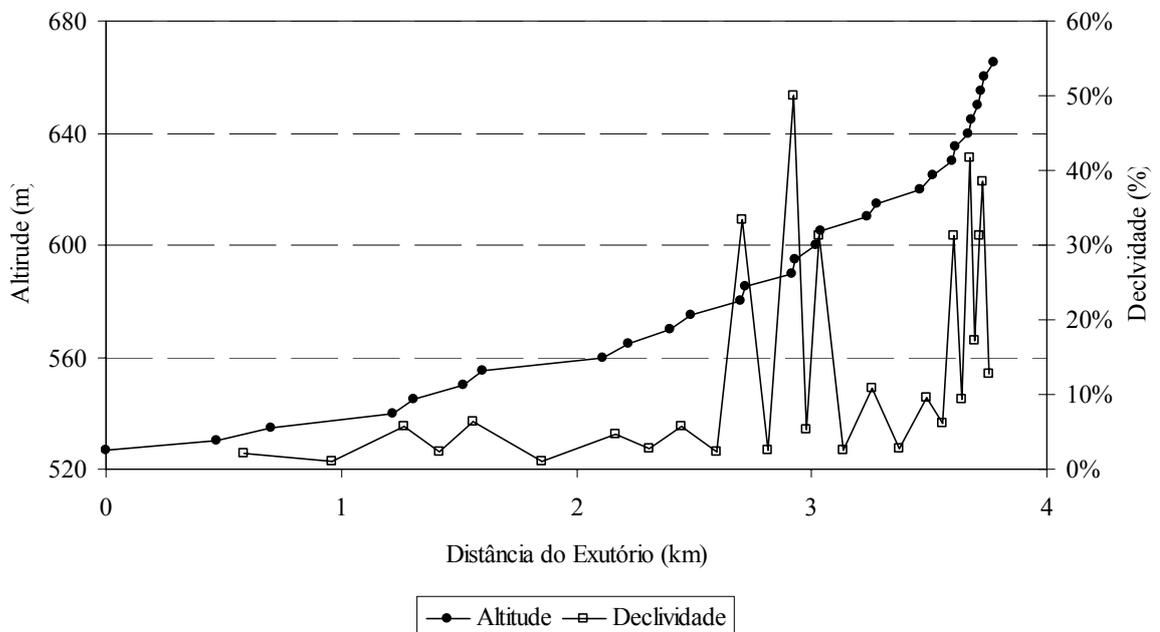


FIGURA 5.3 – Perfil de declividades e altitude do riacho secundário da BEA.

Picos de declividade são observados nos dois riachos, sem padrões bem definidos e com coeficientes de variação de 1,1 e de 1,2 de declividades por trecho para o riacho secundário e

o principal, respectivamente. Entretanto, em ambos os casos, existe uma queda da declividade intercalada por picos de declividade, seguida por nova queda de declividade até o exutório.

Na Figura 5.4 é apresentada a localização das seções dos riachos (PR) caracterizados através de perfis e análise de solos de seus leitos, sendo três seções no riacho principal e uma no secundário.

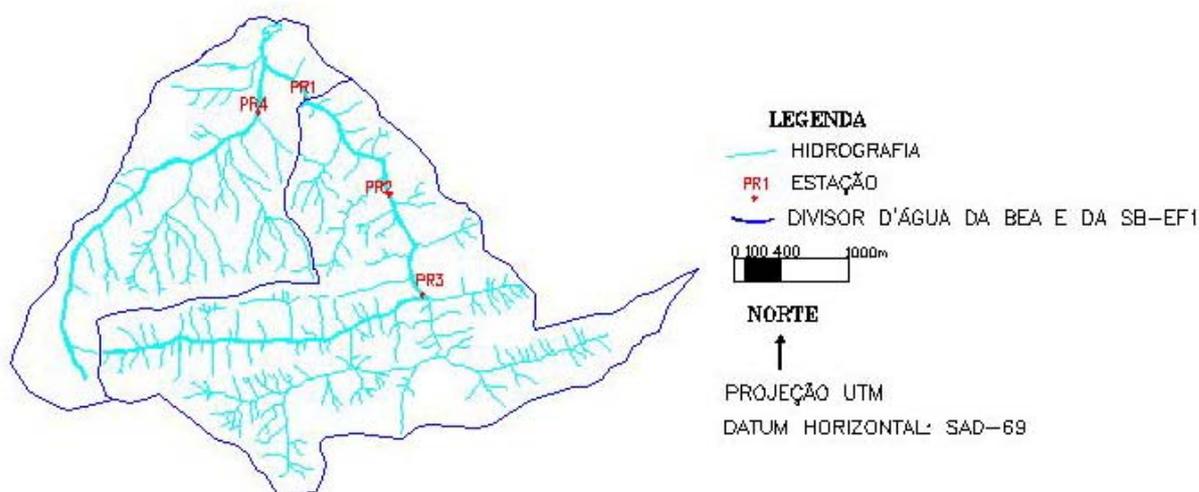


FIGURA 5.4 – Localização dos pontos de coleta de amostras para caracterização dos solos de leitos de riachos na BEA e na SB-EF1.

Nas Tabelas 5.2 e 5.3 são apresentadas propriedades dos solos do leito dos riachos, em que ρ_p é a massa específica real, ρ_b a massa específica aparente seca, n a porosidade, K_s a condutividade hidráulica saturada (mm/h). A granulometria foi definida segundo a classificação da *USDA* (apud HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993).

TABELA 5.2 – Granulometria do solo do leito dos riachos de acordo com a classificação da *USDA* (apud HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993). BEA, 2007.

Ponto	Prof.	Granulometria (<i>USDA</i>)					Classificação
		Argila (%)	Silte (%)	Areia Fina (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)	
PR1	0-20 cm	20	35	9	33	3	<i>silte</i>
PR2	0-20 cm	13	29	10	47	1	<i>silte arenosa</i>
PR3	0-20 cm	14	26	20	39	1	<i>silte arenosa</i>
PR4	0-20 cm	12	26	12	48	2	<i>silte arenosa</i>

TABELA 5.3 – Densidade real (D_p), massa específica aparente seca (ρ_b), porosidade (n) e condutividade hidráulica saturada (K_s) do solo do leito dos riachos da BEA, 2007.

Ponto	Prof.	D_p (-)	ρ_b (g/cm ³)	n_p (-)	K_s (mm/h)	Classificação da condutividade hidráulica ^(*)
PR1	0-20 cm	2,39	1,53	0,36	54,6	alta
PR2	0-20 cm	2,48	1,59	0,36	0,32	muito baixa
PR3	0-20 cm	2,35	1,36	0,42	5,23	moderada
PR4	0-20 cm	2,35	1,44	0,39	203,1	muito alta

^(*) (ver HAAN; BARFIELD; HAYES, 1993).

Os solos do leito dos riachos apresentaram valores de condutividade hidráulica saturada K_s diferenciados e nenhuma relação direta com a composição granulométrica. Em relação às amostras da primeira camada de solos das encostas (capítulo 3.4), os solos do leito apresentaram em média: duas vezes maior teor de argila, valor próximo do teor de silte, 40% do teor de areia fina e 1,5 vezes maior teor de areia.

Desprezando-se a produção de sedimentos no leito dos riachos, as relações entre a granulometria das encostas e a dos leitos dos riachos podem estar indicando uma maior taxa de exportação de sedimentos entre silte e areia fina, tendendo para a última. E, dessa forma, pode estar ocorrendo também processo de deposição já na rede de drenagem de argila e de areia.

Na Figura 5.5 são apresentados os perfis das seções dos riachos correspondentes aos pontos PR1, PR2, PR3 e PR4 (Figura 5.4).

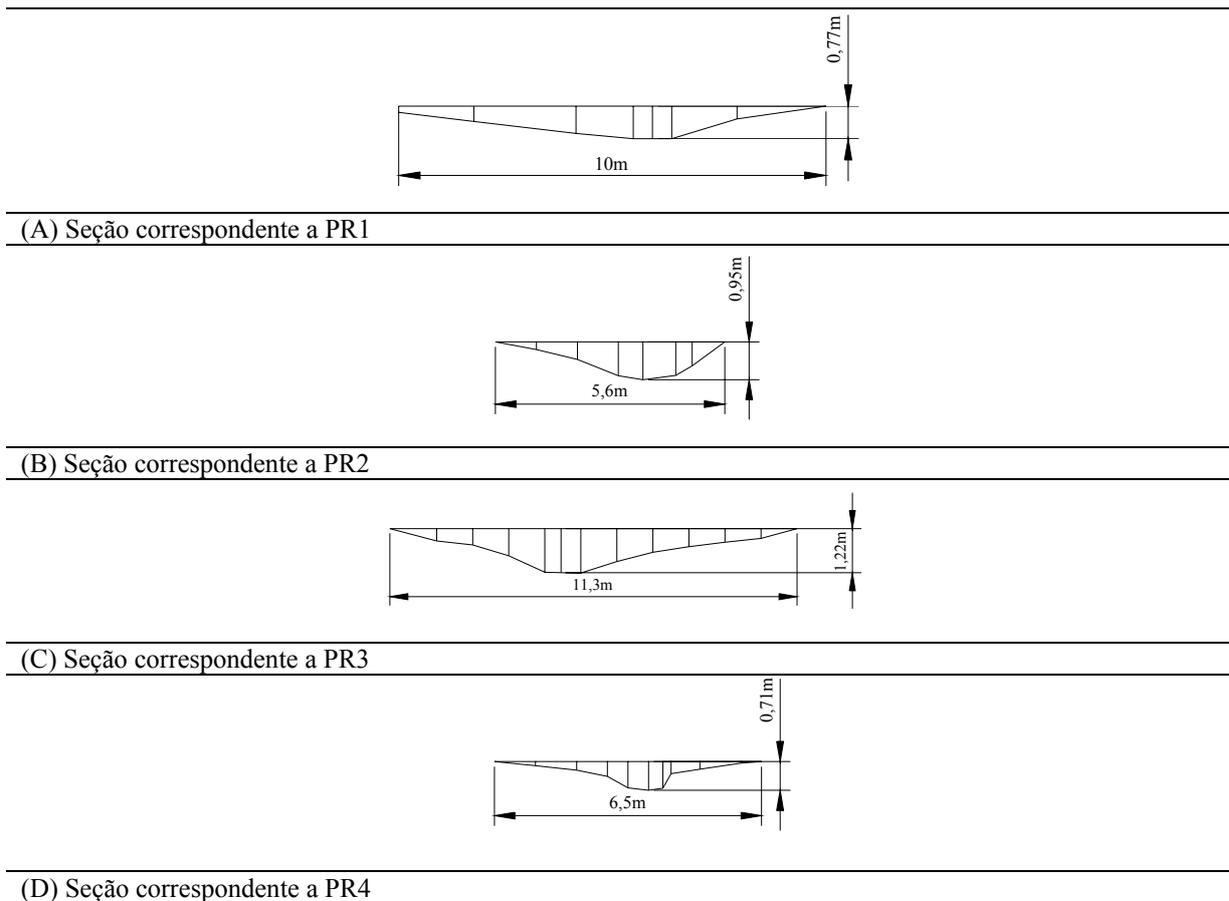


FIGURA 5.5 – Perfis das seções dos riachos principal e secundário da BEA.

5.2 Medição e Monitoramento

5.2.1 Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica

Na Figura 5.6 são mostrados os resultados do monitoramento do nível d'água do reservatório (07/02/2003 a 30/04/2007) e da precipitação sobre o lago do reservatório (9/1/2003 a 30/04/2007). Os dados de precipitação utilizados foram da EP1. Nas datas em que a EP1 não coletou dados, utilizaram-se os dados da estação EP2.

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 são apresentados dados climatológicos diários a partir da Estação Climatológica da ESEC (EC1), das Estações da FUNCEME (Assaré e Aiuaba) e da Estação de Tauá monitorada pelo INMET. Na Tabela 5.4 é mostrado o período em que cada estação climatológica foi utilizada para a série de 01/01/2003 a 30/04/2007.

TABELA 5.4 – Períodos em que foram utilizados os dados climatológicos da Estação Climatológica da ESEC (EC1), das Estações da FUNCEME (Assaré e Aiuaba) e da Estação do INMET (Tauá).

Período	Estação
01/01/2003 - 31/12/2004	INMET (Tauá)
1/1/2005 - 12/11/2005	FUNCEME (Assaré)
13/11/2005 - 17/12/2005	EC1
18/12/2005 - 24/09/2006	FUNCEME (Aiuaba)
25/09/2006 - 30/4/2007	EC1

Vale ressaltar que a medição da velocidade do vento das estações do INMET e da FUNCEME se deu a 10 m de altura e que a medição da EC1 se deu a 3,5 m, ocasionando diferenças razoáveis na amplitude dos valores medidos entre as primeiras e a última (Figura 5.7).

Para o mês de dezembro de 2006 não há dados de nível d'água (Figura 5.6), do mês de janeiro a 18 de abril de 2005 não há dados de radiação de onda-curta (Figura 5.7) e somente a partir de janeiro de 2005 existem dados de pressão atmosférica (Figura 5.9).

A partir das Figuras 5.6 a 5.9, observar-se:

- (i) os períodos secos e chuvosos.
- (ii) nos períodos secos, desnível d'água negativo de 2040 mm no período 2003-2004, de 1950 mm no período 2004-2005, de 1870 mm no período de 2005-2006 e de 1410 mm no período de 2006-2007.
- (iii) nos períodos chuvosos, em poucos dias houve as maiores elevações do nível d'água, evidenciando eventos chuva-deflúvio extremos.
- (iv) queda da temperatura do ar, da radiação solar de onda-curta, da velocidade do vento e aumento da umidade relativa do ar no período chuvoso.
- (v) aumento gradual da temperatura do ar, da radiação de onda-curta, da velocidade do vento e diminuição gradual da umidade relativa do ar no período seco.
- (vi) aumento gradual da pressão atmosférica no período seco e declínio durante o período chuvoso.

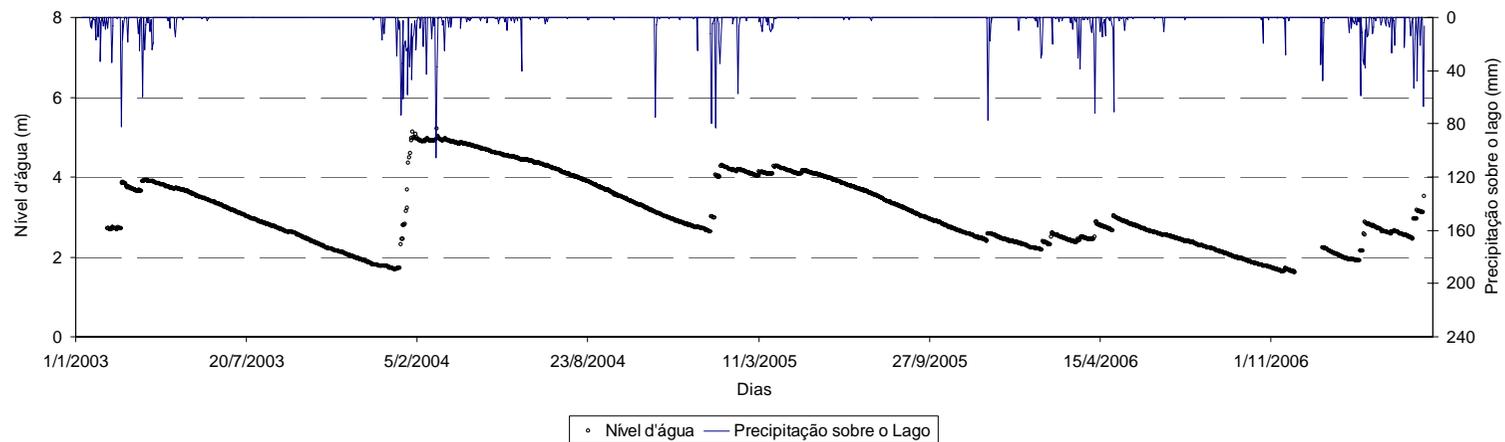


FIGURA 5.6 – Nível d'água diário do reservatório Boqueirão, BEA (07/02/2003 a 30/04/2007) e da precipitação sobre o lago (09/01/2003 a 30/04/2007).

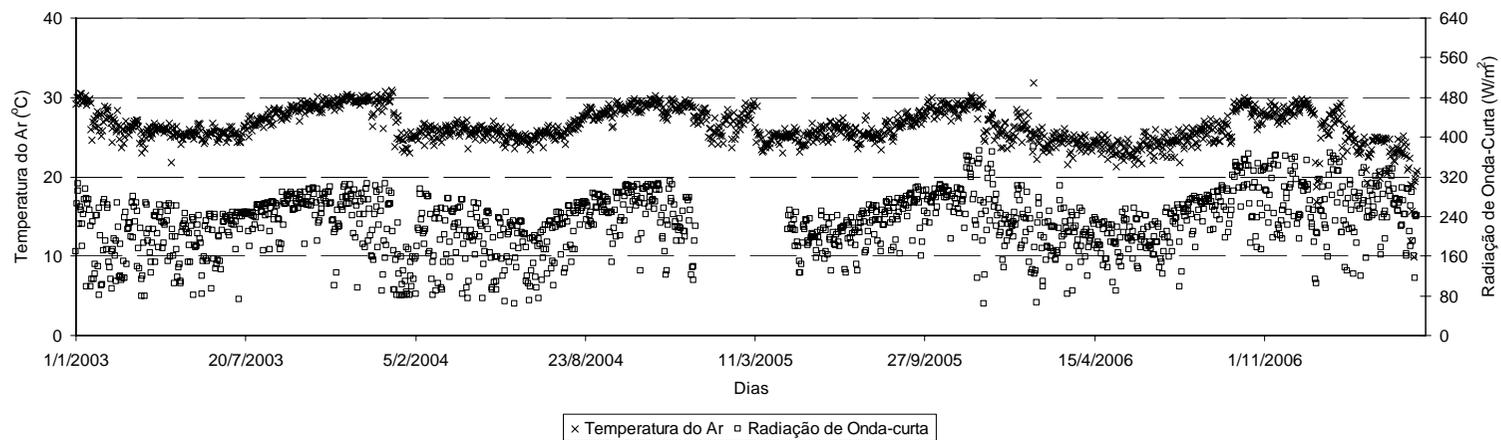


FIGURA 5.7 – Valores diários da temperatura do ar e da radiação de onda-curta nas proximidades da BEA (01/01/2003 a 30/04/2007).

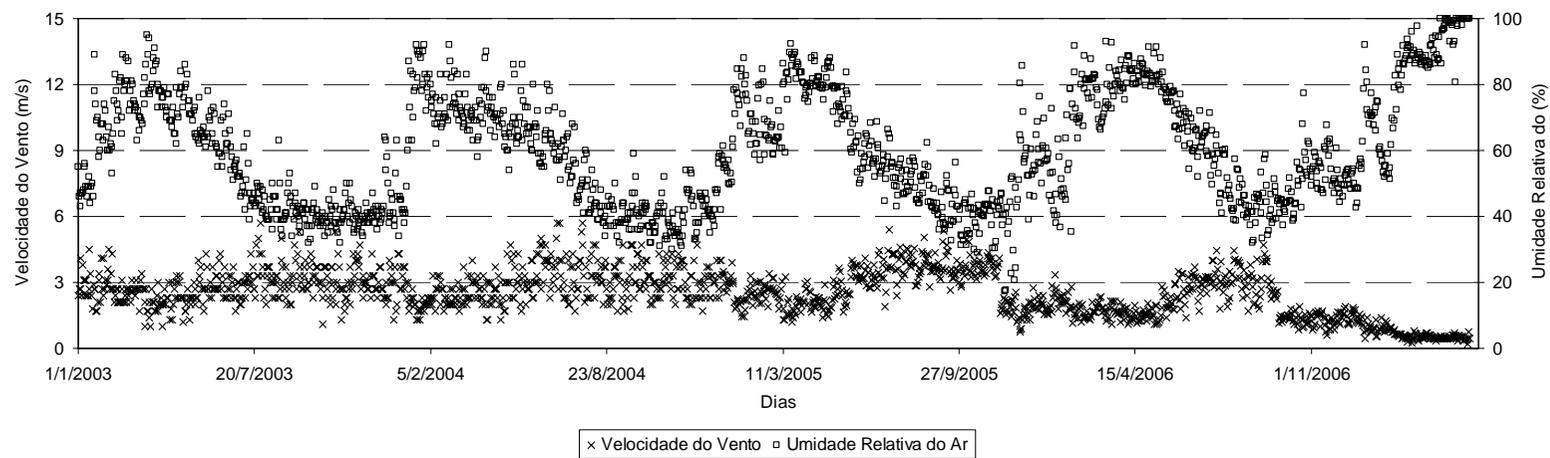


FIGURA 5.8 – Valores diários de velocidade do vento e umidade relativa do ar nas proximidades da BEA (01/01/2003 a 30/04/2007).

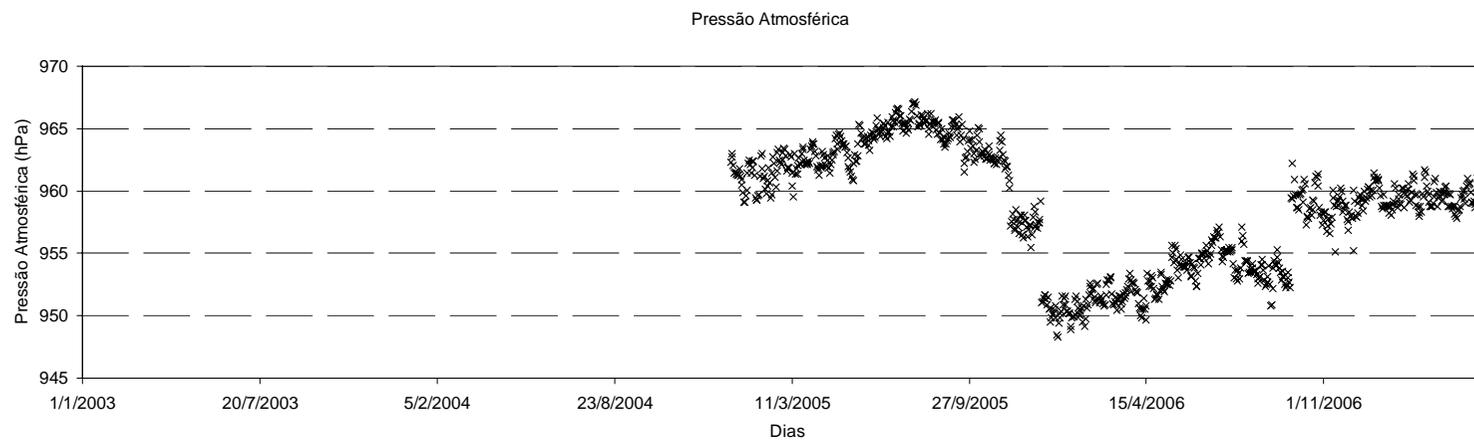


FIGURA 5.9 – Valores diários da pressão atmosférica nas proximidades da BEA (01/01/2005 a 30/04/2007).

Na Figura 5.10 é apresentado um exemplo de monitoramento horário do nível d'água do reservatório e da precipitação sobre o lago (22/03 a 22/05/2006). Os dados de precipitação utilizados foram da EP1. Nas Figuras 5.11 a 5.13 é mostrado o monitoramento horário de dados climatológicos a partir da Estação da FUNCEME (Aiuaba), também para o período de 22/03 a 22/05/2006.

A partir das Figuras 5.10 a 5.13, observa-se:

- (vii) que os eventos chuva-deflúvio se concentraram em algumas horas; e
- (viii) que a dinâmica climatológica a passo horário não apresentou relação com os eventos chuvosos, sendo os períodos diários e noturnos de clara relevância para as variáveis: radiação de onda-curta, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

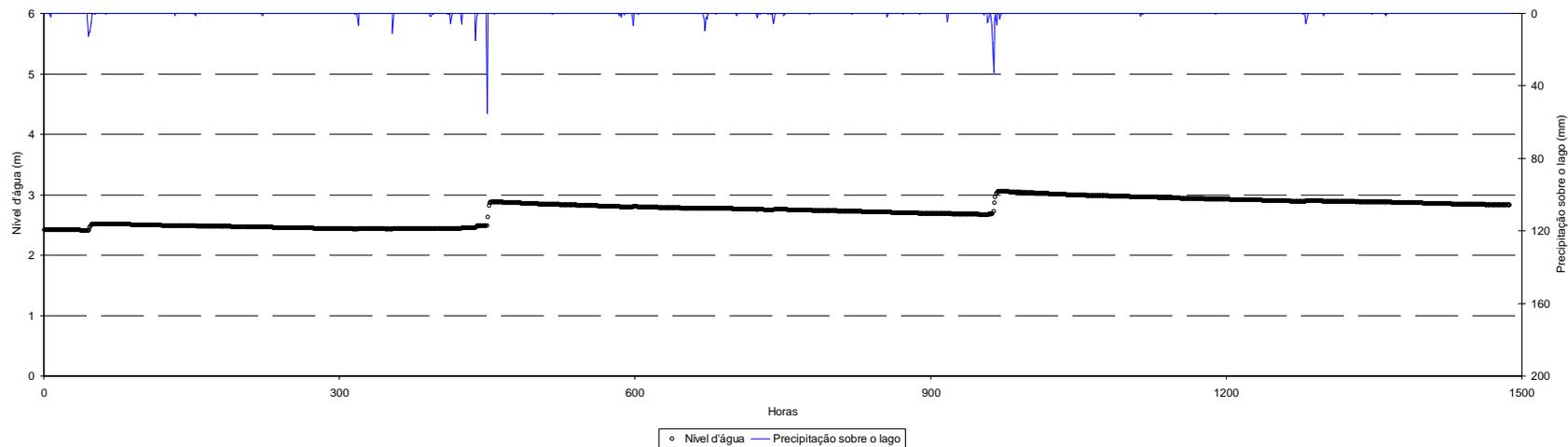


FIGURA 5.10 – Valores horários de nível d'água do reservatório Boqueirão e da precipitação sobre o lago, BEA (22/03 a 22/05/2006).

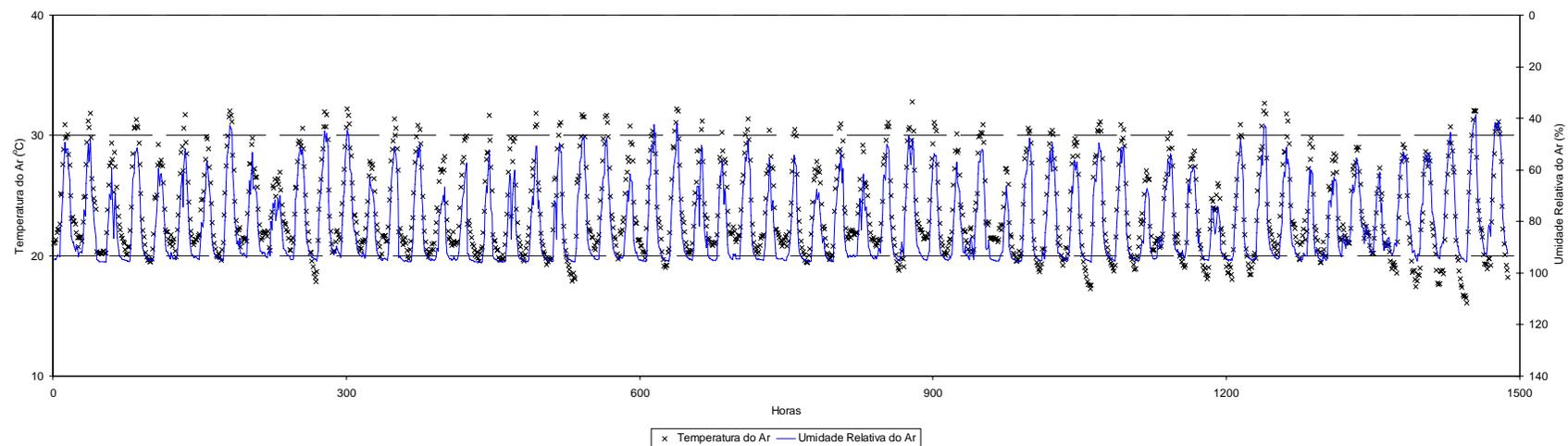


FIGURA 5.11 – Valores horários de temperatura do ar e umidade relativa do ar nas proximidades da BEA (22/03 a 22/05/2006).

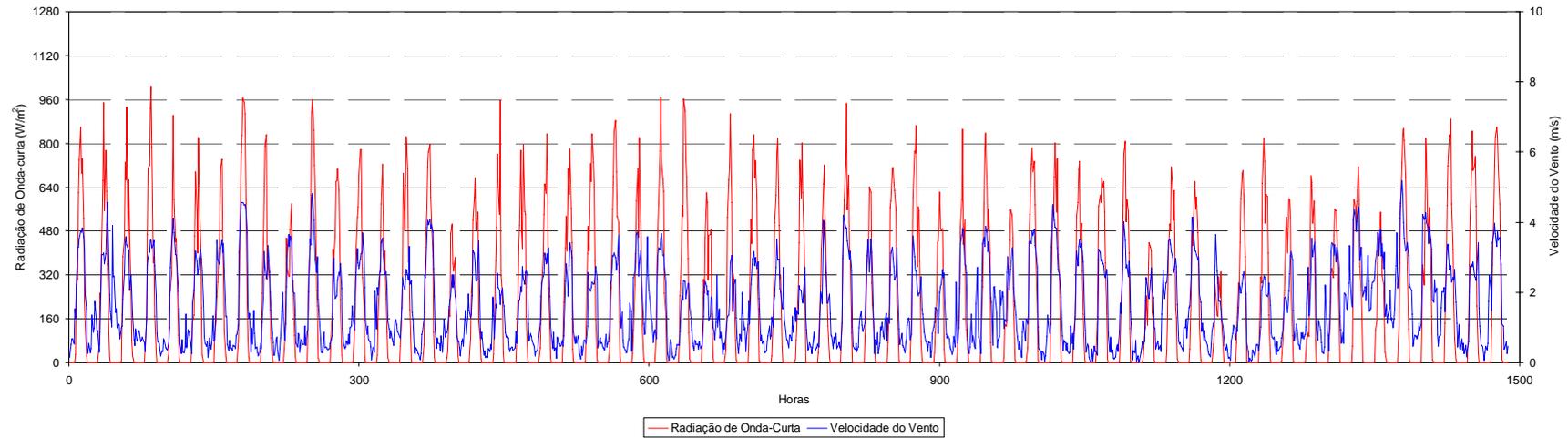


FIGURA 5.12 – Valores horários de radiação de onda-curta e velocidade do vento nas proximidades da BEA (22/03 a 22/05/2006).

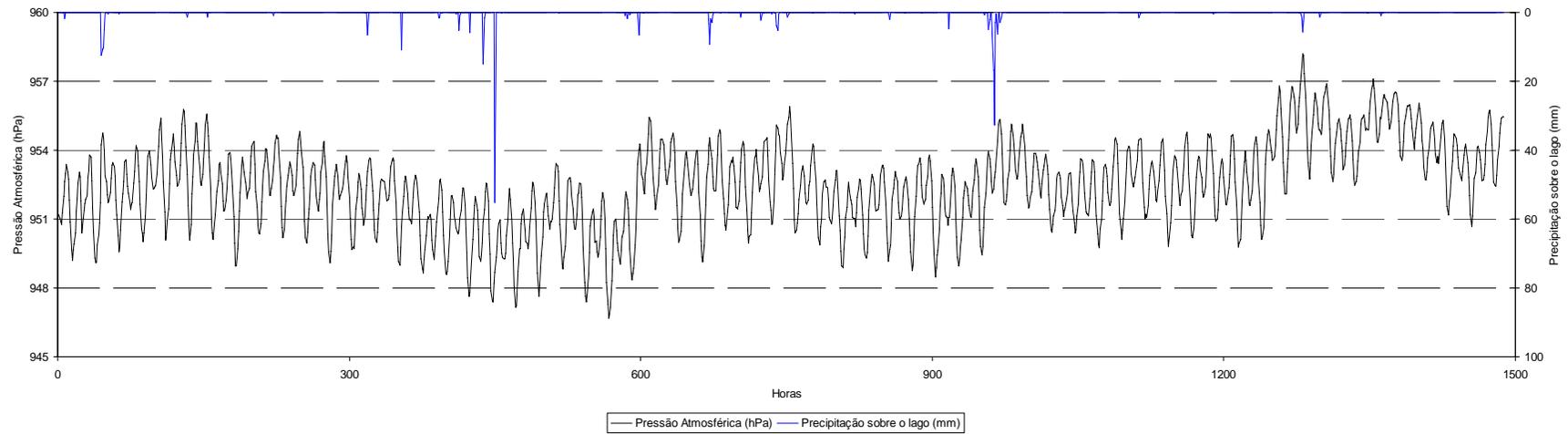
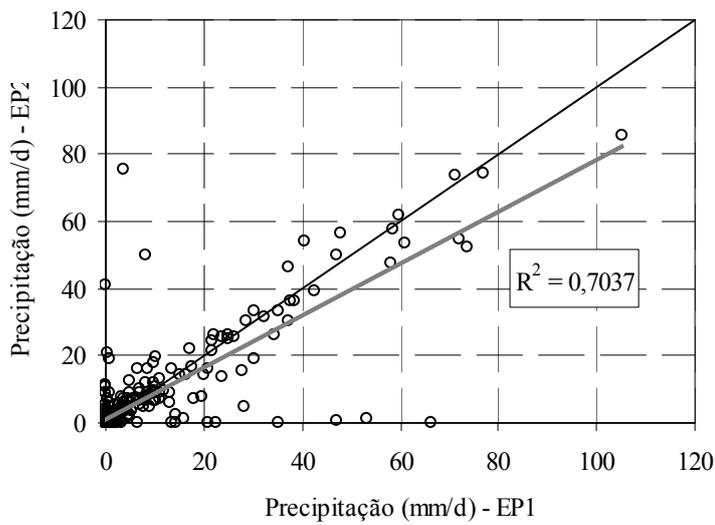


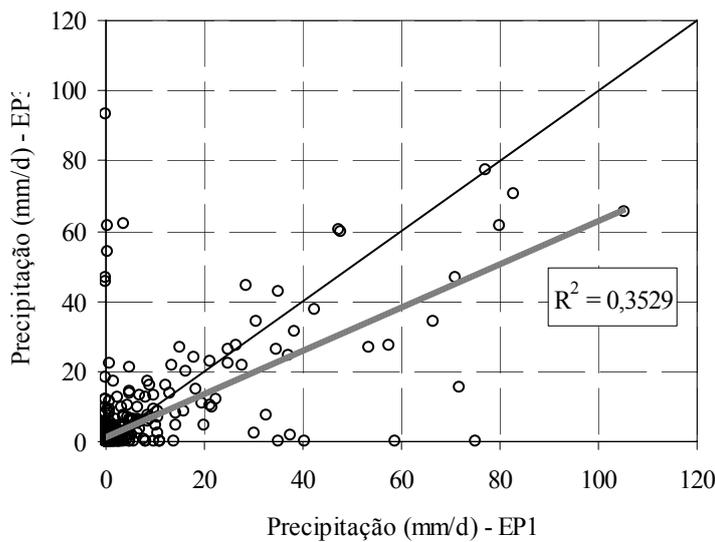
FIGURA 5.13 – Valores horários de pressão atmosférica e precipitação sobre o lago do reservatório Boqueirão, BEA (22/03 a 22/05/2006).

5.2.2 Eventos Chuva-Deflúvio

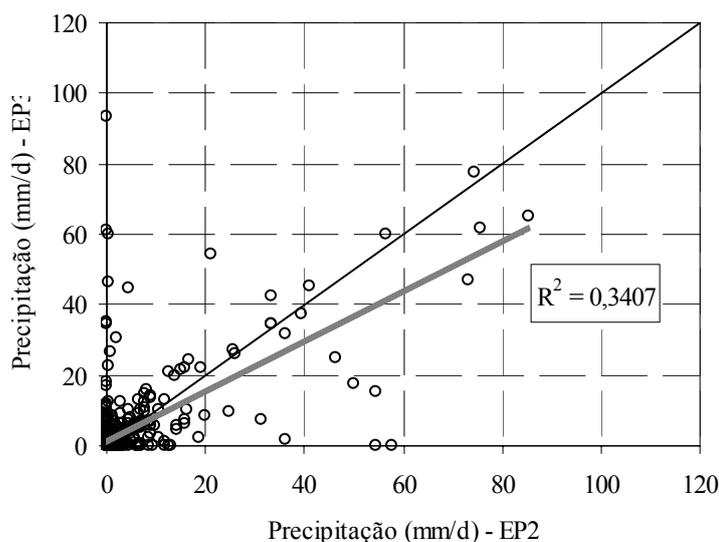
Nas Figuras 5.14a a 5.14c é comparada a precipitação diária das Estações Pluviométricas (EP), e nas Figuras 5.15a a 5.15c é comparada a umidade média do solo diária. Lembra-se que, para a confecção dessas Figuras não foram incluídos todos os dados de cada estação, somente os dados consistidos que foram observados simultaneamente nas estações.



(A) Estação Pluviométrica 1 e Estação Pluviométrica 2



(B) Estação Pluviométrica 1 e Estação Pluviométrica 3

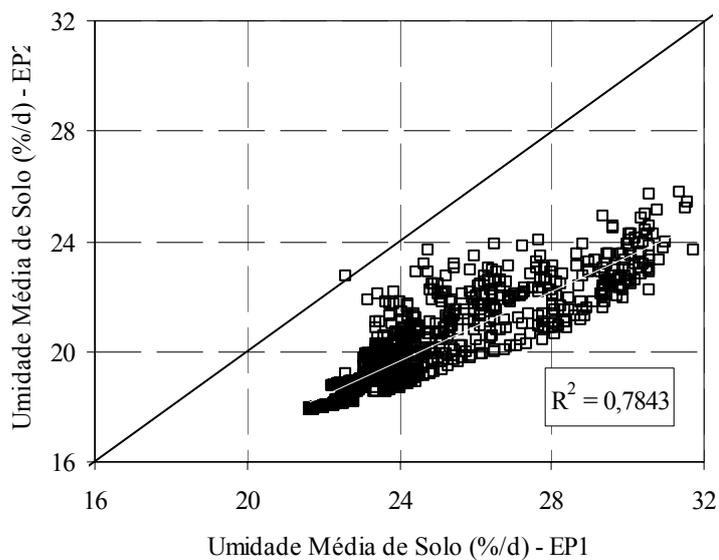


(C) Estação Pluviométrica 2 e Estação Pluviométrica 3

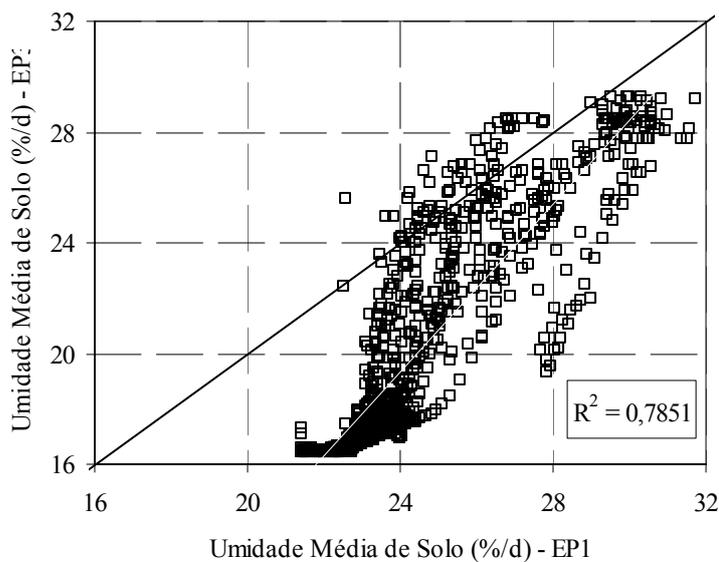
FIGURA 5.14 – Comparação da precipitação diária monitorada nas estações pluviométricas, onde a diagonal corresponde à linha de valores iguais.

A partir da Figura 5.14 perceberam-se baixas correlações da precipitação diária entre EP1 e EP3 e entre EP2 e EP3, sendo razoável a correlação entre EP1 e EP2, como proximidade da diagonal de valores iguais. No entanto, lembra-se que a distância entre EP1 e EP2 é aproximadamente 2,5 km.

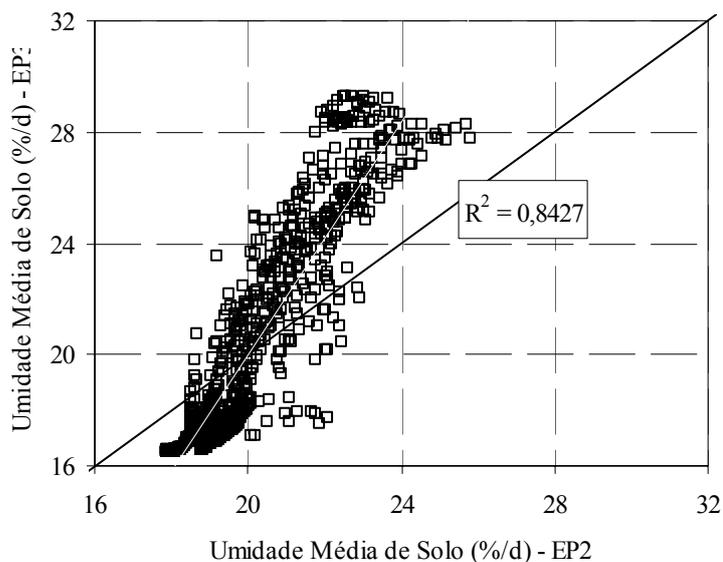
A baixa correlação entre EP3 e as outras estações pluviométricas deve-se à presença da Serra do Rosilho, que corta a BEA, fazendo com que a precipitação a montante da Serra (monitorada pela EP3) seja diferente da precipitação a jusante (monitorada pelas EP1 e EP2) (ver capítulo 5.1).



(A) Estação Pluviométrica 1 e Estação Pluviométrica 2



(B) Estação Pluviométrica 1 e Estação Pluviométrica 3



(C) Estação Pluviométrica 2 e Estação Pluviométrica 3

FIGURA 5.15 – Comparação da umidade média do solo diária monitorada dos sensores de umidade nas estações pluviométricas da BEA. No gráfico a diagonal corresponde à linha de valores iguais.

Da Figura 5.15 pode-se verificar que os valores de umidade do solo a 15 cm de profundidade nas três estações têm a mesma ordem de grandeza. A umidade do solo tende a ser maior na EP1 e menor na EP2, com o valor máximo médio diário de 38% na EP1 e mínimo médio diário de 15% na EP3.

Dessa forma, o valor médio das três estações pode ser um bom indicador da umidade média do solo na BEA.

Os dados das amostras de solo da primeira camada (20 cm de profundidade, descritos no capítulo 3.4) indicam porosidade de 38%, portanto compatível com os valores máximos de umidade de solo das estações.

Na Figura 5.16 são apresentadas a precipitação média sobre a BEA e as perdas diárias por interceptação da chuva, e na Figura 5.17 são mostradas a precipitação média e a umidade média diária do solo.

As medidas de perdas por interceptação se iniciaram em 2004, fenômeno relevante no processo chuva-deflúvio (Figura 5.16). A interceptação pode atingir parcelas consideráveis em área de caatinga arbustiva-arbórea conservada (ver capítulo 3.3), como demonstrado por

Medeiros (2005): cerca de 14% da precipitação, enquanto o escoamento superficial médio no semi-árido é aproximadamente a metade desse valor (CAMPOS, 1996). Para detalhes sobre a importância da interceptação no processo chuva-deflúvio, ver capítulo 5.3.2.

Dados consistentes da umidade do solo na BEA só foram obtidos a partir de 2004, pois em 2003 apenas um sensor estava em funcionamento, no caso EP2, por isso os baixos valores em 2003 em relação aos demais anos (Figura 5.17). Percebe-se uma relação direta positiva entre a precipitação média e a umidade média do solo.

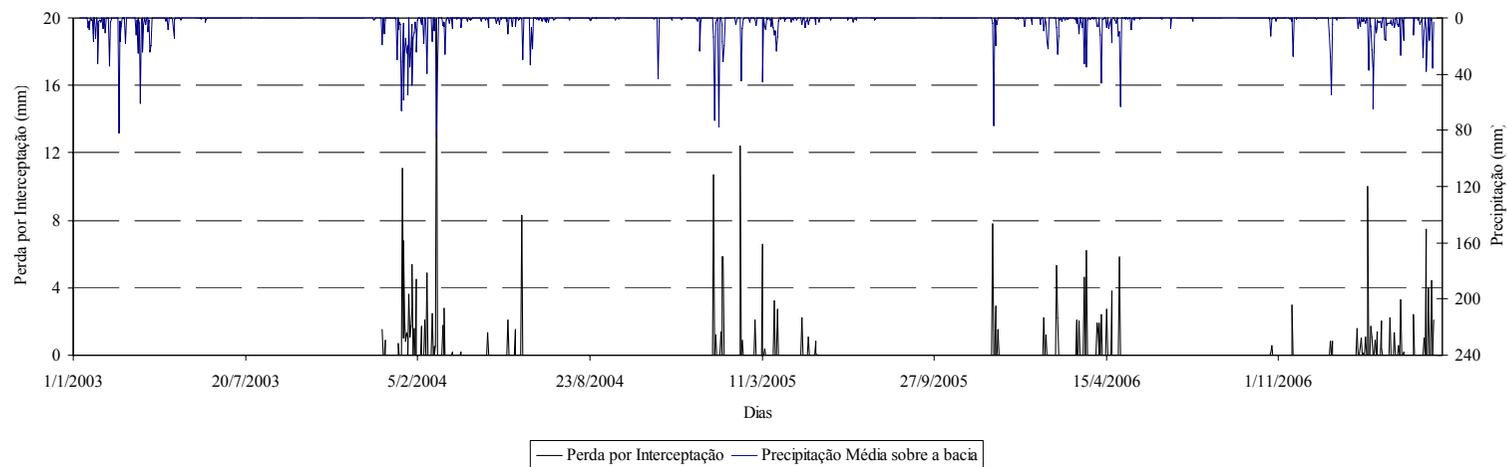


FIGURA 5.16 – Precipitação média diária e perda diária por intercepção na BEA (2003 - 2007).

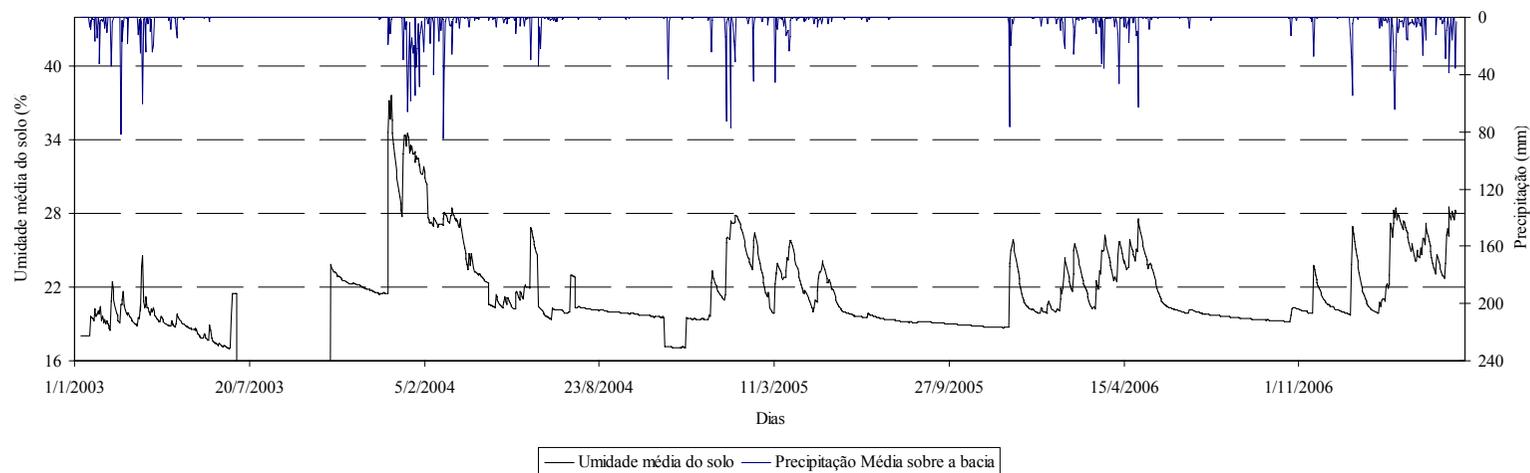


FIGURA 5.17 – Precipitação média diária e umidade média diária do solo na BEA (2003 -2007).

Durante o período chuvoso de 2007 foram monitorados dez eventos de deflúvio na calha Parshall. Nesse período também se observaram, em campo, baixo escoamento superficial e alta infiltração em setores da calha do riacho principal da BEA, principalmente entre a Estação Fluviométrica 1 e seu exutório.

5.2.3 Produção de Sedimentos

Existem dados consistentes de produção de sedimentos apenas para os anos de 2006 e 2007, num total de seis amostras no primeiro ano e 25 amostras no segundo, sendo que em sete destas só há análise de concentração de sólidos totais (ST), enquanto que nas 18 restantes foram analisadas concentrações de sólidos totais e de sólidos suspensos totais (SST).

Devido às condições hidrológicas do semi-árido (poucos eventos chuva-deflúvio), a avaliação das hipóteses de concentração de sedimentos suspensos de eventos na BEA foi limitada (ver capítulos 4.1.3 e 4.1.4).

Para se avaliar se a concentração de sedimentos na Estação Fluviométrica 1 (EF1) é representativa de toda a BEA, compararam-se dois eventos chuva-deflúvio que geraram simultaneamente escoamento nos riachos principal e secundário. Na Tabela 5.5 foram mostradas as concentrações médias de SST no riacho principal (EF1) e no secundário (Coletor de Sedimentos 3 – CS3).

TABELA 5.5 – Concentrações médias de sólidos suspensos totais (SST) no riacho principal da BEA (seção Estação Fluviométrica 1 – EF1) e no riacho secundário (seção Coletor de Sedimentos 3 – CS3) em dois eventos chuva-deflúvio. Na última coluna apresenta-se a razão entre as concentrações em EF1 e em CS3.

Data do Evento	SST na EF1 (mg/L)	SST na CS3 (mg/L)	Razão
19/4/2007	898	916	0,98
2/5/2007	1150	1183	0,97

As concentrações de SST nos riachos principal e secundário para os dois eventos são praticamente iguais (Tabela 5.5), com diferença inferior a 2,5%. Considerando-se as incertezas na coleta e na análise laboratorial, pode-se admitir que a concentração de sedimentos na EF1 representa a concentração de sedimentos no exutório da BEA. Esta conclusão, no entanto, está limitada pelo reduzido número de eventos considerados.

Um evento chuva-deflúvio (em 28 de abril de 2007) foi utilizado para se avaliar se a concentração de sedimentos da água armazenada na depressão da calha Parshall (EF1) após o evento pode representá-lo. Isso é de grande importância, pois as coletas manuais são imprescindíveis quando o nível d'água não supera 20 cm, altura em que o coletor automático de sedimentos torna-se eficaz. Como grande parte dos eventos ocorre à noite, é fundamental saber se se pode coletar a amostra *a posteriori*, como forma de não se perder informações sobre o evento. A concentração de sedimentos (SST) no coletor automático foi de 509 mg/L durante o evento, enquanto que a concentração da amostra coletada *a posteriori* foi de 593 mg/L. Por se tratar de apenas uma amostra nada se pode concluir em definitivo. Porém, a observação realizada aponta para a validade da coleta. Recomenda-se repetir o experimento nos próximos eventos.

Também foi analisada a relação entre SST e ST para as amostras coletadas em 2007 (Figura 5.18). Com base a regressão apresentada na Figura 5.18 foi possível estimar-se a concentração de sólidos suspensos totais para os eventos nos quais apenas a análise de sólidos totais tenha sido realizada.

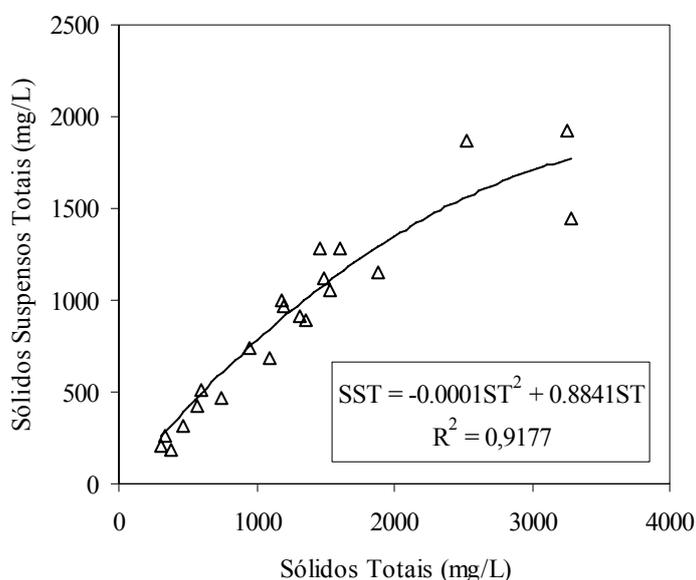


FIGURA 5.18 – Relação entre sólidos totais (ST) e sólidos suspensos totais (SST) em amostras dos riachos da BEA (2007).

Na Tabela 5.6 são apresentadas as concentrações médias de ST e SST de eventos chuva-deflúvio e produção de sedimentos da BEA.

TABELA 5.6 – Concentrações médias de sólidos totais (ST) e de sólidos suspensos totais (SST) na BEA: Estação Fluviométrica 1 (EF1); Coletor de Sedimentos 2 (CS2); riacho principal, seção do Coletor de Sedimentos 3 (CS3); e no encontro dos dois riachos.

Data da Coleta	Hora	ST (mg/L)	SST (mg/L)	Tipo de Coleta	Local da Coleta
20/3/2006	-	481	402	Manual	EF1
24/3/2006	-	335	285	Manual	EF1
9/4/2006	-	525	437	Automático	EF1
10/4/2006	-	272	233	Automático	EF1
22/4/2006	-	368	312	Automático	EF1
1/5/2006	-	256	220	Automático	EF1
1/1/2007	08:30	228	196	Automático	EF1
20/2/2007	-	-	105	Automático	EF1
18/4/2007	05:20	307	206	Manual	EF1
18/4/2007	05:35	342	258	Manual	Encontro dos riachos
19/4/2007	10:00	1244	898	Automático	EF1
19/4/2007	11:00	1185	916	Automático	CS3
19/4/2007	10:30	1182	1005	Automático	CS2
22/4/2007	16:00	1482	1117	Automático	EF1
22/4/2007*	16:00	838	593	Automático	CS3
28/4/2007	09:30	601	509	Automático	EF1
28/4/2007	09:50	394	333	Manual	Encontro dos riachos
2/5/2007	16:00	1888	1150	Automático	EF1
2/5/2007	16:00	2158	1183	Automático	CS3
2/5/2007	16:00	2530	1870	Automático	CS2

Os valores de SST de 20/3/2007 a 1/1/2007 foram obtidos da relação da Figura 5.18.

*O riacho secundário estava escoando antes de 22/4/2007.

Ao todo foram monitorados seis eventos em 2006 e sete eventos em 2007, sendo para o último ano coletas realizadas, na sua maioria, em vários pontos da bacia. A média da concentração média de SST foi de 611 mg/L com coeficiente de variação de 0,77. Observou-se, portanto, concentração moderada de SST na bacia, porém com alta variabilidade.

Constatou-se, também, que a concentração média de SST em CS2 (a montante da EF1) foi maior que as concentrações encontradas em EF1 e em CS3 em dois eventos. Este fato está de acordo com a hipótese de deposição de sedimentos na rede de drenagem exposta no capítulo 5.1, se, e somente se, a razão entre SST no CS2 e SST na EF1 for maior que a razão entre a vazão na EF1 e a vazão no CS2.

Na realidade isso pode ocorrer quando as perdas em trânsito do fluxo d'água entre CS2 e EF1 forem suficientes para acarretarem deposição de sedimentos relevantes em relação a concentração de sedimentos suspensos nesse trecho do riacho, que impliquem queda do valor

tanto da concentração de SST como da vazão na EF1 para a satisfação da condição do parágrafo acima.

5.3 Avaliação de Processos

5.3.1 Trocas Hídricas na Bacia Hidráulica

Inicialmente, para o período de março a agosto de 2006, avaliaram-se, nos dias sem chuva e sem escoamento superficial, os termos evaporação (E_o), recarga subterrânea (R_s) e infiltração (I). Observou-se que, de 86 dias observados sem chuva ou escoamento, em nenhum dia aconteceu acréscimo do nível d'água (desníveis sempre negativos). Avalia-se que, além da elevada evaporação, haja influência considerável do processo de infiltração sobre o intenso decaimento do nível d'água nesses dias.

Isso pode ser inferido já que os valores de desnível d'água na sua grande maioria superaram a evaporação potencial da bacia (Figura 19). Cavalcante, Doherty e Cadier (1990) avaliam que a evaporação no semi-árido nordestino raramente supera 10 mm por dia. No entanto, os dados da Figura 5.19 mostram sete observações de perdas de 10 mm por dia, além de cinco observações que superam significativamente essa cifra, indicando que outro(s) processo(s) está(ão) atuando no reservatório, além da evaporação.

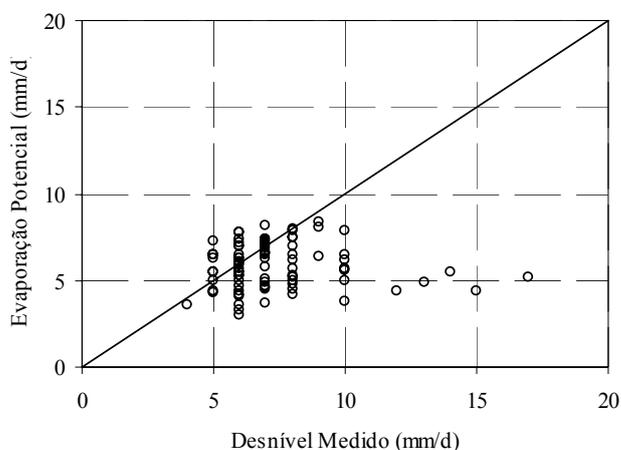


FIGURA 5.19 – Relação entre desnível d'água medido no açude da BEA e evaporação potencial na bacia, em que a diagonal corresponde à linha de valores iguais.

Essas observações indicam que, mesmo se existente, a recarga subterrânea deve ser desprezível em relação às perdas (evaporação e infiltração) do açude nos dias de estio.

Subtraindo-se a evaporação potencial do valor do desnível d'água (perdas totais) nos dias de estio, é possível inferir sobre as trocas hídricas entre o reservatório e o subsolo. Traçando-se uma relação das trocas hídricas entre o reservatório e o subsolo (perdas menos evaporação) com o nível médio do açude, obteve-se a relação descrita na Figura 5.20.

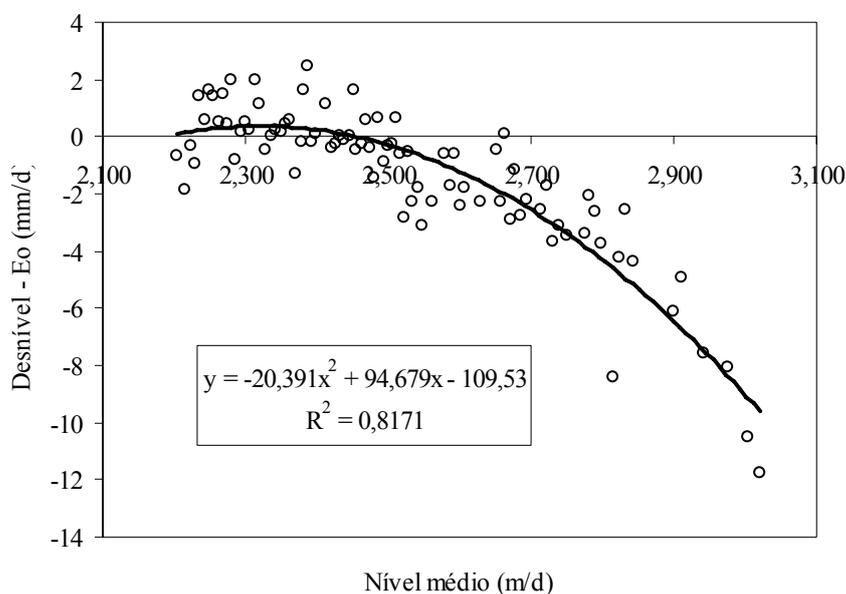


FIGURA 5.20 – Relação entre desnível d'água menos evaporação potencial e nível médio diário do açude da BEA para o período de março a agosto de 2006, selecionando os dias sem chuvas e sem escoamento superficial.

Essa boa correlação entre nível médio e as trocas hídricas do reservatório e do subsolo (perdas sem evaporação) fortalece a hipótese de infiltração relevante no lago da BEA.

Considerando-se que as trocas hídricas do reservatório e do subsolo nos dias de estio possuem comportamento similar nos dias que há entradas superficiais (precipitação e escoamento) ao reservatório, utilizou-se a relação empírica da Figura 5.20 para estimativa da soma dos termos infiltração e recarga subterrânea (trocas hídricas subterrâneas) nos dias de estio e, também, nos dias chuvosos.

Na Figura 5.21 são apresentados para o período de março a julho de 2006 as perdas volumétricas acumuladas no reservatório da BEA por evaporação e por trocas hídricas

subterrâneas (em que o processo de infiltração foi mais considerável que a recarga subterrânea). Nesse período as perdas acumuladas por infiltração foram praticamente equivalentes às perdas por evaporação.

Pereira (2006) por meio de modelos isotópicos encontrou uma razão 0,22 entre infiltração e evaporação no açude Boqueirão da BEA no período de novembro de 2005 a fevereiro de 2006. Recomenda-se a utilização dos dois métodos, balanço de massa e modelo isotópico, em um mesmo período de observação para uma futura comparação de resultados, além de utilização de balanço de mistura com traçadores naturais (e.g., cloretos).

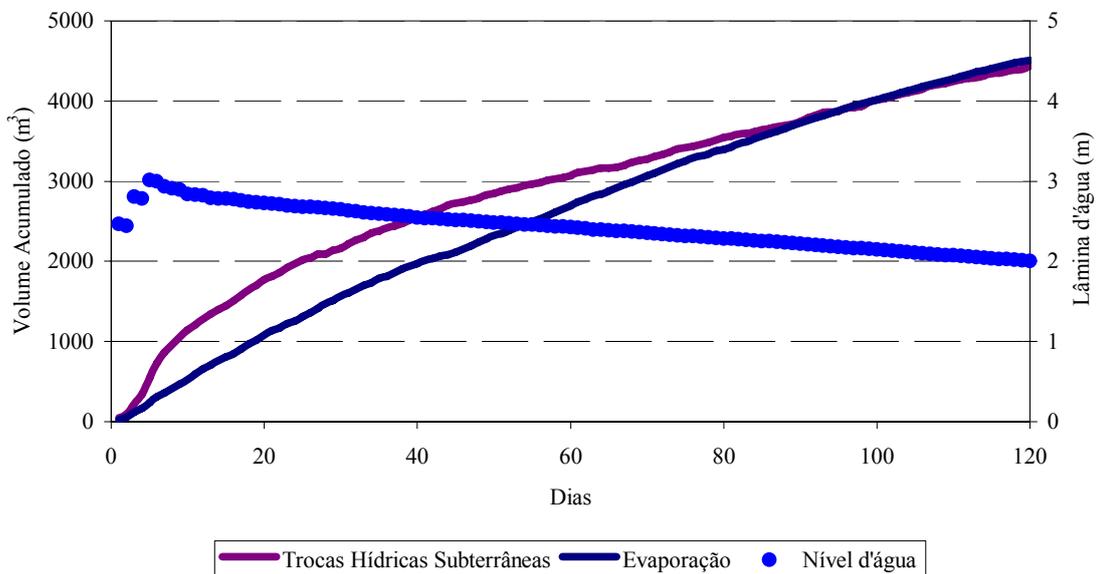


FIGURA 5.21 – Perdas volumétricas acumuladas por evaporação e por trocas hídricas subterrâneas no açude Boqueirão da BEA, março a julho de 2006.

Para se avaliar o deflúvio afluente ao reservatório da BEA pelo método do balanço hídrico, aplicou-se a relação empírica da Figura 5.20 para estimativa da infiltração e da recarga subterrânea, e pelo método de Penman (capítulo 4.3.1) estimou-se a evaporação do reservatório. O hidrograma afluente horário ao reservatório da BEA no período de 22/03 a 30/06 de 2006 é apresentado na Figura 5.22.

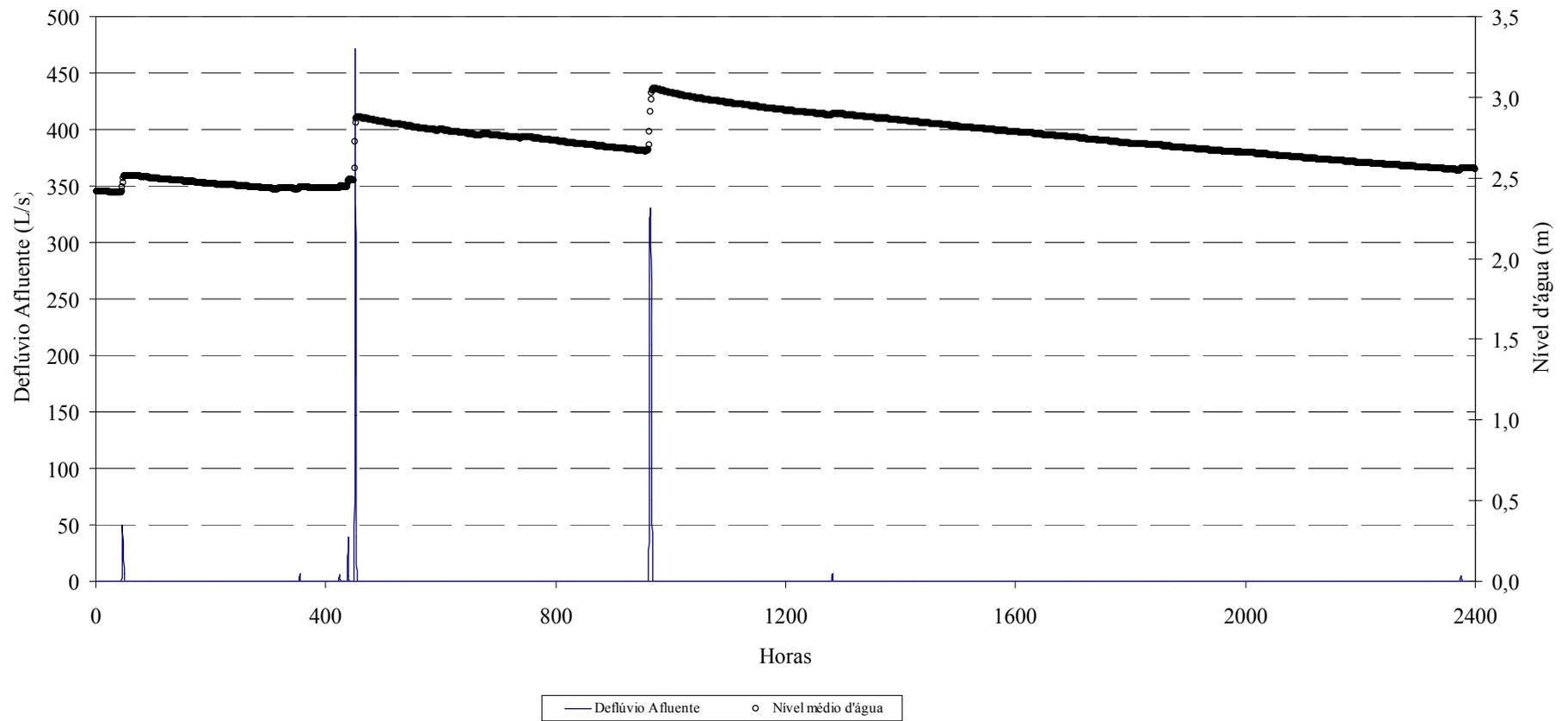


FIGURA 5.22 – Hidrograma afluente ao açude da BEA, no período de 22/03 a 30/06 de 2006, obtido através do balanço hídrico no lago.

A análise de consistência do método do balanço hídrico para a estimativa do deflúvio afluente foi realizada para a série apresentada na Figura 5.22. Primeiramente, avaliou-se o erro global do balanço (E_{global}), aplicando-se a equação 4.14. O cálculo do erro médio dos eventos ($erro_{int}$) foi obtido pela aplicação da equação 4.15. Na Tabela 5.7 foram apresentados os termos e os resultados das equações.

TABELA 5.7 – Termos e resultados estimados para a avaliação do erro global do método do balanço hídrico no passo horário para o período de 22/03 a 30/06 de 2006.

Termos e Resultados	Valor
Desnível Observado (mm)	139
Saídas (mm)	954
Entradas (mm)	1072
E_{global} (mm)	21
Nº de intervalo de precipitação	95
$erro_{int}$ (mm)	0,22

O valor de $erro_{int}$ mostra-se menor que a imprecisão da medida do nível d'água pelo limnógrafo de bóia (1 mm). O número de intervalos de precipitação, em que o E_{global} foi distribuído, corresponde apenas a 4% do período, enquanto os erros foram gerados em todos os intervalos. Assim, nesse aspecto, o método do balanço hídrico foi consistente.

Depois, realizou-se testes de consistência (TC) descritos no capítulo 4.3.1:

- TC1 representou o primeiro teste: avaliação da hipótese de que as entradas por precipitação e deflúvio afluente são muito maiores que a evaporação e as trocas hídricas subterrâneas durante o processo chuva-deflúvio, fazendo-se os termos evaporação, infiltração e recarga subterrânea do balanço hídrico igual a zero;
- TC2 (segundo teste): avaliação da aproximação numérica da área média, fazendo área média igual à área final do intervalo de tempo (TC2.1) e igual à área inicial do intervalo (TC2.2), sendo que para o cálculo da série da Figura 5.21, adotou-se área média igual à média das áreas final e inicial do intervalo;
- TC3 (terceiro teste): avaliação do componente precipitação sobre o lago do açude, fazendo-se essa variável igual a zero;
- TC4 (quarto teste): avaliação do balanço hídrico quando não há dados consistentes para estimativa da evaporação e das trocas hídricas subterrâneas, e da precipitação na EP1, fazendo-se os termos evaporação, infiltração e recarga subterrânea igual a zero e a precipitação sobre o lago igual à medida na EP2.

Na Figura 5.23 são apresentadas comparações entre o deflúvio afluente original (Figura 5.22) e os seus valores modificados pelos testes de consistência. O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) foi adotado como critério de avaliação dessas comparações (equação 4.18), fazendo-se a série de vazões “observadas” igual ao deflúvio afluente original e a série de vazões “simuladas” igual aos deflúvios modificados pelos testes de consistência. Na Tabela 5.8 foram mostrados os coeficientes de eficiência para cada teste de consistência.

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_o(t) - Q_{sin}(t))^2}{\sum_{t=1}^N (Q_o(t) - \overline{Q_o(t)})^2} \quad (4.18)$$

em que E_{NS} é o coeficiente de eficiência, Q_o a vazão observada, Q_{sin} a vazão simulada, t o intervalo de tempo e N o número total de intervalos.

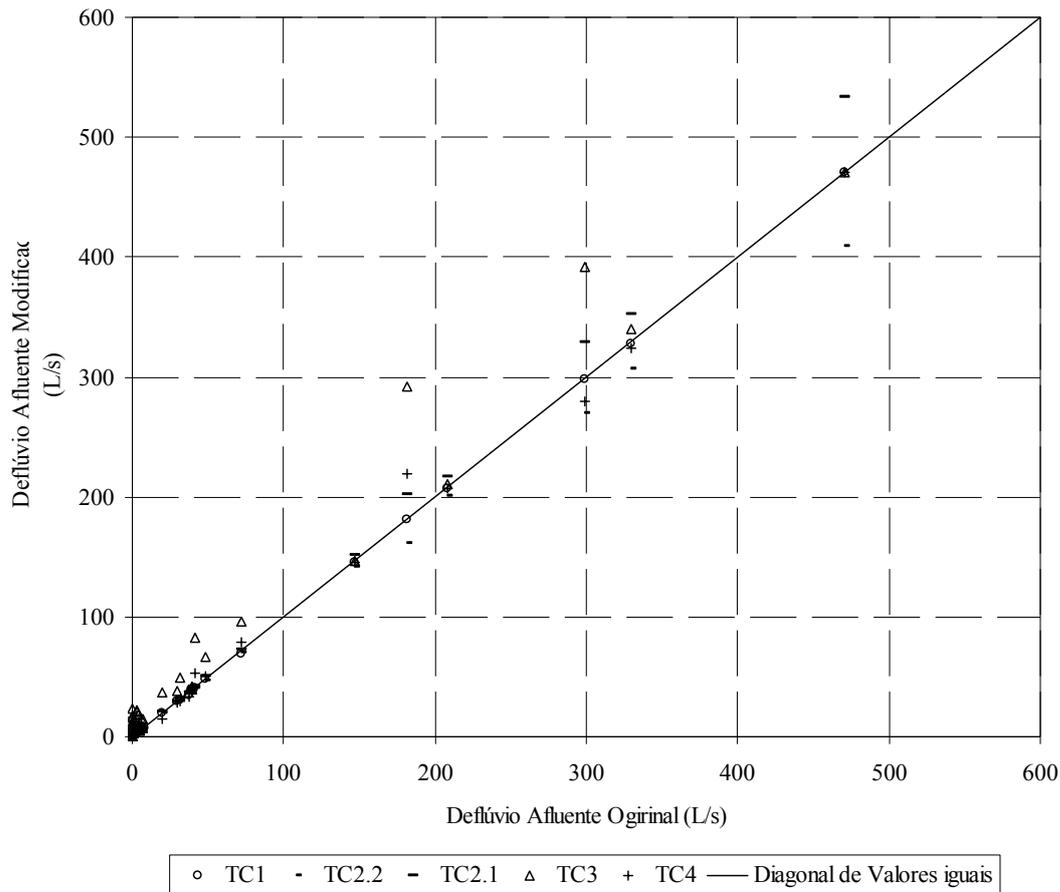


FIGURA 5.23 – Comparações entre o deflúvio afluente original da série e os seus valores modificados pelos testes de consistência.

TABELA 5.8 – Valores do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) para os testes de consistência.

	TC1	TC2.1	TC2.2	TC3	TC4
Coeficiente de Nash e Sutcliffe	1,00	0,98	0,98	0,93	0,99

Em todos os testes de consistência (Tabela 5.8) obtiveram-se elevados índices de coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe (acima de 0,92).

Com base na análise realizada em TC1, pode-se inferir que, para o açude da BEA durante o evento chuva-deflúvio, no passo horário, a evaporação e as trocas hídricas subterrâneas podem ser desprezadas, pois as entradas por precipitação direta no lago e deflúvio afluente são relativamente muito maiores.

A estimativa aproximada da área do lago apresentou pequenas flutuações entre o início e o final do intervalo de tempo, o que torna aceitável utilizar a área média do intervalo. A precipitação medida na EP2 pode ser adotada para o balanço hídrico no açude da BEA (na

realidade, as precipitações diárias na EP1 e na EP2 demonstraram boa correlação, ver capítulo 5.2.2) e a desconsideração da precipitação direta no lago acarreta superestimativa no deflúvio afluente, mas não sobremaneira, pois a entrada por deflúvio foi a parcela mais considerável das trocas hídricas durante o processo chuva-deflúvio.

Esses resultados foram importantes para o cálculo do deflúvio afluente horário para os anos de 2003, 2004 e parte de 2007.

Também, compararam-se os resultados de deflúvio afluente diário pelo balanço hídrico com passos horário e diário, e realizaram-se os testes TC1 e TC3 com passo diário. Na Figura 5.24 é apresentada a comparação entre o deflúvio afluente médio diário calculado com passo horário (tendo como base a série da Figura 5.22) e o deflúvio afluente diário com passo diário (denominada CDH), assim como comparações com valores de deflúvio afluente modificados pelos testes TC1 e TC3.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) foi novamente adotado como critério de avaliação dessas comparações (equação 4.18), fazendo-se a série de vazões “observadas” igual ao deflúvio afluente médio diário calculado com passo horário e a série de vazões “simuladas” igual aos deflúvios modificados. Na Tabela 5.9 foram mostrados os coeficientes de eficiência para cada comparação. Em todos os casos existiram elevados índices de coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe, acima de 0,99.

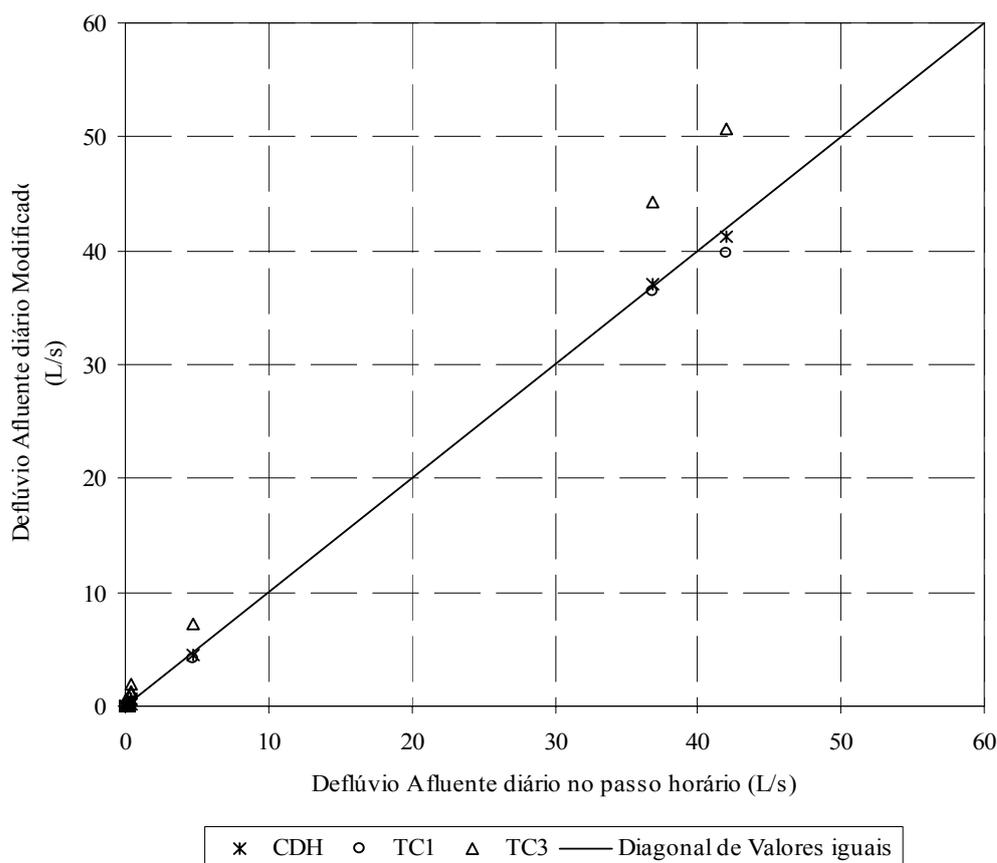


FIGURA 5.24 – Comparações entre o deflúvio afluente diário com passos horário e diário (CDH), e entre o deflúvio afluente diário com passo horário e os seus valores modificados pelos testes TC1 e TC3 com passo diário.

TABELA 5.9 – Valores do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) para os testes de consistência com passo diário (TC1 e TC3) e para a comparação dos resultados do balanço hídrico com passos diário e horário (CDH).

	CDH	TC1	TC3
Coeficiente de Nash e Sutcliffe	1,00	1,00	1,00

Assim, para o açude da BEA, não existiram, praticamente, diferenças entre a estimativa do deflúvio afluente diário para o passo diário e para o passo horário. Além disso, observou-se que, mesmo no segundo maior dia de deflúvio afluente composto por dois eventos chuva-deflúvio (Figura 5.22), os resultados gerados pelos dois passos de tempo foram praticamente iguais.

Valem as conclusões tiradas dos testes TC1 e TC3 do passo horário para o passo diário do balanço hídrico, salientando-se que os coeficientes de eficiência se elevaram para o passo de cálculo diário, mostrando, com efeito, uma possível redução das flutuações do método nessa escala de tempo.

Esses resultados do balanço hídrico no passo diário são decorrentes das conclusões do funcionamento hidrológico do açude Boqueirão no passo horário, pois a evaporação e as trocas hídricas subterrâneas são desprezíveis durante o evento chuva-deflúvio, e porque não houve extravasamento do açude.

Também, os resultados balanço hídrico diário foram importantes para a continuação do cálculo do deflúvio afluente nos períodos em que só existiam dados diários. Nesse aspecto, os problemas de funcionamento do limnógrafo de bóia foram determinantes para o ano de 2005 e parte de 2006 e 2007, e as limitações do método de cálculo da vazão de sangria do açude para o período de 2004 (capítulo 4.3.1).

No que tange às estimativas para o ano de 2005 e parte de 2006 e 2007, compararam-se os resultados entre o deflúvio afluente médio diário com passo horário e o deflúvio afluente diário com passo diário calculado a partir de dados manuais das réguas limnimétricas (precisão de 1 cm) (Figura 5.25), estimando-se também o coeficiente de Nash e Sutcliffe (1970), e fazendo-se as mesmas considerações anteriores para o cálculo desse parâmetro de eficiência.

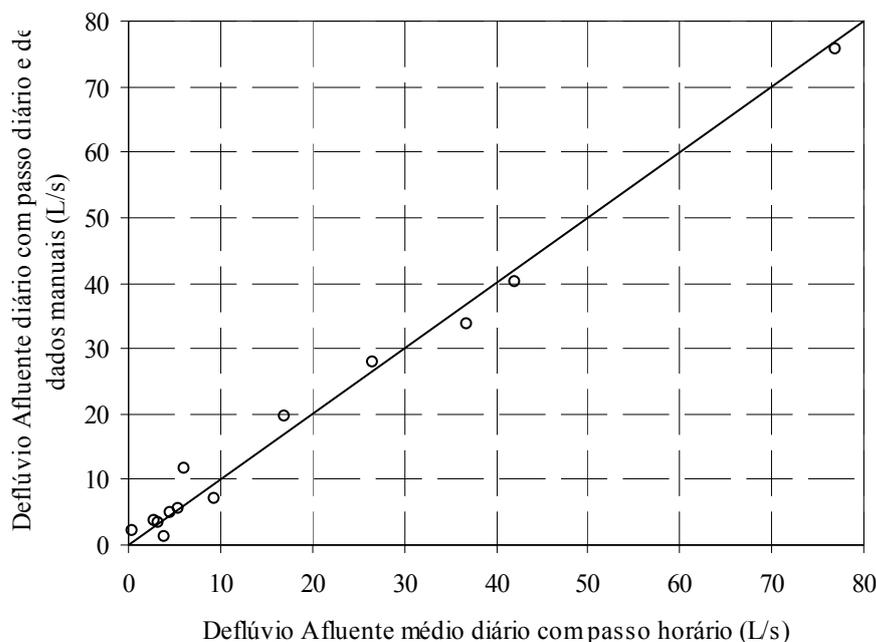


FIGURA 5.25 – Comparação entre o deflúvio afluente médio diário com passo horário e deflúvio afluente diário com passo diário calculado a partir de leitura manual das réguas limnimétricas (precisão de 1 cm). A diagonal representa a linha de valores iguais.

O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe entre as duas variáveis da Figura 5.25 foi 0,99; mostrando que as variações nos resultados foram mínimas entre o monitoramento automático (com maior precisão) e o manual (com menor precisão), ressaltando-se que os custos financeiros do primeiro tipo de monitoramento são muito maiores que os do segundo.

Assim, as estimativas do deflúvio afluente diário para o ano de 2005 e parte de 2006 e 2007, quando realizadas somente por leitura das régua limnimétricas, podem ser admitida com exatidão próxima à dos resultados gerados em outros períodos com medidas automáticas.

Os resultados de avaliação do balanço hídrico para o acesso do deflúvio afluente no açude da BEA, até então mostrados neste capítulo, não só possibilitaram estimativas para todo o período entre 2003 e 2007, mas também deixaram claros os processos mais relevantes do funcionamento hidrológico, ou das trocas hídricas, de um pequeno reservatório (59.700 m³ de capacidade) do Semi-árido no período chuvoso, em escalas temporais diferentes (horário e diário).

Para obtenção da série completa de deflúvio afluente ao açude da BEA, estimaram-se vazões de sangria no ano de 2004, utilizando-se dois métodos diferentes, já que não foi possível realizar medidas diretas de vazão sangrada. No entanto, não foi possível uma validação de resultados, já que o açude não verteu durante esta pesquisa.

Nas Tabelas 5.10 e 5.11 são apresentadas as propriedades geométricas das seções e as propriedades das seções trapezoidais equivalentes, respectivamente. As seções foram numeradas de 1 a 3, no sentido de montante para jusante, a declividade da distância horizontal entre 1 e 2 foi de -0,0002 e entre 2 e 3 foi de -0,0185.

TABELA 5.10 – Propriedades geométricas das seções levantadas no vertedouro do açude da BEA, sendo numeradas em ordem crescente no sentido de montante para jusante.

Seção	Lâmina da Cheia (m)	Área Molhada (m ²)	Perímetro Molhado (m)	Raio Hiráulico (m)
1	0,425	7,5	58,2	0,13
2	0,25	1,5	21,4	0,07
3	0,188	0,9	10,9	0,08

TABELA 5.11 – Propriedades geométricas das seções trapezoidais equivalentes das levantadas no vertedouro do açude da BEA, sendo numeradas em ordem crescente no sentido de montante para jusante.

Seção	Inclinação do Talude (m)	Base Menor (m)	Base Maior (m)	Altura Hidráulica (m)
1	26,6	6,4	29,1	0,26
2	19,2	1,1	10,7	0,14
3	4,4	3,7	5,4	0,16

Dessa forma, foi possível determinar a relação entre largura do vertedouro e lâmina d'água a partir dos dados da seção 1 na Tabela 5.11.

Aplicando-se a equação 4.12 no trecho das seções para obtenção do coeficiente do vertedouro (k), considerando-se os dois métodos de solução, em que Δy é a diferença da altura d'água entre as seções e Δx é a distância horizontal (1: formulação empírico-qualitativo do coeficiente de *Manning* (n) e 2: calibração numérica do coeficiente de *Chézy* (C) e da vazão de sangria máxima ($Q_{\text{máx}}$)), obtive-se os seguintes resultados:

TABELA 5.12 – Resultados da equação 4.12 para dois métodos de solução.

Método	Trecho 1-2					Trecho 2-3				k_5 ($\text{m}^{0,5}/\text{s}^3$)
	n	C	$Q_{\text{máx}}$ (m^3/s)	$\Delta y_3/\Delta x_{4,\text{modelado}}$	$\Delta y/\Delta x_{\text{medido}}$	n	C	$\Delta y/\Delta x_{\text{modelado}}$	$\Delta y/\Delta x_{\text{medido}}$	
1	0,080	3,6	0,800	-	-0,023	0,030	15,8	-0,003	-0,005	0,216
2	-	3,5	0,757	-0,023	-	-	14,3	-0,006	-	0,205

1: Formulação empírico-qualitativo do coeficiente de *Manning* (n)

2: Calibração numérica do coeficiente de *Chézy* (C) e da vazão de sangria máxima ($Q_{\text{máx}}$)

³Diferença da altura d'água entre as seções

⁴Distância horizontal entre as seções

⁵Coefficiente do vertedouro

Os resultados descritos na Tabela 5.12 mostram proximidade do valor de $\Delta y/\Delta x$ modelado e medido do trecho 2-3 pelo método de solução 1, e convergência dos valores de C , de $Q_{\text{máx}}$ e, com efeito, de parâmetros de k estimados pelos dois métodos. Assim, adotou-se o valor do parâmetro k da formulação empírico-qualitativo por considerar as condições físicas da calha do vertedouro na estimativa do coeficiente de *Manning*.

O coeficiente de *Manning* foi determinado a partir do levantamento e observações em campo da calha do vertedouro (Figura 5.26), que é composta por um canal principal entre as seções 1 e 3, e pequeno canal secundário entre as seções 2 e 3. Em geral, existem diferenças físicas relevantes entre os trechos 1-2 e os trechos 2-3 (geometria, irregularidades, obstruções e cobertura vegetal).

A formulação de Pavlovskii (apud CHOW, 1973) foi à adotada para o cálculo do coeficiente de *Chézy*, em função do coeficiente de *Manning n*, pois foi a que produziu a menor diferença entre o gradiente modelado e o medido no trecho 2-3 (Tabela 5.12).



(A) Visão geral do calha do vertedouro, mostrando o fundo do canal principal entre as seções 1 a 3. (B) Trecho do canal secundário, existente entre as seções 1 e 2, com fundo coberto por vegetação.
FIGURA 5.26 – Calha do vertedouro com dois canais: um principal do trecho 1 a 3 e um secundário do trecho 1 a 2. Data: 10-05-2007. Foto do Autor.

Baseando-se no valor do coeficiente k e na relação da altura d'água e largura do vertedouro obtidos, determinou-se as vazões de sangria de 2004 e, com efeito, parte do deflúvio afluente para esse ano.

No período de sangria, aconteceram seis eventos chuva-deflúvio. Era esperado que a razão entre a vazão de sangria e a vazão de afluência fosse igual à unidade (princípio da continuidade e desprezando-se outras trocas hídricas), mas o valor médio da razão foi de 1,03 (erro médio de 3%), chegando a um erro máximo de 12%. Essa possível subestimativa do deflúvio afluente nesses eventos mostrou que se deve, posteriormente, refinar as estimativas das vazões de sangria e de afluência, principalmente realizando-se medidas.

Por fim, nas Figuras 5.27 a 5.31 são apresentados os hidrogramas afluente e de sangria no açude Boqueirão e a precipitação média da BEA com passos diários para os períodos chuvosos dos anos de 2003 a 2007.

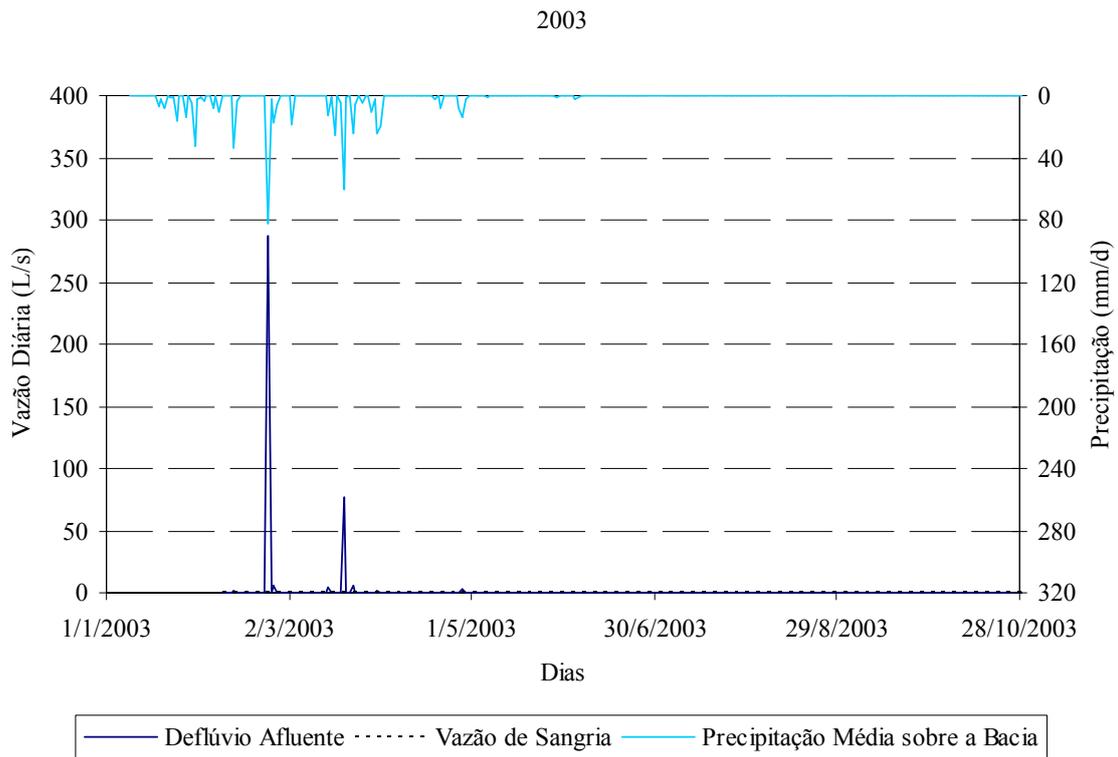


FIGURA 5.27 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BEA no período chuvoso de 2003.

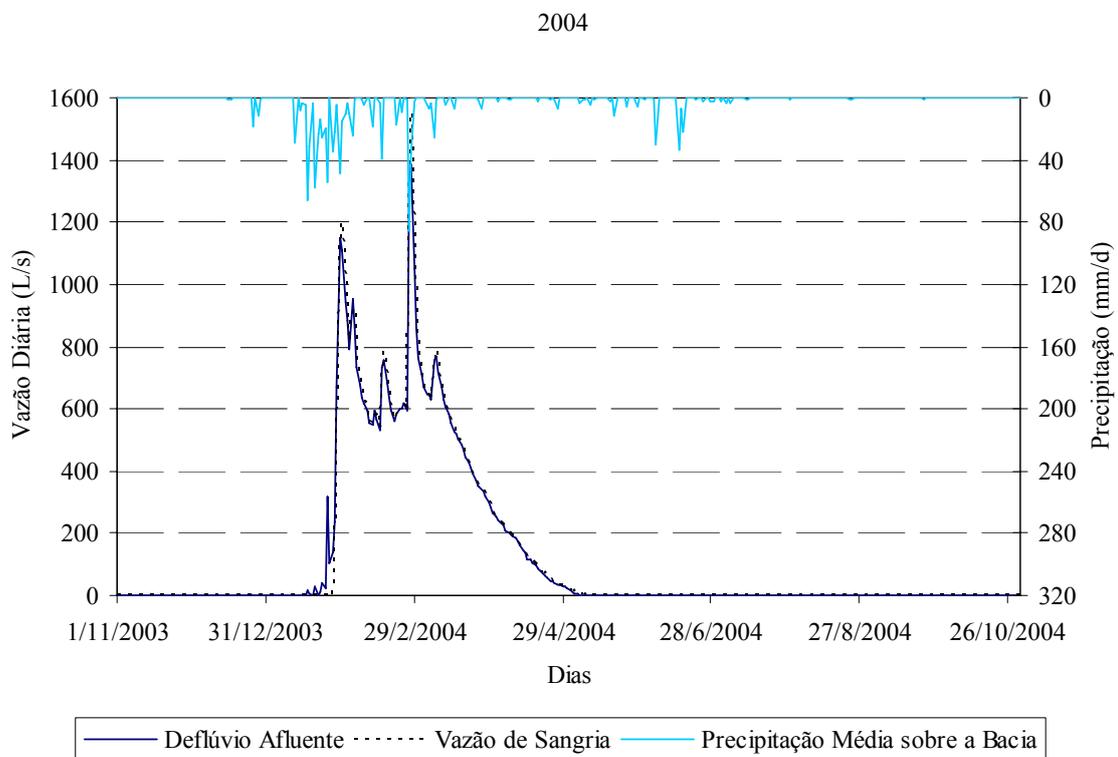


FIGURA 5.28 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BEA no período chuvoso de 2004.

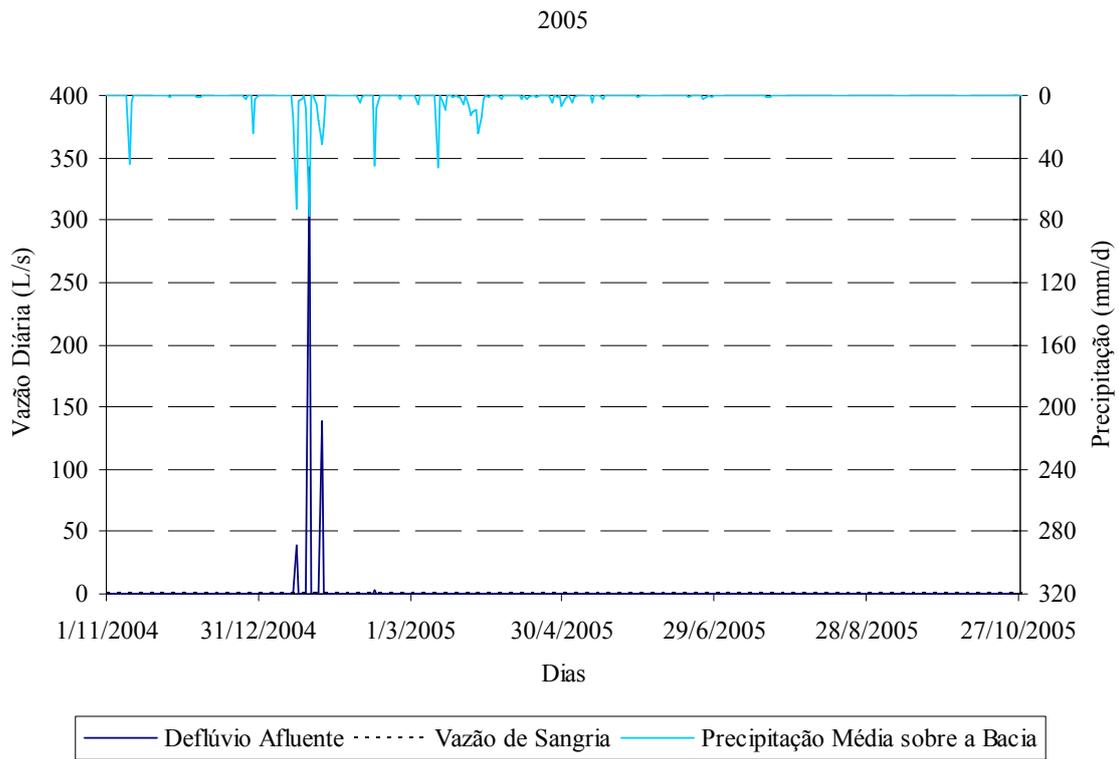


FIGURA 5.29 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BEA no período chuvoso de 2005.

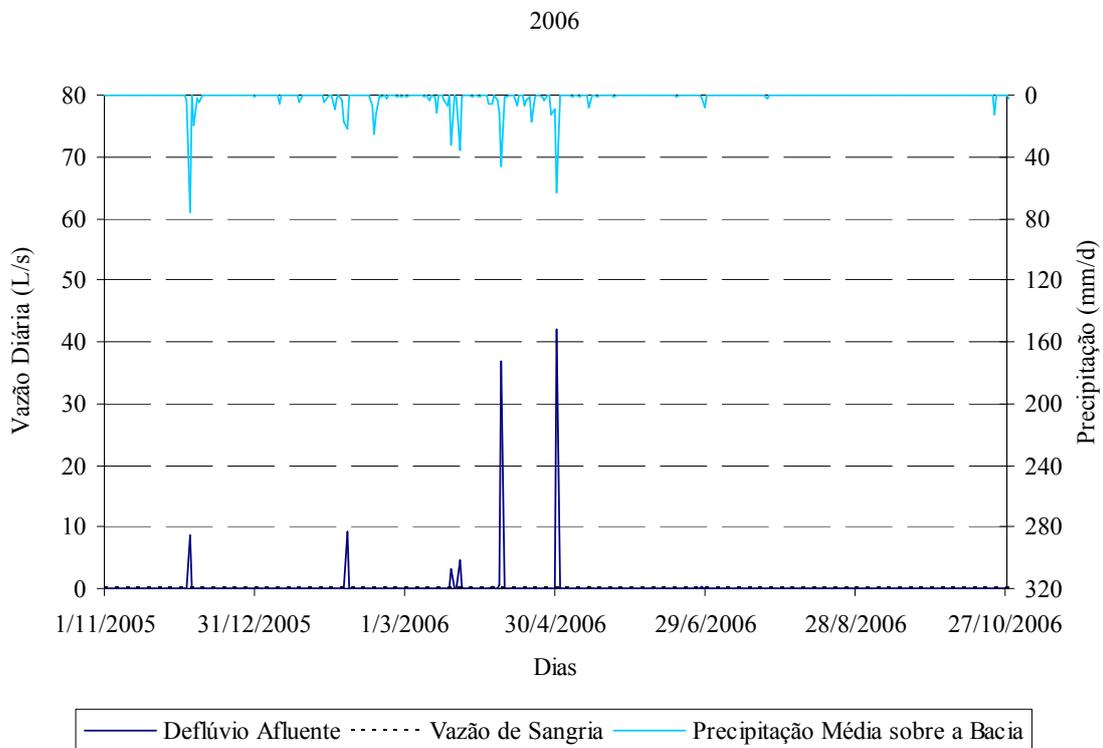


FIGURA 5.30 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BEA no período chuvoso de 2006.

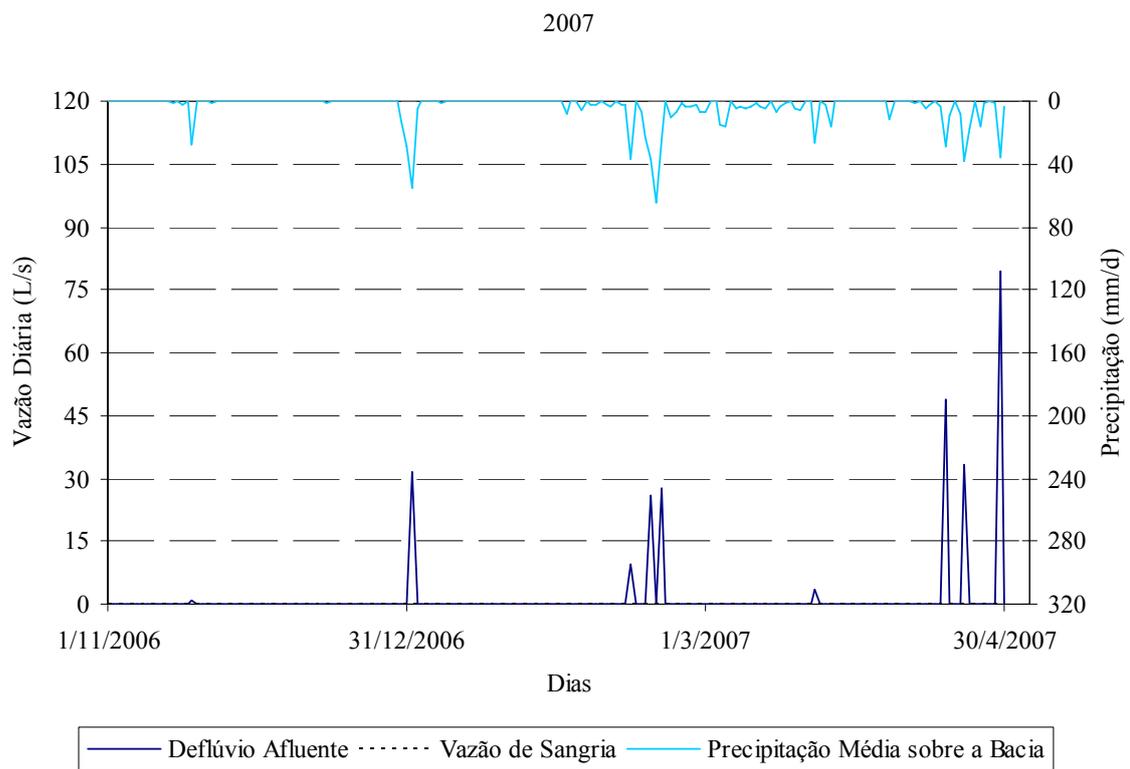


FIGURA 5.31 – Hidrograma afluente e de sangria no açude Boqueirão, e precipitação média sobre a BE no período chuvoso de 2007.

5.3.2 Eventos Chuva-Deflúvio e Produção de Sedimentos

Na Tabela 5.13 são mostrados parâmetros hidrológicos de 16 eventos chuva-deflúvio utilizados na avaliação de processos na escala temporal por evento. A precipitação (P) média da bacia apresentou alta variabilidade em relação aos parâmetros de intensidade média ($I_{\text{média}}$), de intensidade máxima em 5 minutos ($I_{\text{máx},5\text{min}}$) e de intensidade máxima em 30 minutos ($I_{\text{máx},30\text{min}}$) (Figura 5.32).

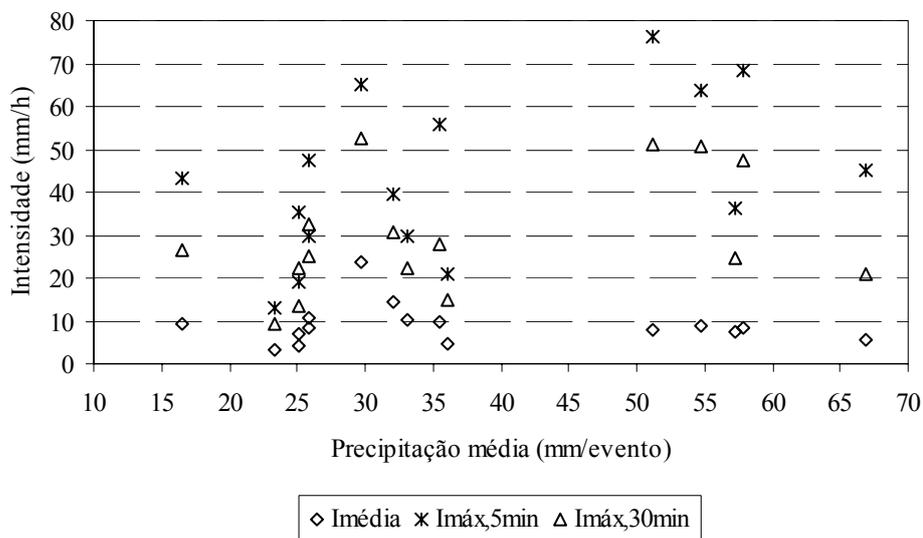


FIGURA 5.32 – Relação entre precipitação (P) média da BEA e os parâmetros de intensidade média ($I_{\text{média}}$), de intensidade máxima em 5 minutos ($I_{\text{máx},5\text{min}}$) e de intensidade máxima em 30 minutos ($I_{\text{máx},30\text{min}}$).

TABELA 5.13 – Parâmetros hidrológicos de eventos chuva-deflúvio da BEA, sendo P a precipitação, I a intensidade, Qap a vazão afluente de pico, Qa a vazão afluente, $\theta_{\text{antecedente}}$ a umidade média do solo a 15 cm de profundidade anterior ao evento, Int as perdas por interceptação, PInt porcentagem das perdas por interceptação em relação à precipitação, CR o coeficiente de *runoff* e CN o Número de Curva.

Data	P média (mm)	Duração P média (min)	I _{média} (mm/h)	I _{máx,5min} (mm/h)	I _{máx,30min} (mm/h)	Qap (L/s)	Qa (L/s)	Duração Qa (h)	$\theta_{\text{antecedente}}$ (%)	Int (mm)	PInt (%)	CR (%)	CN
12/2/2003	32,1	135	14,3	39,6	30,9	26	16,3	3	23,4	-	-	0,05	-
20/3/2003	25,9	215	8,3	47,4	32,5	89	70,3	4	23,6	-	-	0,32	49
20/3/2003	33,0	190	10,4	29,6	22,4	429	195,8	8	25,2	-	-	1,42	47
16/1/2004	67,0	725	5,5	45,1	21,1	118	34,4	12	-	8,3	12,37	0,18	27
18/1/2004	25,1	335	4,0	35,2	22,4	49	19,7	6	-	-	-	0,14	49
20/1/2004	57,3	450	7,6	36,2	24,7	233	70,9	9	-	7,1	12,39	0,33	31
21/1/2004	23,3	440	3,2	12,8	9,2	17	13,3	8	-	2,4	10,20	0,14	-
23/1/2004	25,1	215	7,0	19,2	13,3	223	80,8	12	-	1,5	5,94	1,15	-
25/1/2004	51,1	400	7,8	76,2	51,1	1861	337,1	29	-	-	-	5,71	43
23/3/2006	35,4	220	9,7	55,7	28,0	49	23,8	5	24,5	5,7	16,10	0,10	40
9/4/2006	16,6	105	9,5	43,1	26,4	39	22,5	2	24,7	0,5	3,08	0,08	59
9/4/2006	29,7	75	23,7	65,1	52,5	471	209,5	4	25,7	0,9	3,08	0,84	48
1/5/2006	57,9	380	8,5	68,2	47,3	330	144,0	7	26,0	4,1	7,06	0,52	31
1/1/2007	54,7	365	9,0	63,9	50,6	469	141,3	5,5	24,4	0,6	1,07	0,42	32
14/2/2007	36,1	455	4,8	20,8	15,0	41	35,3	6,0	22,8	6,5	18,02	0,18	39
23/3/2007	25,8	145	10,9	29,7	25,1	93	105,3	1,5	24,4	3,5	13,75	0,18	49

Os valores médios de variáveis climatológicas na estação da FUNCEME, localizada a 2 km da BEA, de quatro eventos chuva-deflúvio são apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Valores médios de variáveis climatológicas na estação da FUNCEME de quatro eventos chuva-deflúvio.

Data	Temperatura do Ar (°C)	Umidade do Ar (%)	Radiação de Onda-Curta (W/m ²)	Velocidade do Vento a 10 m (m/s)	Pressão Atmosférica (hPa)
23/3/2006	21,0	94,0	0,0	2,25	953,9
9/4/2006	20,5	95,8	29,6	1,20	950,8
9/4/2006	21,2	94,3	1,4	0,99	949,6
1/5/2006	21,4	95,3	18,3	1,42	953,0

A evaporação potencial calculada pelo método de Penman com base nos valores climatológicos médios (Tabela 5.14) foi sempre inferior a 0,1 mm sendo, portanto, desprezível durante os eventos.

Analisou-se o coeficiente de *runoff* (*CR*) de 16 eventos selecionados (Tabela 5.13), e os valores encontrados foram extremamente baixos com valor médio de 0,74% e com alta variabilidade, caracterizada por coeficiente de variação (*CV*) de 1,9. O valor médio de *CR* para os eventos selecionados também pode ser estimado dividindo-se o somatório da lâmina escoada pelo somatório da precipitação média, sendo igual a 0,86%.

Se se considerar não somente os eventos monitorados automaticamente (passo horário), mas também os eventos monitorados manualmente (passo diário), o *CR* médio foi de 0,61% e *CV* de 1,7.

Na amostra por evento, apenas em três eventos o *CR* superou 1%: no segundo evento do dia 20/3/2003, que seguiu um evento anterior poucas horas antes e nos eventos dos dias 23 e 25/1/2004, ano chuvoso atípico, com chuvas todos os dias. Já nos eventos diários analisados, apenas em sete o *CR* superou 1%.

Os valores de *CR* dos eventos, por serem extremamente baixos, entraram em conflito com outras observações em regiões semi-áridas:

- Coeficientes de *runoff* por evento de uma bacia experimental localizada na Estação Ecológica do IBAMA no Rio Grande do Norte, variou entre 1 e 12% (63% dos eventos com *CR* acima de 2% e 32% com *CR* acima de 4%) no ano hidrológico de 2003, e de 3,1 a 10,4%

(média de 6,16%) no ano hidrológico de 2004, em um ambiente caracterizado por vegetação de caatinga nativa e por solos rasos com afloramento de rocha (RIGHETTO et al., 2004b).

- Cinco eventos chuva-deflúvio em duas microbacias na bacia experimental de São João do Cariri na Paraíba, apresentaram coeficientes de *runoff* variando de 6,6 a 34,7%, com vegetação de caatinga esparsa e maiores declividades, e de 4,7 a 20,9%, com vegetação mais densa e menores declividades, no ano hidrológico de 2004 (SRINIVASAN et al., 2004).

- Uma microbacia vegetada no Semi-árido espanhol, caracterizada por alta infiltração dos solos e fraca erosão, apresentou coeficientes de *runoff* de eventos entre 0,03 e 4,1% (CANTÓN et al., 2001).

Na realidade, dividindo-se a capacidade do açude Boqueirão pela área da BEA tem-se que apenas 5 mm de precipitação efetiva são suficientes para encher o reservatório na sua capacidade máxima, caso o açude estivesse seco antes dos eventos chuva-deflúvio.

Comparando-se o coeficiente de *runoff* e a porcentagem das perdas por interceptação da chuva em relação ao total precipitado (PInt) por evento (Figura 5.33), percebe-se que a interceptação da chuva foi maior que a lâmina superficial escoada na BEA para eventos de diferentes magnitudes de precipitação, mostrando a relevância do processo de interceptação e, novamente, o baixo escoamento superficial.

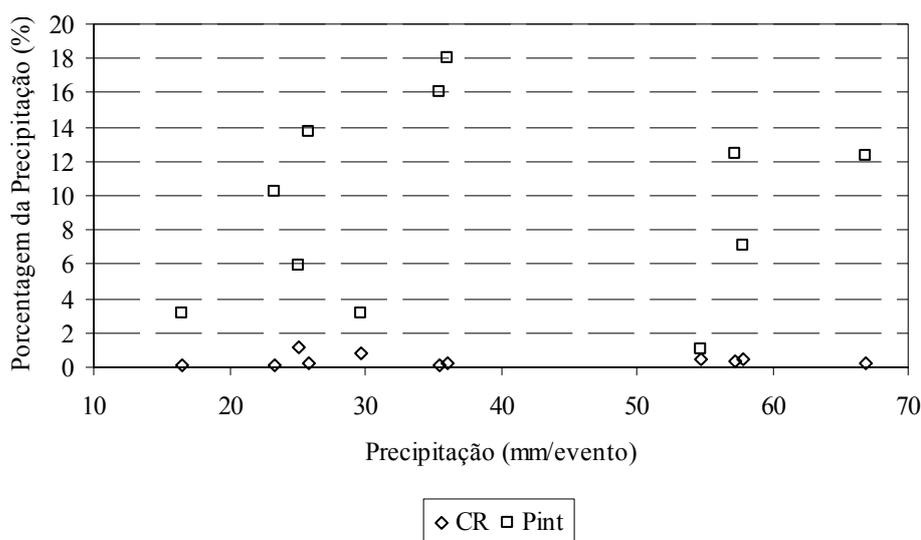


FIGURA 5.33 – Comparação entre o coeficiente de *runoff* (CR) e a porcentagem das perdas por interceptação da chuva em relação ao total precipitado (Pint) por evento na BEA (2003 – 2007).

A produção de sedimentos (SY, Tabela 5.15) apresentou razoável correlação positiva com o volume escoado de eventos chuva-deflúvio (Figura 5.34). O baixo escoamento superficial e a não significativa erosão também foram observados tanto para parcelas de 100 m² como para microbacias cobertas por vegetação de caatinga nativa ou de caatinga regenerada (SRINIVASAN; SANTOS; GALVÃO, 2003).

Já no Semi-árido espanhol, em uma microbacia vegetada, com alta infiltração nos solos, observou-se produção média de sedimentos de 7000 kg/km² por evento (CANTÓN et al., 2001).

TABELA 5.15 – Produção de Sedimentos de eventos chuva-deflúvio da BEA em que P é a precipitação, SST a concentração de sólidos suspensos totais e SY a produção de sedimentos.

Data	P média (mm)	Volume escoado (m ³)	SST (mg/L)	SY (kg/km ²)
20/3/2006	33	283	402	9
23/3/2006	35	428	285	10
9/4/2006	17	162	437	6
9/4/2006	30	3017	233	58
1/5/2006	58	3629	220	66
1/1/2007	55	2797	196	46
20/2/2007	24	2388	105	21
18/4/2007	28	4197	552	192
22/4/2007	38	2869	1117	266
29/4/2007	35	6879	509	291

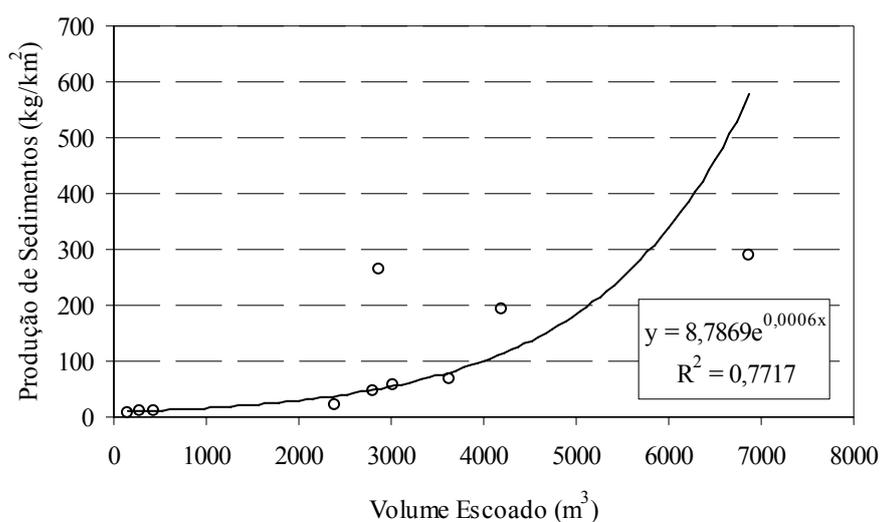


FIGURA 5.34 – Relação entre volume escoado e produção de sedimentos de eventos chuva-deflúvio da BEA em 2006 e 2007.

Assim, o tipo de cobertura vegetal e o baixo escoamento superficial devem ser os principais fatores para os valores de produção de sedimentos em eventos na BEA.

Dessa forma, o baixo escoamento superficial é a característica hidrológica mais relevante no processo chuva-deflúvio e produção de sedimentos na BEA. Quais os fenômenos hidrológicos responsáveis por esse baixo escoamento superficial, representado pelos valores encontrados de coeficientes de *runoff*?

Caracterizando-se o escoamento superficial, tendo como base os eventos da Tabela 5.13, observa-se que o escoamento se mostrou efêmero: a razão média entre as durações do deflúvio afluente e da precipitação é de somente 1,64 (Figura 5.35), ou seja, na média, o deflúvio afluente durou apenas 64% a mais do que o tempo da chuva.

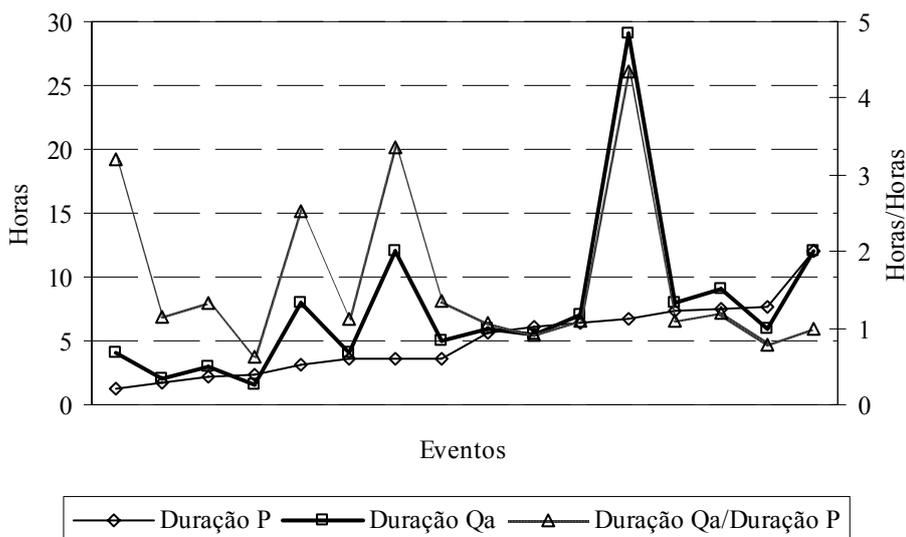


FIGURA 5.35 – Duração da precipitação (P), duração do deflúvio afluente (Qa) e relação entre as durações do deflúvio afluente e da precipitação na BEA (2003 – 2007).

Assim, as variações na intensidade da precipitação foram acompanhadas por mudanças rápidas no deflúvio. Fato observado, por exemplo, no evento do dia 1/1/2007 (Figura 5.36). Cantón et al. (2001) também observaram esse fenômeno em microbacias no semi-árido espanhol. Infere-se, devido a essa efemeridade, que o mecanismo de geração de deflúvio superficial predominante é o *hortoniano*.

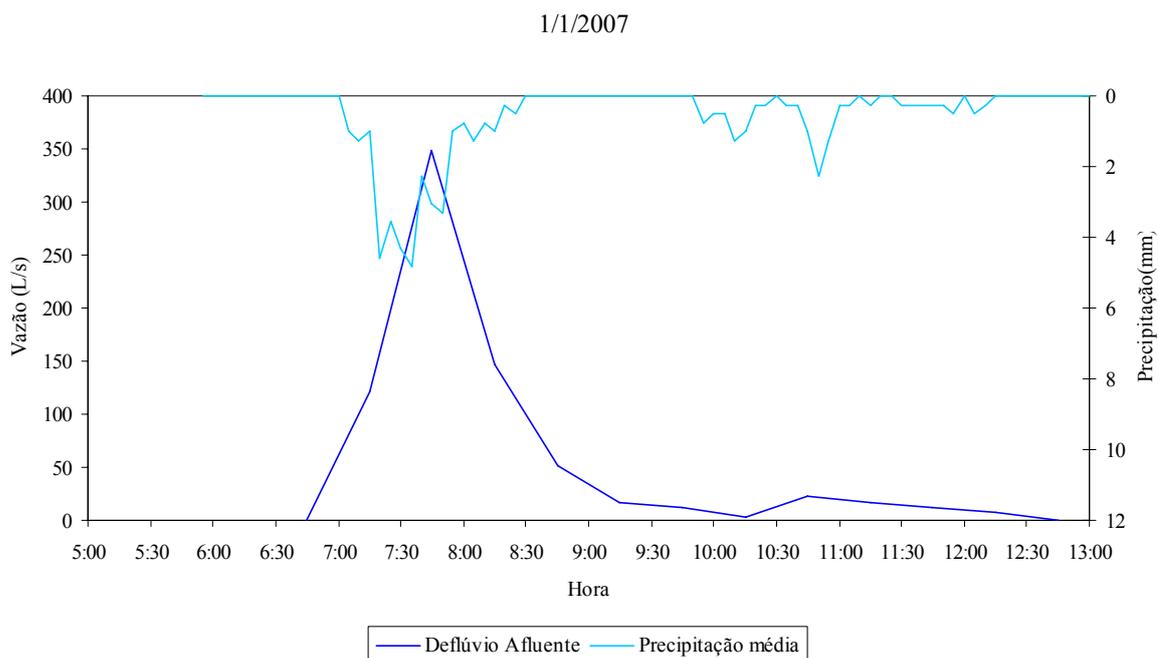


FIGURA 5.36 – Precipitação média da BEA a cada 5 minutos e hidrograma afluente ao açude Boqueirão a cada 30 minutos do evento chuva-deflúvio de 1/1/2007.

A grande dispersão dos valores de deflúvio afluente *versus* precipitação média da bacia, como demonstrado na Figura 5.37 para valores na escala de evento e na Figura 5.38 para valores na escala diária, mostra a influência de outros fatores no processo chuva-deflúvio, por exemplo, a alta variabilidade da intensidade da chuva (Figura 5.32).

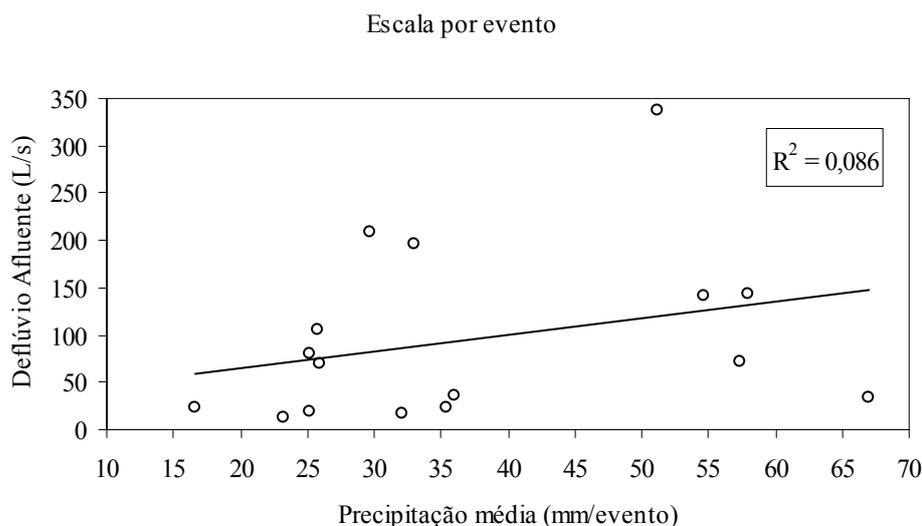


FIGURA 5.37 – Relação entre precipitação média na BEA e deflúvio afluente na escala de evento.

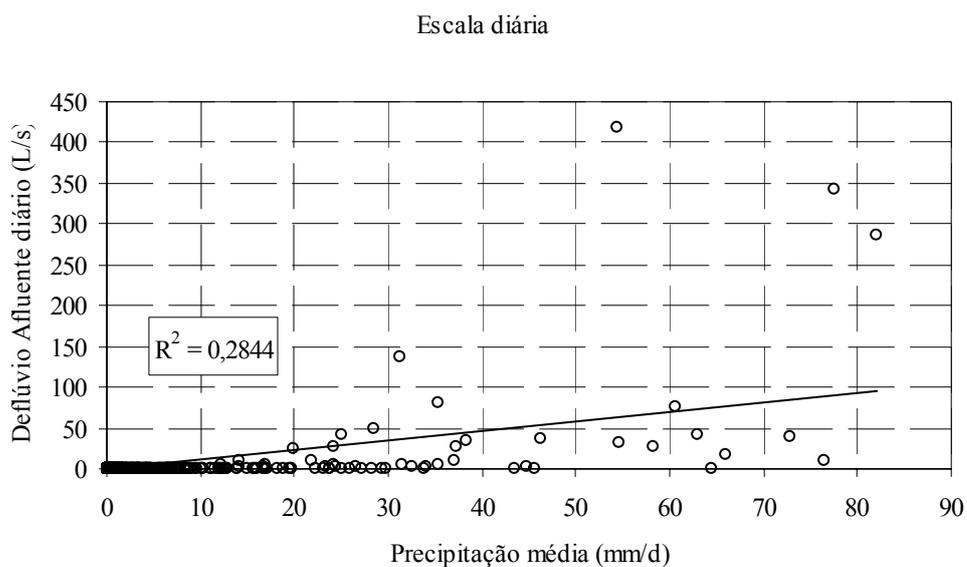


FIGURA 5.38 – Relação entre precipitação média na BEA e deflúvio afluente na escala diária.

Não foi encontrada relação satisfatória entre umidade do solo a 15 cm de profundidade antecedente aos eventos ($\theta_{\text{antecedente}}$) e CN dos eventos (Figura 5.39). O CN representa as perdas hídricas potenciais de uma bacia; quanto menor seu valor, maior será o armazenamento inicial de uma bacia. O valor médio no Número de Curva (CN) da BEA foi 42, com CV de 0,2.

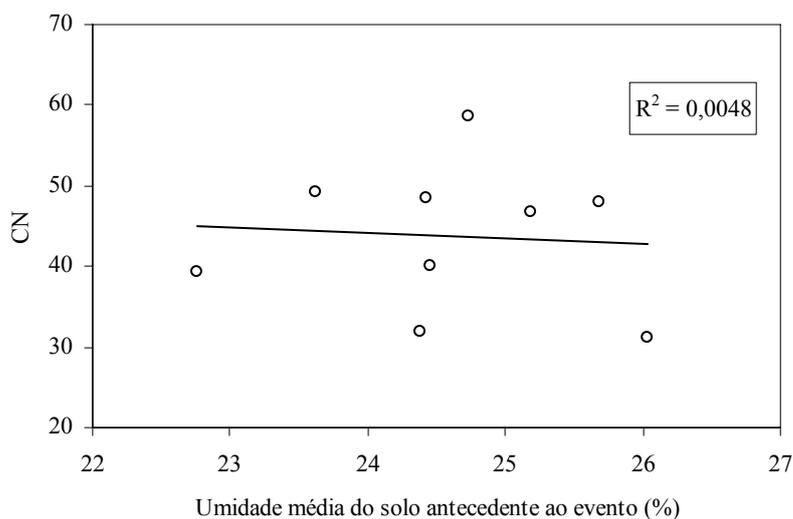


FIGURA 5.39 – Relação entre as condições antecedentes de umidade média do solo ao evento ($\theta_{\text{antecedente}}$) a 15 cm de profundidade e o CN na BEA (2003 – 2007).

Na escala diária, a correlação entre coeficiente de *runoff* e deflúvio afluente (Tabela 5.16) foi maior que a correlação múltipla entre coeficiente de *runoff* e as variáveis dependentes:

deflúvio afluente e umidade média do solo diária a 15 cm de profundidade (coeficiente de determinação múltiplo de 0,796). Na escala por evento, resultado similar foi observado: a correlação entre coeficiente de *runoff* e deflúvio afluente (Tabela 5.17) foi maior que a correlação múltipla entre coeficiente de *runoff* e as variáveis dependentes: deflúvio afluente e umidade do solo antecedente a 15 cm de profundidade (coeficiente de determinação múltiplo de 0,725).

Tabela 5.16 – Coeficientes de determinação entre o deflúvio afluente diário, umidade média do solo diária a 15 cm de profundidade e coeficiente de *runoff* (*CR*) na BEA (2003 – 2007).

No. de dados = 25	Deflúvio afluente	Umidade média do solo	<i>CR</i>
Deflúvio afluente	1	0,339	0,889
Umidade média do solo	-	1	0,369
<i>CR</i>	-	-	1

Tabela 5.17 – Coeficientes de determinação entre o deflúvio afluente por evento, umidade média do solo antecedente a 15 cm de profundidade e coeficiente de *runoff* (*CR*) na BEA (2003 – 2007).

No. de dados = 9	Deflúvio Afluente	Umidade antecedente do solo	<i>CR</i>
Deflúvio Afluente	1	0,655	0,849
Umidade antecedente do solo	-	1	0,511
<i>CR</i>	-	-	1

Considerando-se que a umidade média do solo a 15 cm de profundidade não possui boa correlação, quer com CN, quer com coeficiente de *runoff*, infere-se que a água a uma profundidade de 15 cm ou mais não influencia consideravelmente no processo chuva-deflúvio. Portanto, se existirem contribuições relevantes do escoamento subsuperficial para o deflúvio superficial, além do escoamento *hortoniano*, essas devem ocorrer a uma profundidade menor que 15 cm.

No trabalho realizado em uma microbacia do semi-árido cearense, em apêndice, com ocorrência relevante de água subterrânea na área, foi verificado, através do isótopo oxigênio-18 e do íon Na⁺, 90% de contribuição da água do próprio evento chuvoso no ramo descendente do hidrograma, ou somente 10% de escoamento de base.

Assim, devido aos valores encontrados de interceptação da precipitação e às características do escoamento superficial, as perdas elevadas no escoamento superficial (baixo *CR* em relação a outras observações por evento no Semi-árido) devem ocorrer:

- a. durante a própria geração de deflúvio, devido à alta capacidade de armazenamento da primeira camada de solo sob a vegetação e/ou,
- b. no trânsito da água gerada nas encostas até o exutório.

Alguns fatos, logo abaixo, apontam para a relevância no processo chuva-deflúvio no segundo aspecto. No trânsito da água no processo chuva-deflúvio, após a interceptação das árvores e dos arbustos, existem dois sistemas físicos principais da bacia hidrográfica: a serrapilheira nas encostas (cobertura de biomassa morta das plantas) e a rede de drenagem.

Em relação à serrapilheira, nas encostas, Medeiros (2005) mediu apenas 1,4 mm de capacidade de retenção de água da biomassa morta das plantas na BEA. Srinivasan, Santos e Galvão (2003) observaram também a independência entre a vegetação rasteira com cobertura morta e as lâminas escoadas, havendo diminuição da lâmina escoada apenas para pequenos eventos chuva-deflúvio, no entanto a erosão tornou-se praticamente zero, até mesmo quando ocorreram chuvas intensas.

Em relação à rede de drenagem, medições de vazões realizadas na EF1 em 2007 apontaram que as contribuições da bacia do riacho secundário foram maiores que as contribuições da sub-bacia da EF1 (na média de sete eventos em 2007 foi quatro vezes maior a vazão do riacho secundário, considerando-se conservadoramente que não há perdas entre a EF1 e o exutório da BEA).

Vale salientar que a área da sub-bacia da EF1 corresponde a 60% da área da BEA e o dobro da área da bacia do riacho secundário, e que as bacias dos riachos principal e secundário possuam características de cobertura vegetal, de solos e de geologia semelhantes (capítulo 3), sendo a maior parte da sub-bacia da EF1 caracterizada por solos rasos e afloramento de rocha no seu setor sul (litotipo Suíte Granitóide Serra do Deserto) (capítulos 3.3, 3.5 e 5.1).

Na Figura 5.40 é apresentado o hidrograma afluente ao açude Boqueirão da Figura 5.36 com o hidrograma na EF1, na Tabela 5.18 são mostradas as características das vazões monitoradas na EF1 e na Figura 5.41 é mostrado a relação entre o volume escoado na BEA e na EF1 em dias de escoamento.

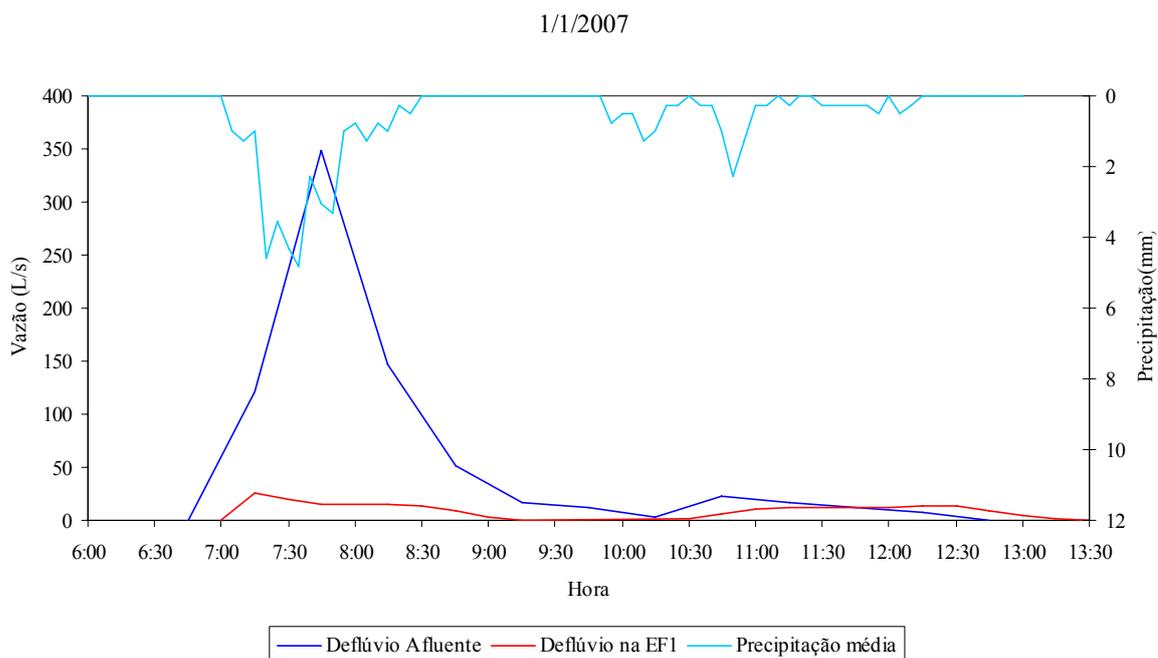


FIGURA 5.40 – Hidrograma afluente ao açude Boqueirão, hidrograma na EF1 e hietograma da precipitação média da BEA em 01 de janeiro de 2007.

TABELA 5.18 – Características das vazões monitoradas na EF1 da BEA em 2007.

Data de início do hidrograma	Duração (h)	$Q_{CP-Pico}$ (L/s)	Q_{CP} (L/s)	Volume escoado (m^3)
1/1/2007	5,5	28	11	218
14/2/2007	9,0	19	10	324
16/2/2007	2,0	10	4	29
17/2/2007	2,5	28	10	90
18/2/2007	3,5	21	13	164
19/2/2007	11,5	33	19	787
22/2/2007	1,5	10	5	27
25/2/2007	2,0	17	5	36
23/3/2007	2,5	22	12	108
18/4/2007	11,5	85	19	787
22/4/2007	10,5	55	20	756

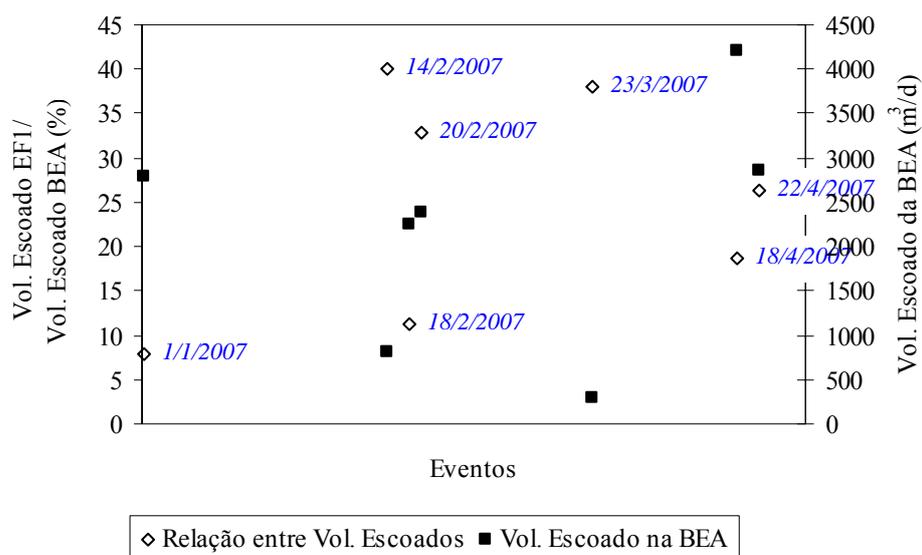


FIGURA 5.41 – Relação entre volume escoado na BEA e na EF1 e volume escoado na BEA em dias de escoamento no ano de 2007.

A diferença nas contribuições dos riachos se dá pelo fato de que o riacho principal no litotipo Formação Santarém é controlado por fraturas e/ou falha geológica na sua orientação N-S e E-W (ver Figura 5.1 e capítulo 3.5), enquanto o riacho secundário, não. As fraturas provocam perdas em trânsito consideráveis no escoamento superficial durante o processo chuva-deflúvio (fato observado também em campo, ver capítulo 5.2.2).

Assim, os baixos valores de coeficientes de *runoff* foram explicados, em parte, pelas perdas em trânsito no riacho principal da BEA controlado por fraturas e/ou falhas geológicas.

Dado esse fenômeno hidrológico, formula-se a seguinte hipótese hidrogeológica: a Bacia Experimental de Aiuaba é uma área de recarga de aquífero fraturado no Semi-árido, que condiciona, em parte, o baixo escoamento superficial da bacia e, conseqüentemente, juntamente com a densa cobertura de caatinga nativa, a sua produção de sedimentos.

Observou-se no município de Aiuaba, em cotas mais baixas que a da BEA, a existência de áreas de descarga: fontes de água e lagoas perenes.

5.4 Síntese Hidrológica

Na Tabela 5.19 são apresentados os valores médios mensais de 2003 a 2007 da precipitação, da lâmina escoada e do coeficiente de *runoff* (*CR*), considerando-se ou não o ano de 2004 devido a sua diferenciação hidrológica dos demais anos, e observando-se que os dados de 2003 não incluíram o mês de janeiro e os dados de 2007 foram de janeiro a abril.

TABELA 5.19 – Valores médios mensais da precipitação (P), da lâmina escoada (LE) e do coeficiente de *runoff* (*CR*), observando-se que os dados de 2003 não incluíram o mês de janeiro e os dados de 2007 são de janeiro a abril.

Mês	P ¹ (mm)	LE ¹ (mm)	CR ¹ (%)	P ² (mm)	LE ² (mm)	CR ² (%)
1	199	7,89	1,94	110	1,32	0,62
2	172	30,92	11,61	148	0,66	0,38
3	129	24,09	38,79	146	0,18	0,10
4	84	5,83	30,62	101	0,36	0,22
5	34	0,18	0,39	33	0,10	0,13
6	31	0,00	0,01	7	0,00	0,01
7	4	0,00	0,00	2	0,00	0,00
8	1	0,00	0,00	0	0,00	0,00
9	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
10	4	0,00	0,00	5	0,00	0,00
11	20	0,00	0,00	11	0,00	0,01
12	53	0,02	0,02	61	0,02	0,02
Média intranual	61	5,74	6,95	52	0,22	0,12
CV intranual	1,1	1,85	1,94	1,1	1,82	1,58

¹Considerando-se o ano de 2004.

²Desconsiderando-se o ano de 2004.

Na Tabela 5.20 são apresentadas as sínteses anuais de 2003 a 2007 em relação à precipitação, à lâmina escoada e ao *CR*, tendo as mesmas considerações e observações do parágrafo supracitado.

TABELA 5.20 – Síntese anual de 2003 a 2007 da precipitação (P), da lâmina escoada (LE) e do coeficiente de *runoff* (*CR*), observando-se que os dados de 2003 não incluíram o mês de janeiro e os dados de 2007 são de janeiro a abril.

	P ¹ (mm)	LE ¹ (mm)	CR ¹ (%)	P ² (mm)	LE ² (mm)	CR ² (%)
Média anual	663	67,32	6,54	566	2,29	0,41
CV interanual	0,35	2,16	2,10	0,14	0,58	0,58

¹Considerando-se o ano de 2004.

²Desconsiderando-se o ano de 2004.

Assim, diferenças relevantes existiram nas sínteses anuais e mensais da hidrologia da BEA em relação à consideração ou não do ano de 2004. Por exemplo, o *CR* médio anual foi 16

vezes menor quando não se considerou o ano de 2004, pois nesse ano a lâmina escoada na BEA foi 35 vezes maior que a soma das lâminas escoadas nos demais anos (2003, 2005, 2006, 2007).

Na Tabela 5.21 são apresentados os valores mensais da precipitação, da lâmina escoada, do *CR* e da produção de sedimentos de 2003 a 2007, para 4 eventos chuva-deflúvio no período de 2006 e 2007 foi necessário utilizar a equação da relação da Figura 5.34 para encontrar a produção de sedimentos.

TABELA 5.21 – Valores mensais da precipitação (P), da lâmina escoada (LE), do coeficiente de *runoff* (CR) e da produção de sedimentos (SY) na BEA (2003 – 2007).

Mês	2003			2004			2005			2006				2007			
	P (mm)	LE (mm)	CR (%)	P (mm)	LE (mm)	CR (%)	P (mm)	LE (mm)	CR (%)	P (mm)	LE (mm)	CR (%)	SY (kg/km ²)	P (mm)	LE (mm)	CR (%)	SY (kg/km ²)
1	-	-	-	467	27,59	5,90	252	3,73	1,48	17	0	0	0	61	0,23	0,37	46
2	169	2,12	1,25	269	151,93	56,54	62	0,02	0,04	105	0,07	0,06	14	256	0,45	0,18	85
3	195	0,63	0,32	62	119,74	193,54	156	0	0	102	0,06	0,06	20	131	0,02	0,02	10
4	55	0,02	0,04	18	27,72	152,22	23	0	0	143	0,27	0,19	64	181	1,16	0,64	749
5	3	0	0	37	0,43	1,17	20	0	0	77	0,30	0,40	66	-	-	-	-
6	4	0	0	103	0	0	7	0	0	10	0,003	0,03	0	-	-	-	-
7	0	0	0	12	0	0	2	0	0	2	0	0	0	-	-	-	-
8	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
9	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-	-	-	-
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	-	-	-	-
11	0	0	0	49	0	0	0	0	0	32	0,01	0,02	9	-	-	-	-
12	34	0,002	0,00	30	0	0	107	0,06	0,06	42	0	0	0	-	-	-	-
Total	460	2,8	0,60	1053	327	31,08	629	3,8	0,61	546	0,7	0,13	173	630	1,9	0,30	890
Média	42	0,3	0,1	88	27,3	34,1	52	0,3	0,1	45	0,1	0,1	14	157	0,5	0,3	222
CV	1,7	2,6	2,6	1,6	1,9	2,0	1,5	3,4	3,2	1,1	1,9	1,9	1,7	0,5	1,1	0,9	1,6

Relacionou-se a precipitação e a lâmina escoada mensais (Figura 5.42), em que nenhuma correlação razoável foi encontrada, pois existiram, principalmente, valores elevados de lâmina escoada em relação a precipitações mensais no ano 2004 (fevereiro, março e abril), em que a alta precipitação antecedente no mês de janeiro foi determinante (choveu quase a metade do ano todo em um único mês).

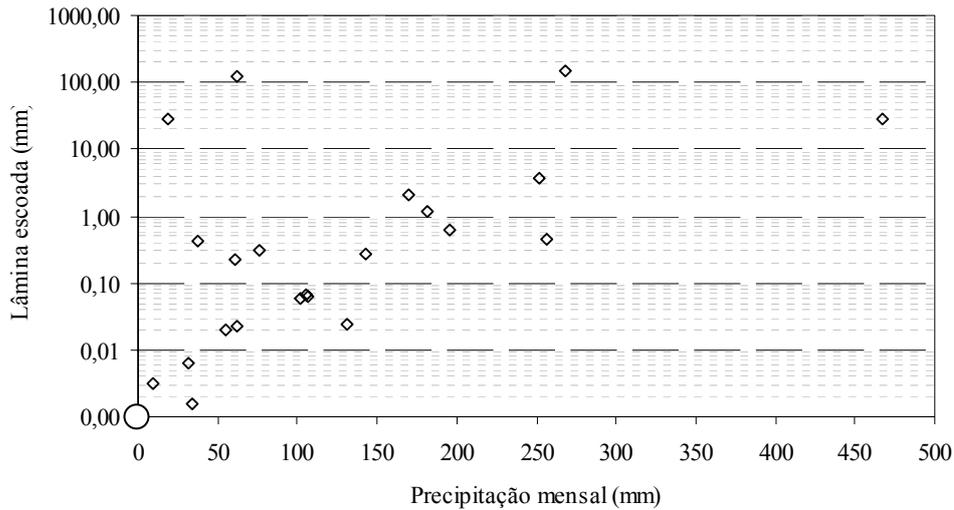


FIGURA 5.42 – Relação entre a precipitação e a lâmina escoada mensais na BEA (2003 - 2007), em que os valores de lâmina escoada estão em escala logarítmica.

Na Tabela 5.22 são apresentados dados de síntese hidrológica da BEA e de outras bacias experimentais monitoradas (acima de quatro anos de medição contínua) no rio Jaguaribe, Ceará (CAVALCANTE; DOHERTY; CADIER, 1990; CADIER, 1994).

TABELA 5.22 – Dados de síntese hidrológica da BEA e de outras bacias experimentais monitoradas (acima de quatro anos de medição contínua) no rio Jaguaribe, Ceará, em que *CR* é o coeficiente de *runoff*.

Bacia Hidrográfica	Área (km ²)	<i>CR</i> (%) anual máximo	<i>CR</i> (%) anual médio	Tempo de Monitoramento (anos)
Exp. de Aiuaba ¹	12,05	31,1	6,5	5
Pirangi ²	194,00	21,0	6,5	10
Mundo Novo ²	19,00	41,4	11,0	9
Moquem ²	7,76	32,0	13,0	10
João Fragoso ²	4,59	31,7	11,0	10
Açudinho ²	0,83	24,3	10,0	10
Caldeirão ²	0,77	25,7	13,0	8
Açude Luzimar ²	0,16	54,7	26,0	8
Chico ²	0,92	22,5	10,0	8
Açude Juazeiro ²	0,35	15,7	8,0	8
Nascimetinho ²	1,71	18,8	12,0	7
Juatama ³	19,20	30,0	15,5	5

¹Localizada no município de Aiuaba, pertencente à bacia do Alto Jaguaribe.

²Localizada no município de Tauá, pertencente à bacia do Alto Jaguaribe.

³Localizada no município de Quixadá, pertencente à bacia do Banabuiú (afluente do Jaguaribe).

Comparando-se os coeficientes de *runoff* das bacias experimentais, observou-se que o *CR* anual máximo da BEA superou em apenas 7% o valor médio, no entanto o *CR* anual médio foi 45% menor que o valor médio desse parâmetro. Assim, esse resultado indica baixo escoamento superficial médio na BEA (ver também capítulo 5.3.2). Para efeitos de comparação, utilizando-se o método de Aguiar (CAMPOS, 1996), o *CR* anual da BEA (bacia pequena, íngreme e rochosa) seria 10%.

O *CR* anual da BEA se equivale apenas ao *CR* anual da Bacia Hidrográfica do Pirangi, mas essa bacia com área de 194 km² conta com usos diversos das águas e dos solos e 25 açudes a montante do seu exutório (CADIER, 1994).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclusões

Conclui-se, com base nesta pesquisa, sobre o funcionamento hidrológico do açude da BEA (capacidade de 59.700 m³) que:

- O processo de infiltração do lago é relevante e da mesma ordem de grandeza da evaporação;
- A recarga subterrânea direta ao lago é desprezível em relação à evaporação e à infiltração;
- Durante os eventos chuva-deflúvio a evaporação, a infiltração e a recarga subterrânea são desprezíveis em relação à vazão afluente e à precipitação direta sobre o lago.

O método utilizado para estimativa da sangria do açude (capítulo 5.3.1) se mostrou confiável no passo diário, no entanto, devem-se realizar medições de vazões de sangria, quando possível, para sua validação.

Conclui-se, dos eventos chuva-deflúvio e produção de sedimentos, que:

- O coeficiente de *runoff* (*CR*) dos eventos é extremamente baixo, sendo as lâminas d'água escoadas menores que as lâminas interceptadas pela vegetação;
- O Número de Curva (CN) médio por evento foi 42 e CV de 0,2, sendo seus valores máximo e mínimo 59 e 27, respectivamente.
- A produção de sedimentos apresentou valores entre 9 e 291 kg/km² para eventos de 2006-2007, e média de 97 kg/km² por evento;
- O escoamento superficial é efêmero: na média, o tempo de deflúvio foi somente 64% maior que o tempo da precipitação por evento;
- As perdas elevadas no escoamento superficial ocorrem, em parte, por perdas em trânsito no riacho principal;
- A lâmina escoada na bacia do riacho secundário foi oito vezes maior que na bacia do riacho principal para eventos em 2007.

Nos eventos chuva-deflúvio inferiu-se que o mecanismo de geração de deflúvio superficial predominante é o *hortoniano* e que, se relevante, a contribuição do escoamento subsuperficial deve ocorrer a uma profundidade menor que 15 cm.

O *CR* médio anual da BEA foi 6,54% (máximo de 31,08% e mínimo de 0,13%). No ano de 2004 a lâmina escoada foi 35 vezes maior que a soma das lâminas escoadas nos demais anos (2003, 2005, 2006, 2007). Dos 1543 dias monitorados, em apenas 139 dias ocorreu escoamento (9%), sendo 28 dias de escoamento nos anos não-chuvosos (1,8%). Comparando-se o *CR* anual da BEA com outras bacias no rio Jaguaribe, a BEA foi uma das que apresentou menor coeficiente de *runoff*.

A produção de sedimentos em 2007 foi cinco vezes maior que em 2006. Para o biênio 2006-07 o mês de maior escoamento (abril de 2007) foi responsável por 71% da produção de sedimentos.

Formulou-se a hipótese de a BEA ser uma área de recarga de aquífero fraturado, que condiciona processos hidrológicos superficiais.

Caso confirmada a hipótese hidrogeológica acima mencionada, verifica-se mais uma justificativa para a existência da Estação Ecológica do IBAMA em Aiuaba, pois as áreas de recarga de aquífero devem ser áreas de preservação ambiental para conservação da água subterrânea, tratando-se ainda de uma área de recarga não documentada na literatura.

Recomendações

Recomenda-se para estudos de processos em eventos chuva-deflúvio e produção de sedimentos na BEA:

- Monitoramento da vazão e da concentração de sedimentos suspensos no riacho secundário e em mais de um ponto do riacho principal (a montante da Estação Fluviométrica 1);
- Estudos com traçadores naturais para identificação das fontes do deflúvio, baseando-se no estudo em apêndice, e para quantificação da evaporação e da infiltração do lago e comparando-se com os resultados do balanço de massa e de modelos isotópicos. Esses estudos podem ser fundamentais para o entendimento dos processos em anos hidrológicos chuvosos, por exemplo, o ano de 2004;
- Medição da umidade do solo em outros pontos da BEA e em profundidades variadas de solos;
- Realização de mapa pedológico em escala local da BEA;

- Estudos geofísicos para a comprovação da hipótese hidrogeológica levantada e, caso confirmado essa hipótese, a delimitação da área de recarga de aquífero nos *Inhamuns*, pois, visto a experiência na BEA, pode ser um elemento importante para os processos hidrológicos (relação rio-aquífero) em bacias hidrográficas de meso-escala, e como um recurso hídrico estratégico para a sociedade de uma das regiões mais secas do Brasil.

Em relação ao monitoramento da produção de sedimentos, deve-se continuar a avaliação das hipóteses envolvidas na medição para o acesso a concentração média de sedimentos suspensos nos eventos chuva-deflúvio na BEA (capítulo 5.2.3).

Recomenda-se a instalação e o monitoramento de bacias experimentais em outras bacias de planejamento do Ceará, como o Médio Jaguaribe e o Baixo Jaguaribe, para a construção de uma base de conhecimento técnico-científico dos processos hidrológicos necessários para a aplicação e a avaliação de novas tecnologias (por exemplo, modelos de simulação ambiental e técnicas em sensoriamento remoto), fundamentais para a gestão dos recursos naturais, principalmente no que tange a construção de cenários econômico-sociais de sociedades do Semi-árido Nordeste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, F. G. de (1939) *Boletim da Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS)* v. 1-2, n.1, jul.-set., Rio de Janeiro, p. 03-15.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998) *Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrig. Drain. Pap. 56, Rome: FAO, 300 p.

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-des Sciences Hydrologiques* 51(1): 157 - 170.

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

ARAÚJO, J. C.; BELO, P.; SILVA, R.; GERMANO, C.; FREITAS, M.; MEDEIROS, P. H. A. (2004a) Bacia experimental de Aiuaba, Ceará. *In: RIGHETTO, A. M. (org.) Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido*. Relatório Técnico, FINEP/FUNPEC, Natal.

ARAÚJO, J. C.; DOLL, P.; GUENTNER, A.; KROL, M.; ABREU, C. B. R. ; HAUSCHILD, M.; MENDIONDO, E. M. (2004b) Water scarcity under scenarios for global climate change and regional development in semiarid Northeastern Brazil. *Water International*, 29(2): 209-220

ASCE (1957) *Hydrology Handbook*. Manuals of Engineering Practice – No 28. American Society of Civil Engineers (ASCE), New York, USA, 184 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14545*: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7185*: determinação do peso aparente do solo “in situ” – método do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 7181*: análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

BELO, P. S. C. (2007) Contribuição ao Zoneamento da Zona de Amortecimento de uma Unidade de Conservação: Estudo de Caso ESEC Aiuaba, Ce. Dissertação de Mestrado. PRODEMA – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

BRONSTERT, A.; GÜNTNER, A.; ARAÚJO, J. C.; KROL, M. S.; JAEGER, A. (2005) *Possible climate change impacts on water resources availability in a large-scale semi-arid catchment in Northeast Brazil*. IAHS-Publications 295, Wallingford (GB), pp. 221-230.

CADIER, E. (1994) *Hidrologia das Pequenas Bacias do Nordeste Semi-Árido: Transposição Hidrológica*. Série hidrológica/ 31, SUDENE, Recife, 469 p.

CAMPOS, J. N. B. (1996) *Dimensionamento de Reservatórios: O Método do Diagrama Triangular de Regularização*. 1 ed. Fortaleza, Ceará: Edições UFC, 51 p.

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: 65 – 84.

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, 2003.

CAVALCANTE, N. M. da C.; DOHERTY, F. R.; CADIER, E. (1990) *Bacia Hidrográfica Representativa de Tauá: Relatório Final*. Série Hidrológica/ 28, SUDENE, Recife, 326 p.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos. (2005) *Consolidação da Política e dos Programas de Recursos Hídricos do Estado do Ceará: Atualização do Plano Estadual de Recursos Hídricos*. Fortaleza. Disponível em: <www.srh.ce.gov.br>. Acesso em: 15 dez. 2006.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. *Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Jaguaribe*. Fortaleza, 2000.

CHORLEY, R. J. The Hillslope Hydrological Cycle. In: KIRKBY, M. J. (ed) *Hillslope Hydrology*. A Wiley-Interscience publication, Norwich, UK.

CHOW, V. T. (1973) *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill International Editions, International Edition, 680 p.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. (1988) *Applied Hydrology*. McGRAW-HILL International Editions: Civil Engineering Series, Singapura, 572 p.

CLARK, I.; Fritz P. (1997) *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, USA, 328 p.

COSTA, C. A. G.; COSTA, A. C.; TEIXEIRA, A. dos S.; ALVES, N. N. de L.; ANDRADE, E. M. de; SOUSA, B. F. S.; LEÃO, A. de O. (2007) Comparação do uso do SRTM para delimitação e caracterização fisiográfica de uma microbacia hidrográfica. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII, Florianópolis. *Anais eletrônicos...* Florianópolis: INPE, 2007.

COSTA, A. C. (2006a) *Elaboração de um Banco de Dados Hidrológicos e sua Aplicação para o Estudo da Evaporação*. 37 f. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) – Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

COSTA, A. C. (2006b) *Banco de Dados da Bacia Experimental de Aiuaba – Ce e Aplicações na Quantificação Hidrológica*. Seminário sobre Sistema de Informações em Recursos Hídricos, FUNCEME, Fortaleza.

COSTA, A. C.; FRISCHKORN, H.; SANTAELLA, S.; GOMES, R. B.; FALCÃO, P.; ARAÚJO, J. C. (2007) Avaliação de Experimento de Separação do Hidrograma usando Traçadores Naturais em uma Pequena Bacia do Semi-Árido do Nordeste Brasileiro. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 59^a, Belém. *Anais eletrônicos...* Belém, SBPC, 2007.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER ME 52-64: determinação de umidade pelo método expedito “Speedy”*. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. *DNER ME 93-64: densidade real dos solos*. Rio de Janeiro, 1994.

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

FREIRE, N. C. F.; PACHECO, A. da P. (2005) Aspectos da detecção de áreas de risco à desertificação na região de Xingó. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento remoto, XI, Goiânia. *Anais Eletrônicos...* Brasil: INPE, 2005. Disponível em: <www.ltid.inpe.br/sbsr2005/>. Acesso em: 02 dez. 2005.

FRISCHKORN, H.; T.; ARAÚJO, J. C.; SANTIAGO, M. M. F. (2003) Water Resources of Ceará and Piauí. In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C. (eds.) *Global Change and Regional Impacts*. Springer Verlag, Berlin.

FUNCEME (2007). Segundo Prognóstico para o período das chuvas (fevereiro a maio de 2005) para o Estado do Ceará. Disponível em: <www.funceme.br/DEMET/boletins/avaliacao_chuva_ceara_jan_fev_2005.pdf> Acesso em: 09 abr. 2007.

GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C. (2003) (eds.) *Global Change and Regional Impacts*. Springer Verlag, Berlin, 428 p.

GAISER, T.; FERREIRA, L. G. R.; STAHR, K. (2003) General View of the WAVES Program In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C. (eds.) *Global Change and Regional Impacts*. Springer Verlag, Berlin, 428 p.

GRAY, D.M. (1973) *Handbook on the Principles of Hydrology*. Water Information Center, New York.

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

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2003) Large-Scale Hydrological Modeling of a Semiarid 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.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2004) Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. *Journal of Hydrology* 297: 136 – 161.

HAAN, C.T.; BARFIELD, B.J.; HAYES, J.C. (1993) *Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments*. Academic Press, San Diego, 588 p.

HARRELSON, C. C.; RAWLINS, C. L.; POTYONDY, J. P. (1994) *Stream channel reference sites: An illustrated guide to field technique*. United States Department of Agriculture. Forest Service General Technical Report RM-245.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2003) *Censo Demográfico 1991 Agregado por Setores censitários – Vol. 2 e 3 Região Nordeste*. Rio de Janeiro: IBGE. 1 CD-ROM

JOERIN C.; BEVEN K.J.; IORGULESCU I.; MUSY A. (2002) Uncertainty in hydrograph separations based on geochemical mixing models. *Journal of Hydrology* 255: 90 – 106.

KNIGHTON, A. D.; NANSON, G. C. (2001) An event-based approach to the hydrology of arid zone rivers in the Channel Country of Australia. *Journal of Hydrology* 254: 102 – 123.

KROL, M. S.; JAEGER, A.; BRONSTERT, A. Integrated Modelong of Climate Change Impacts in Northeast Brazil (2003) *In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C. (eds.) Global Change and Regional Impacts*. Springer Verlag, Berlin, 428 p.

LADOUCHE B.; PROBST, A.; VIVILLE, D.; IDIR, S.; BAQUÉ, D.; LOUBET, M.; PROBST, J.-L.; BARIAC, T. (2001) Hydrograph separation using isotopic, chemical and hydrological approaches (Strengbach catchment, France). *Journal of Hydrology* 242: 255 – 274.

LEÃO, R. A. O.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M.; OLIVEIRA, F. (2004) Delimitação e caracterização automática de uma microbacia hidrográfica da Fazenda Experimental Vale do Curu – Petencoste - CE. *Revista Ciência Agrônômica*, Fortaleza, v. 35, n. 1, p. 26-35, Jan.-Jun.

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, 2006.

MOTZ, L. H.; SOUZA, G. D.; ANNABLE, M. D. (2001) Water budget and vertical conductance for Lowry (Sand y Hill) Lake in north-central Florida, USA. *Journal of Hydrology* 250: 134 – 148.

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

MEDEIROS, J. R.; ARAÚJO, J. C. (2005) Modelagem da Interceptação no Semi-Árido Brasileiro: aplicação do modelo de Gash na Bacia Experimental de Aiuaba – CE. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XVI, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005.

MEROT P.; DURAND P.; MORISSON C. (1995) Four-component hydrograph separation using isotopic and chemical determinations in an Agricultural Catchment in Western France. *Physics and Chemistry of the Earth*. Vol.20, No 3 – 4: 415 – 425.

MISHRA, S. K.; TYAGI, J. V.; SINGH, V. P.; SINGH, R. (2006) SCS-CN-based modeling of sediment yield. *Journal of Hydrology* 324: 301 – 322.

MOLLE, F. (1989) *Perdas por Evaporação e infiltração em pequenos açudes*. Recife: SUDENE-DPG-PRN-GT.HME, Série Hidrológica, n. 25, 172 p.

MORTATTI J.; MORAES J. M.; RODRIGUES, J. R.; VICTORIA, R. L.; MARTINELLI, L. A. (1997) Hydrograph separation of the Amazon River using ^{18}O as an isotopic tracer. *Scientia Agricola* Vol. 54, No 3: 1 – 12.

MÜLLER, E. N.; MAMEDE, G.; FRANCKE, T.; BATALHA, R. J.; ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2005) *SESAM – Sediment Export from large Semi-Arid Catchments: Measurement and Modelling. Annual Report*. Potsdam: University of Potsdam, 87 p.

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

MUGABE, F. T.; HODNETT, M.; SENZANJE, A. (2007) Comparative hydrological behaviour of two small catchments in semi-arid Zimbabwe. *Journal of Arid Environments*, doi: 10.1016/j.jaridenv.2006.11.016.

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

PEREIRA, R. C. de M. (1982) Solos. In: OLIVEIRA, J. G. B. de (Ed) *Projeto Aiuaba*. Fortaleza.

PEREIRA, L. (2006) *Estudo Isotópico e Hidroquímico das Águas Superficiais e Subterrâneas no Semi-Árido Cearense em Área de Preservação Ecológica no Município de Aiuaba*. 123 f. Tese (Doutorado em Física) – Departamento de Física, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

RWALS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. (1993) Infiltration and Soil Water Movement. In: MAIDMENT, D. R. (org.) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill International Editions, International Edition.

RIGHETTO, A. M. (org.) (2004a) *Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido*. Relatório Técnico, FINEP/FUNPEC, Natal.

RIGHETTO, A. M.; MEDEIROS, V. M. A.; MOREIRA, L. F. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. A.; MATTOS, A. (2004b) Bacia Experimental de Serra Negra do Norte-RN. In: RIGHETTO, A. M. (org.) *Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido*. Relatório Técnico, FINEP/FUNPEC, Natal.

SANTIAGO, M. M. F. (1984) *Mecanismo de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará*. 176 f. Tese (Doutorado em Geociências) –, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

SILVEIRA, A. L. L. da (1993) Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (ed.) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, 943 p.

SHUTTLEWORTH, W. J. (1993) Evaporation. In: Maidment, D. R. (ed.) *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc.

SILANS, A. M. B. P. de; HAMILCAR, T. C. da S.; FILGUEIRA, J. A.; MOURA, E. M. de; LUCENA, A. P.; VITORINO FILHO, S.; SOUSA, E. E. de; ALMEIDA, C. das N.; LIRA, G. A. R. (2004) Bacia Experimental do Riacho Guaraíra-PB. In: RIGHETTO, A. M. (org.) *Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido*. Relatório Técnico, FINEP/FUNPEC, Natal.

SKLASH, M.G.; FARVOLDEN R.N.; FRITZ P. (1976) A conceptual model of watershed response to rainfall developed through the use of oxygen-18 as a natural tracer. *Canadian Journal of Earth Science* 13: 271 – 283.

SOULSBY, C.; RODGERS, P. J.; PETRY, J.; HANNAH, D. M.; MALCOLM, I. A.; DUNN, S. M. (2004) Using tracers to upscale flow path understanding in mesoscale mountainous catchments: two examples from Scotland. *Journal of Hydrology* 291: 174 – 196.

SRINIVASAN, V. S.; GALVÃO, C. de O.; SANTOS, C. A. G.; FIGUEIREDO, E. E.; REGO, J. C.; ALCÂNTRA, H. M. de; ALBUQUERQUE, J. P. T.; ARAGÃO, R.; MELO, R. N. T.; CRUZ, E.; GUEDES, G. A.; LACERDA, I.; Santos, L. L. dos; ALVES, F. M. (2004) Bacia Experimental de São João do Cariri-PB. In: RIGHETTO, A. M. (org.) *Implantação de Bacias Experimentais no Semi-árido*. Relatório Técnico, FINEP/FUNPEC, Natal.

TARDY Y.; BUSTILLO V.; BOEGLIN J.-L. (2004) Geochemistry applied to the watershed survey: hydrograph separation, erosion and soil dynamics. A case study: the basin of the Niger River, Africa. *Applied Geochemistry* 19: 469 – 518.

VALLET-COULOMB, C.; CHERNET, D. L. T.; GASSE, F.; TRAVI, Y.; CHERNET, T. (2001) Lake Evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). *Journal of Hydrology* 245: 1 – 18.

VANDERPLAATS, G. N. (1984) *Numerical optimization techniques for engineering design: with applications*. New York: McGraw-Hill, 333 p.

VERÍSSIMO, C. (2007) *Relatório Preliminar da Geologia da Bacia Experimental de Aiuaba*. Fortaleza: Grupo de Pesquisa Hidro-Sedimentologia do Semi-Árido, 6 p.

WERNER, P. C.; GERSTENGARBE, F.-W. (2003) The Climate of Piauí and Ceará. In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C. (eds.) *Global Change and Regional Impacts*. Springer Verlag, Berlin.

WOOLHISER, (1982) Physically Based Models of Watershed Runoff. In: Singh, V. P. (ed.) *Rainfall-Runoff Relationships*. Water Resources Publications, Colorado, USA.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. (1975) *Hidrologia Aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245 p.

XAVIER, T. M. B. S. (2001) *Tempo de Chuva: Estudos Climáticos e de Previsão para o Ceará e Nordeste Setentrional*. ABC Editora, Fortaleza, 476 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Avaliação de Experimento de Separação do Hidrograma usando Traçadores Naturais em uma Pequena Bacia do Semi-Árido do Nordeste Brasileiro

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Tendo em vista uma maior compreensão dos processos chuva-deflúvio em bacias hidrográficas, por exemplo, a quantificação do deflúvio superficial responsável pelo transporte de sedimentos das encostas para os rios, utiliza-se a técnica de separação do hidrograma usando traçadores naturais (SKLASH; FARVOLDEN; FRITZ, 1976; MEROT; DURAND; MORISSON, 1995; MORTATTI et al., 1997; CLARK; FRITZ, 1997; LADOUCHE et al., 2001; JOERIN et al., 2002 e TARDY et al., 2004).

Nesta técnica, a massa do traçador é uma propriedade extensiva do fluido no *Teorema de Transporte de Reynolds* e é conservativa (*Lei da Conservação da Massa*), tendo como efeito o balanço de mistura de componentes do hidrograma. Entretanto, a falta de monitoramento de fontes do deflúvio e/ou simplificações de processos naturais e antropogênicos envolvidos podem gerar, sobremaneira, incertezas que inviabilizariam a aplicação do balanço de mistura.

Dessa forma, em iguais condições de medição, pretende-se avaliar a performance de traçadores em determinar as componentes temporais do hidrograma de uma pequena bacia do semi-árido, comparando-se as proporções de vazões de pré-evento (água na bacia antes da chuva) e de evento (entrada de água na bacia durante a chuva), estimadas por traçadores geoquímicos, em relação às proporções calculadas pelo traçador ideal: o isótopo estável oxigênio-18 (^{18}O), pois, como faz parte da própria molécula d'água, não sofre efeitos de reação, dissolução e precipitação (CLARK; FRITZ, 1997). Este trabalho foi publicado por Costa, A. et al. (2007).

MATERIAL E MÉTODOS

Escolheu-se o distrito de Dourado no Município de Guaiúba no Ceará para realização do experimento. O estudo ocorreu em um maciço residual, chamado de Serrote de Cachoeira,

onde nasce o riacho intermitente Dourado. A área possui intervenção antrópica moderada, com vários usos d'água dos poços, áreas de cultivo e de pastoreio, com pequenos açudes.

Aplicou-se um balanço de mistura em uma seção do riacho Dourado para um evento chuva-deflúvio, em que os componentes foram as vazões de pré-evento e de evento. Para tanto, realizou-se coleta semanal de cinco poços artesanais (água subterrânea superficial) para a determinação da concentração dos traçadores na vazão de pré-evento (escoamento de base e parte do escoamento subsuperficial).

Durante o evento, realizou-se coleta da precipitação para amostra da vazão de evento (precipitação direta, escoamento superficial e parte do escoamento subsuperficial) e coleta da descarga na seção do riacho (resultado da mistura, com coletas após o pico do hidrograma). Os parâmetros analisados foram: pH, SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SiO_2 , alcalinidade total, condutividade elétrica (*CE*), e o isótopo estável ^{18}O ($\delta^{18}\text{O}$ ‰, que mede o enriquecimento ou empobrecimento neste isótopo, em ‰, em relação, ao padrão VSMOW – *Vienna Standard Mean Ocean Water*).

RESULTADOS

O valor médio de +4,53‰ para $\delta^{18}\text{O}$ da água subterrânea mostra um enriquecimento em ^{18}O , por interferência de águas bastante evaporadas, possivelmente da infiltração no solo das águas armazenadas dos pequenos açudes. Como o valor médio da chuva do evento foi de $\delta^{18}\text{O}$ igual a -4,03‰ e do deflúvio no riacho de -3,16‰, constata-se uma predominância da precipitação e do escoamento superficial no deflúvio do riacho.

Observando-se os valores médios de Cl^- e Na^+ das fontes hídricas monitoradas, percebe-se um enriquecimento de Cl^- no riacho, com aumento da *CE*, pois a relação Na^+/Cl^- no riacho é de 1:3,5; enquanto na água subterrânea é de 1:1,7 e na precipitação é de 1:0,3.

O balanço de mistura utilizando-se $\delta^{18}\text{O}$ mostrou uma proporção de vazão de pré-evento (ou escoamento de base) de 10%, igual valor apresentado para o íon Na^+ e próximo ao valor encontrado para a alcalinidade total (15%). Com os traçadores *CE*, Cl^- , Ca^{2+} e Mg^{2+} foram obtidos valores 29, 25, 33 e 28%, de contribuição de pré-evento respectivamente. Os demais

parâmetros não apresentaram diferenças suficientes entre as fontes hídricas monitoradas (interferência entre os intervalos de $\mu \pm \sigma$ das fontes).

Utilizando-se traçadores naturais, Ladouche et al. (2001) estimaram 70% de escoamento base em eventos de uma pequena bacia no leste da França e Sklash, Farvolden e Fritz (1976) determinaram em torno de 50% de escoamento de base em bacias em Ontario no Canadá.

CONCLUSÕES

Conclui-se que o escoamento de base para determinado intervalo (40 minutos) do ramo descendente do hidrograma de uma seção do riacho Dourado foi em torno de 10%. Recomenda-se para áreas similares a utilização de Na^+ e da alcalinidade total como traçadores naturais para experimentos de separação do hidrograma, pois demonstraram resultados similares em comparação com o $\delta^{18}\text{O}$, sendo o valor médio obtido através do Na^+ igual ao obtido para $\delta^{18}\text{O}$.

Na bacia do riacho Dourado foi constatado enriquecimento de Cl^- , e conseqüente aumento da CE , nas águas superficiais, possivelmente devido ao transporte pelo escoamento superficial (lixiviamento) de dejetos do gado pastoril.

Então, recomenda-se também o monitoramento do escoamento superficial para utilização do Cl^- e da CE como traçadores naturais em experimentos de separação do hidrograma. O Ca^{2+} e o Mg^{2+} demonstraram valores três vezes maiores do obtido com o traçador ideal ($\delta^{18}\text{O}$), sendo difícil a utilização desses como traçadores naturais, sem estudos ambientais na área sobre esses parâmetros.