

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

ROGÉRIO DEITALI BRUNO

**BALANÇO DE ÁGUA EM MICROBACIAS DE CERRADO RESTRITO E
EUCALIPTO: UM ESTUDO DE CASO COM MEDIDAS OBSERVACIONAIS**

São Paulo

2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ROGÉRIO DEITALI BRUNO

**BALANÇO DE ÁGUA EM MICROBACIAS DE CERRADO RESTRITO E
EUCALIPTO: UM ESTUDO DE CASO COM MEDIDAS OBSERVACIONAIS**

Tese apresentada ao Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências Atmosféricas.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Humberto Ribeiro da
ROCHA

São Paulo

2009

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Às minhas mães Francisca e Maria Luiza,
dedico com muita saudade.

À minha inspiração Valentina Piragibe,
dedico com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha, pela orientação científica, pela sensibilidade frente aos meus momentos de desesperança e de apreensão, e pela constante motivação a encontrar respostas em meio ao caos.

Ao meu pai Bardílio Deitali Bruno, quem me ensinou o essencial: a ter caráter, responsabilidade e tenacidade.

À minha amada Valentina, pelo irrestrito amor, por padecer minha ausência durante este trabalho e pela “bolsa consorte” desses últimos meses.

Ao meu irmão Reinaldo e à Adriane, pelo incentivo durante todos esses anos.

À Eliane e à Prof. Dra. Ideko, USP/Coseas, pelo apoio e pelo socorro nos momentos mais críticos dessa trajetória.

Ao pessoal da informática, amigos sempre de prontidão: Sebastião e Samuel. Muito obrigado pelo suporte computacional e moral, além dos cafezinhos, é claro.

À Emília Basílio, pelo comprometimento com este trabalho e pela extrema competência na organização e consolidação dos dados experimentais.

Ao Dr. Walter de Paula Lima e ao técnico Marco Aurélio F. Lopes pelos dados hidrológicos da Fazenda Cara Preta.

Ao Dr. Richard Silberstein, CSIRO, Austrália, pela cessão do código fonte do modelo hidrológico Topog e pela anônima presteza.

Ao Dr. Gré Lobo e à Bárbara, DAEE/CTH, pelos dados de pluviometria.

À Rose e ao Marcell por todo o apoio na secretária da pós. À Bete e à Sônia pelos constantes auxílios e ao pessoal da Biblioteca pelo sempre gentil atendimento.

Ao Prof. Dr. Augusto J. Pereira Filho pela apreço demonstrado durante esses anos.

Aos companheiros Vicente M.C. Calvo, Natacha B. Silva, Sérgio K. Abe, Marcelo A. Marchioli, Nilton do Carmo, Isabel Piragibe, “Seu” Piragibe e Lucy, Luiz Antônio J. Teixeira, José Guilherme M. dos Santos, Jonathan Mota, Allan Aroni, Josoaldo L. Rêgo, Margarete Barbosa, Naor Henrique dos Santos, Alcione Alvez e Marcos A. Vandresen pela consideração com este relapso e ausente ser.

Ao CNPq e à Capes, pelo suporte financeiro.

[...]

Não, não fale assim; disse o homem modelando

Modelando a superfície

Eu não durmo a mais de uma semana

Eu fico modelando, eu fico modelando, eu fico modelando

Modelando a superfície

Não sei o que você quer de mim; disse o homem com a pá

Cavando na lama

Eu tenho respirado toda essa sujeira

Eu fico aqui cavando, eu fico aqui cavando, eu fico aqui cavando

Cavando na lama

Modelando a superfície

O fogo na fornalha

Martelando na bigorna

Martelando na bigorna [...]

A Canção Do Martelo

Alex Harvey

Versão: *Marcelo Nova*

Matar o sonho é matarmo-nos.

É mutilar a nossa alma.

O sonho é o que temos de realmente nosso,
de impenetravelmente e inexpugnavelmente nosso.

Fernando Pessoa

RESUMO

BRUNO, R. D. Balanço de água em microbacias de Cerrado restrito e Eucalipto: um estudo de caso com medidas observacionais. 2009. 90 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

Este trabalho tem o objetivo de investigar o balanço de água sobre uma área de Cerrado *sensu stricto* e sobre uma plantação de Eucalipto, por meio do monitoramento de duas microbacias pareadas de pequena escala e representativas destes ecossistemas, onde foram feitas medições diretas da precipitação, vazão, evapotranspiração, umidade do solo e nível do aquífero, durante o período de 2001 a 2009, em Santa Rita do Passa Quatro, SP, com atividades realizadas no âmbito do Projeto Temático “Interação Biosfera-Atmosfera Fase 2: Cerrados e Mudanças de Uso da Terra”, do Programa Biota Fapesp. Os resultados da comparação do balanço de água e calor sobre as duas microbacias indicaram que a evapotranspiração média anual é predominantemente superior no Eucalipto em relação ao Cerrado, principalmente durante a estação chuvosa e a partir do 2º ano de plantio do Eucalipto. Durante o 1º ano de plantio de Eucalipto, a comparação foi inversa, ou seja, neste período a evapotranspiração foi comparável entre os dois locais. Resultado esse que corrobora a comparação da temperatura do ar máxima diária mais fria sobre o Eucalipto do que sobre o Cerrado, em função do favorecimento da partição de energia na evaporação da água. A comparação das médias anuais do deflúvio mostrou que há redução do deflúvio no Eucalipto após o 2º ano de plantio, em relação ao Cerrado. As duas microbacias foram monitoradas em um período de tempo de variabilidade climática interanual com redução da chuva, sem recuperação notável do deflúvio médio em ambas, mas o impacto foi maior na bacia de Eucalipto, que teve uma redução percentual de -150%, contra -75% no Cerrado. A variabilidade do nível do aquífero monitorado indicou que o balanço de água na superfície não está exatamente fechado devido à incerteza da recarga da água subterrânea, a qual provavelmente ocorre em uma escala espacial maior do que a microbacia de superfície. Ou seja, há incertezas indicando que o balanço de água formado apenas pelos termos de Precipitação, Evaporação e Umidade do Solo na zona radicular são insuficientes para responder pela completa variância do Deflúvio.

Palavras-chave: balanço hídrico, cerrado, eucalipto, modelagem hidrológica, mudanças de uso da terra, hidrologia

ABSTRACT

BRUNO, R. D. Water balance in both Cerrado restrito and eucalyptus watersheds: a case study based on observational measurements. 2009. 90 f. Thesis (Doctoral) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

This work aims to investigate the water balance in both a Cerrado *sensu stricto* area and a Eucalyptus plantation, based on monitoring of two paired watershed with representative vegetation of that ecosystems, where it was made direct measurements of rainfall, discharge, evapotranspiration, soil moisture content, and groundwater level, from 2001 to 2009, at Santa Rita do Passa Quatro, São Paulo State. It was running under “Biosphere-Atmosphere Interaction Phase 2: Cerrados e Land Use Changes” thematic project as part of Biota Program by Fapesp. The results of water and heat balances over two watersheds indicated that the annual mean evapotranspiration is more intense in Eucalyptus than Cerrado, mainly during the rainy season and also after the second year Eucalyptus plantation. During the first year, the results demonstrate the inverse situation, that is, in this period the evapotranspiration was almost the same in both sites. This finds confirm other result: the maximum daily air temperature was colder above Eucalyptus plantation than above Cerrado, because the energy partition for water evaporation processes. On the other hand, the comparison of annual mean discharge between two watershed demonstrated that it was decreasing on water yield in Eucalyptus watershed after second year plantation, in relation to Cerrado. Both watershed were monitored on a time period that the interannual climatic variability was dryer, so the mean discharge on both watershed do not recuperated the prior stage, but the impact was stronger on Eucalyptus watershed, that had a percentual reduction of -150% against -75% from Cerrado. The variability of the monitored groundwater level indicated that the water balance on surface is not exact closed, due the uncertain on groundwater recharge, wich probably have place on a bigger spatial scale than just that of surface basin. What means there are uncertain indicating that the water balance in function only precipitation, evaporation and soil moisture on root zone is not sufficient for explain the full variance of discharge.

Keywords: water balance, cerrado, eucalyptus, hydrological modelling, land use change, hydrology

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Porosidade (ϕ , em %), ponto de murcha permanente (PMP, em $m^3 m^{-3}$), capacidade de campo (CC, em $m^3 m^{-3}$), capacidade de água disponível (CAD, em $m^3 m^{-3}$) e total de água armazenável (H_2O) [*] para areia quartzosa. Valores estimados \pm erro experimental. Perfil de 2,5 m sob Cerrado, sítio experimental: PEG, Santa Rita do Passa Quatro, SP.....	25
Tabela 4.2. Relação das variáveis analisadas neste trabalho e coletadas nos sítios experimentais PEG e FCP, com instrumento utilizado, altura de instalação.	29
Tabela 4.3. Fluxos de calor sensível (H), calor latente (λE) e CO_2 ($F_c=R_D-A_C$) calculados em trajetórias especificadas com uma diferença de potencial e uma resistência determinada, onde (T_a, e_a) = temperatura e pressão de vapor d'água no espaço aéreo do dossel (K,Pa); (T_m, e_m)= temperatura e pressão de vapor d'água no nível de referência z_m (K,Pa); r_d = resistência aerodinâmica entre o solo e o espaço aéreo do dossel ($s m^{-1}$); r_a = resistência aerodinâmica entre o espaço aéreo do dossel e o nível de referência z_m ($s m^{-1}$); r_c = resistência estomática do nível superior do dossel ($s m^{-1}$); r_{soil} = resistência de superfície do solo nú ($s m^{-1}$); r_b = resistência da camada limite do dossel ($s m^{-1}$); h_{soil} = umidade relativa nos poros da superfície do solo; $e_s(T)$ = pressão de vapor de saturação à temperatura T (Pa); W_c = fração de cobertura de umidade e neve do dossel; W_g = fração de cobertura de umidade e neve do solo; c_a = pressão parcial de CO_2 no espaço aéreo do dossel (Pa); c_l = pressão parcial de CO_2 bulk interna das folhas (Pa).....	32
Tabela 4.5. Parâmetros descritos para a simulação de calibração do TOPOG e profundidades (em m) dos nós do perfil de solo para cada elemento da topografia da microbacia.....	42
Tabela 4.6 – Dados dos poços de monitoramento, com profundidade obtida no final da construção e nível do aquífero (NA) medido.	43
Tabela 5.1. Precipitação acumulada (em mm) durante as estações úmida (de 01 de setembro do ano anterior a 30 de abril do ano corrente) e seca (de 01 de maio a 31 de agosto do ano corrente) e Precipitação total anual (em mm, ano hidrológico: de 01 Setembro a 31 de Agosto), com respectivas percentagens, para os anos de 2002 a 2009, observadas na área experimental.....	54
Tabela 5.2. Totais anuais (ano hidrológico de 01 de setembro a 31 de agosto do ano subsequente) das componentes precipitação, evapotranspiração e deflúvio, todas em mm, para o balanço hídrico das microbacias de Cerrado e de Eucalipto, de 2004 a 2009. (Valores em negrito indicam a microbacia de maior valor anual)	76
Tabela 5.3. Balanço hídrico para a bacia da Fazenda Cara Preta, Santa Rita do Passa Quatro, SP, de 2004 a 2008. (Valores em negrito indicam a microbacia de maior valor anual). Falhas nos períodos conforme descrito na Tabela 5.2.....	77
Tabela 5.4. Evapotranspiração média anual (em mm) estimada pelo balanço hídrico simplificado (Ebal) e medida diretamente (Eobs) nos sítios experimentais do Cerrado e do Eucalipto para os anos hidrológicos (de 01 de setembro a 31 de agosto do ano subsequente) de 2005-06 a 2008-09.	78
Tabela 5.5. Valores da Relação Deflúvio/Precipitação, área da bacia (em km^2), tipo da cobertura vegetal e localização da bacia hidrográfica, e autor do estudo.	78

LISTA DE FIGURAS

- Figura 4.1. Mapa geopolítico do estado de São Paulo com destaque para a localização do município de Santa Rita do Passa Quatro (área em azul). No detalhe, mapa do Brasil com destaque para a localização do estado de São Paulo (área em vermelho). 21
- Figura 4.2. Área experimental na região da Gleba Cerrado Pé-de-Gigante (aproximada no perímetro azul) com torre de fluxos indicada no ponto amarelo Cerrado e vertedor no ponto Vc, e plantação de Eucalipto com torre de fluxos indicada no ponto amarelo Eucalipto e vertedor no ponto VE (com bacia aproximada no contorno azul). Fonte da imagem original: Google. 23
- Figura 4.3. Médias climatológicas (normais) das variáveis precipitação (em mm mês⁻¹, barras cinzas), medida no posto do DAEE C4-096 localizado em Luiz Antônio, SP, (21° 35'S, 47° 42'W, altitude de 670 m) no período de 1970 a 2006, e temperatura do ar média mensal (em °C, linha preta com quadrados vazados), medida no posto do DAEE C4-107 localizado em Santa Rita do Passa Quatro, SP, (21° 43,'S 47° 28'S, altitude de 715 m) no período de 1941 a 1070. 26
- Figura 4.4. (a) Vista da Gleba Pé de Gigante na direção sudeste, de visada do topo da torre de 21 m, com anemômetro convencional ao lado; (b) Sistema de eddy-covariance com 3m de altura sobre Eucalipto (em 27/08/2003) após a colheita e (c) Torre de fluxos sobre plantação de eucalipto (Janeiro 2005), no lado inferior da foto, com Linha de energia no lado superior, na Fazenda Cara Preta. (Fotos: Laboratório de Clima e Biosfera, IAG/USP). 28
- Figura 4.5. (a) Vertedor com régua limnológica na foz da Gleba Pé de Gigante; (b) Vertedor na Fazenda Cara Preta (c) Perfil de refletômetros de medição de umidade do solo. (Fotos: Laboratório de Clima e Biosfera, IAG/USP)..... 28
- Figura 4.6. Fluxo de calor latente médio diário (em W m⁻²): (a) na área de Cerrado durante o ano de 2001, observado (linha) e calculado pelo modelo SiB2 calibrado (linha). Fonte: Martins (2010). 33
- Figura 4.7. Fluxo de calor sensível médio diário (em W m⁻²): (a) na área de Cerrado durante o ano de 2001, observado (linha) e calculado pelo modelo SiB2 calibrado (linha). Fonte: Martins (2010). 33
- Figura 4.8. Fluxo de calor latente médio diário (em W m⁻²) na área de Eucalipto durante o período de Setembro 2006 a Agosto 2007, observado (linha azul) e calculado (linha preta) pelo modelo SiB2 calibrado (linha), e precipitação média diária (em mm dia⁻¹). Fonte: Martins (2010). 34
- Figura 4.9. Fluxo de calor sensível médio diário (em W m⁻²) na área de Eucalipto durante o período de Setembro 2006 a Agosto 2007, observado (linha azul) e calculado (linha preta) pelo modelo SiB2 calibrado (linha), e precipitação média diária (em mm dia⁻¹). Fonte: Martins (2010). 34
- Figura 4.10. Fluxo de calor latente médio diário (em W m⁻²) na área de Eucalipto durante o período de Setembro 2007 a Agosto 2008, observado (linha azul) e calculado (linha preta) pelo modelo SiB2 calibrado (linha), e precipitação média diária (em mm dia⁻¹). Fonte: Martins (2010). 35

Figura 4.11. Fluxo de calor sensível médio diário (em $W m^{-2}$) na área de Eucalipto durante o período de Setembro 2007 a Agosto 2008, observado (linha azul) e calculado (linha preta) pelo modelo SiB2 calibrado (linha), e precipitação média diária (em $mm dia^{-1}$). Fonte: Martins (2010).	35
Figura 4.12. Mapa de localização dos poços de monitoramento nas áreas da reserva Pé-de-Gigante (PDG1, PDG2 e PDG3, em vermelho) e da Fazenda Cara Preta (CP1 e CP2, em amarelo). Referência: imagem Google Earth (2004).....	43
Figura 4.13. Bloco diagrama da área de Cerrado (Gleba Pé de Gigante), indicando as correntes de fluxo de água subterrânea, em concordância com a topografia. Fonte: Zamprogno et al. (2005).	44
Figura 5.1. Irradiância solar global incidente média diária (em $W m^{-2}$) medida na área experimental, de 2003 a 2009 (dados coletados no sítio experimental PEG, completados com dados do sítio experimental).	46
Figura 5.2. (a) Ciclo anual da irradiância solar global incidente média mensal (em $W m^{-2}$) medida nos sítios PEG (linha preta com quadros pretos) e FCP (linha vermelha com círculos vermelhos), com respectivos desvios-padrão (barras verticais); e (b) comparação entre as médias diárias da irradiância solar global incidente (em $W m^{-2}$) medidas nos sítios PEG e FCP. Com destaque para o resultado da regressão linear com interceptação na origem e reta 1:1 (linha vermelha). Período de junho de 2003 a agosto de 2009.	47
Figura 5.3. Temperatura do ar média diária (em $^{\circ}C$) medida na área experimental, de 2003 a 2009 (dados coletados no sítio experimental PEG, completados com dados do sítio experimental).....	48
Figura 5.4. Relação entre temperatura do ar (A) mínima, (B) média e (C) máxima, em $^{\circ}C$, valores diários medidos nas torres micrometeorológicas dos sítios experimentais do Cerrado e do Eucalipto. A reta pontilha em azul é o ajuste linear com coeficiente angular igual a 1. Dados obtidos em 2003.....	50
Figura 5.5. Relação entre temperatura do ar (A) mínima, (B) média e (C) máxima, em $^{\circ}C$, valores diários medidos nas torres micrometeorológicas dos sítios experimentais do Cerrado e do Eucalipto. A reta pontilha em azul é o ajuste linear com coeficiente angular igual a 1. Dados obtidos nos anos de 2005 a 2009.	50
Figura 5.6. Médias mensais das temperaturas do ar (a) mínima e (b) máxima, medidas nos sítios Cerrado e Eucalipto, entre os anos de 2005 a 2009.	51
Figura 5.7. Precipitação acumulada diária (em $mm dia^{-1}$) medida na torre micrometeorológica do sítio PEG e complementada com dados obtidos na torre micrometeorológica do FCP, nos vertedores e nas estações C4-096 e C4-107 do DAEE.	52
Figura 5.8. Distribuição do número de dias que ocorreram diferentes volumes de precipitação na área experimental, entre os anos de 2003 e 2009.	52
Figura 5.9. (A) Precipitação acumulada mensal (em $mm mês^{-1}$) medida na área experimental; (B) desvios normalizados (em $mm mês^{-1}$) em relação à precipitação média normal obtida na estação meteorológica do DAEE (C4-107) em Santa Rita do Passa Quatro, SP; (C) Precipitação acumulada anual (em mm, áreas cinzas) medida na área experimental de 1° de setembro a 31 de agosto do ano subsequente, Precipitação acumulada na estação seca (em mm, barras vermelhas) e na estação chuvosa (em mm, barras vermelhas), medida na área experimental de 1° de maio a 31 de agosto e de 1° de setembro a 30 de abril, respectivamente.	53

Figura 5.10. Comparação entre os sinais já calibrados dos sensores de umidade do solo instalados no sítio do Eucalipto.	55
Figura 5.11. Séries históricas da (A) Precipita�o diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) entre os anos de 2001 e 2002.	56
Figura 5.12. Séries históricas da (A) Precipita�o diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) entre os anos de 2003 e 2004.	57
Figura 5.13. Séries históricas da (A) Precipita�o diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) entre os anos de 2005 e 2006.	57
Figura 5.14. Séries históricas da (A) Precipita�o diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) entre os anos de 2007 e 2008.	58
Figura 5.15. Séries históricas da (A) Precipita�o diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) no ano de 2009.	58
Figura 5.16. Rela�o entre o grau de satura�o da umidade no solo (em $m^3 m^{-3}$) medida nos sítios experimentais do Cerrado (PEG) e do Eucalipto (FCP)	60
Figura 5.17. Campo do grau de satura�o da umidade no solo (em %) medida no sítio experimental do Cerrado e precipita�o diária medida na área experimental.	61
Figura 5.18. Campo do grau de satura�o da umidade no solo (em %) medida no sítio experimental do Eucalipto e precipita�o diária medida na área experimental.	62
Figura 5.19. Compara�o da umidade nos níveis rasos do eucalipto, nos períodos de desenvolvimento inicial com o período de desenvolvimento avançado da vegeta�o.	63
Figura 5.20. Fluxo de calor latente médio diário (em $W m^{-2}$ no eixo � esquerda e em $mm dia^{-1}$ no eixo � direita) sobre o Cerrado (linha sólida preta) e sobre o Eucalipto (linha sólida vermelha), nos períodos bienais de (a) 01/01/2003 a 31/12/2004, (b) 01/01/2005 a 31/12/2006, (c) 01/01/2007 a 31/12/2008.	64
Figura 5.21. Rela�o entre o fluxo de calor latente médio horário (em $W m^{-2}$) sobre o Cerrado (PEG) e sobre o Eucalipto (FCP), nos períodos de (a) 2003-04, (b) 2004-05, (c) 2005-06, (d) 2006-07, (e) 2007-08, e (f) 2008-09.	66
Figura 5.22. Fluxo de calor sensível médio diário (em $W m^{-2}$) sobre o Cerrado (linha sólida preta) e sobre o Eucalipto (linha tracejada vermelha), nos períodos bienais de (a) 01/01/2003 a 31/12/2004, (b) 01/01/2005 a 31/12/2006.	67
Figura 5.23. Rela�o entre o fluxo de calor sensível médio horário (em $W m^{-2}$) sobre o Cerrado (PEG) e sobre o Eucalipto (FCP), nos períodos de (a) 2003 e (b) 2005 a 2009.	68
Figura 5.24. Cota (em mm) e Precipita�o (em $mm dia^{-1}$) observados nos sítios do Cerrado (em preto) e do Eucalipto (em vermelho), desde 270/2003 a 186/2009.	69

Figura 5.25. Vazão (em $m^3 s^{-1}$) e Precipitação (em $mm dia^{-1}$) observados nos sítios do Cerrado (em preto) e do Eucalipto (em vermelho), desde 270/2003 a 186/2009.....	70
Figura 5.26. Deflúvio (em $mm dia^{-1}$) e Precipitação (em $mm dia^{-1}$) medidos nos sítios do Cerrado (preto) e do Eucalipto (vermelho), desde Setembro/2003 a Julho/2009 (abscissa em Dia do Ano/Ano).	71
Figura 5.27. a) Modelo digital de terreno elaborado a partir de imagem SRTM para assimilação pelo TOPOG; b) Curvas de nível elaboradas pelo módulo de análise de terreno do TOPOG	73
Figura 5.28. Modelo digital de terreno elaborado pelo TOPOG com os limites da bacia, os elementos de área e as linhas de trajetória.....	73
Figura 5.29. a) Declividade (Slope) e b) Aspecto na área da bacia córrego Paulicéia, Gleba Cerrado Pé-de-Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.	74
Figura 5.30. Precipitação (barras verticais) e Deflúvio (ambos em $mm dia^{-1}$) observado (pontos vermelhos) e simulado pelo modelo TOPOG (pontos pretos), e escoamento subsuperficial simulado (linha verde) para o período de 2003 a 2008, para a microbacia da Gleba Cerrado Pé-de-Gigante	75
Figura 5.31. Variação do nível (em metros) nos poços piezométricos na área experimental, no período de Abril de 2006 a Junho de 2008, em relação ao nível inicial medido.....	79
Figura B1. Mapa topográfico da microbacia da Gleba Pé-de-Gigante, com as cotas altimétricas de 5 m em 5 m. Destaque para as cotas de 590 m e 740 m em letras azuis e para a localização do vertedor no córrego Paulicéia (V em verde).	89
Figura C1. Mapa topográfico da microbacia do córrego da Fazenda Cara Preta, com as cotas altimétricas de 5 m em 5 m. Destaque para as cotas de 590 m e 740 m em letras azuis e para a localização do vertedor no córrego Paulicéia (V em vermelho).....	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS.....	19
3	METAS ESPECÍFICAS.....	20
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.1	Área Experimental.....	21
4.2	Instrumentação.....	26
4.3	Consistência de dados e preenchimento de falhas.....	30
4.4	Análise hidrológica.....	36
4.4.1	Modelo hidrológico.....	36
4.4.2	Nível do aquífero.....	42
5	RESULTADOS.....	45
5.1	Padrões de variáveis climáticas.....	45
5.1.1	Irradiância solar global média diária.....	45
5.1.2	Temperatura do ar.....	47
5.2	Precipitação.....	51
5.3	Umidade do solo.....	54
5.4	Balço de energia.....	63
5.5	Descarga hidrológica.....	68
5.6	Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão.....	71
5.7	Balço hídrico.....	76
5.8	Medidas do nível do aquífero.....	78
6	CONCLUSÕES.....	81
7	REFERÊNCIAS.....	83
	ANEXO A – Curva chave das microbacias experimentais.....	88
	ANEXO B - Mapa Topográfico da Gleba Cerrado Pé-de-Gigante.....	89
	ANEXO C - Mapa Topográfico da Fazenda Cara Preta.....	90

1 INTRODUÇÃO

O Cerrado constitui o segundo maior bioma do Brasil, que ocupava originalmente mais de 2 milhões ha, e ainda abriga um rico patrimônio de recursos naturais renováveis adaptados às condições climáticas, edáficas e ambientais que determinam sua existência (KLINK *et al.*, 2004). Sua ampla extensão e heterogeneidade de ecossistemas abrigam enorme biodiversidade, o que representa uma importante oportunidade para investimentos no seu desenvolvimento sustentável. Ao lado da biodiversidade, o bioma caracteriza-se como um grande reservatório hídrico no continente sul-americano, captando águas pluviais que abastecem nascentes de rios das bacias do Amazonas, Tocantins, Parnaíba, São Francisco, Paraná e Paraguai, em função da sua localização na cumeeira do continente. Também pelos imensos aquíferos lá encontrados, entre eles o Guarani, a região dos Cerrados é estratégica para a manutenção do fornecimento hidrológico do país (BRASIL, 2004a).

Os solos dos cerrados foram considerados improdutivos até o final dos anos 1960, mas respondem hoje por 30% dos principais cultivos brasileiros, além de abrigar 40% do rebanho bovino. Apenas 7% dos cerrados, entretanto, não sofreram algum tipo de exploração intensiva ou extensiva (BRASILa, 2002). Atualmente o cerrado ocupa menos de 1% do território paulista (2,1 mil km²), sendo que há um século cobria 20% do Estado (KRONKA, 2002). O Governo Brasileiro visa, por meio de ações estratégicas, expandir a área florestal plantada no país em até 800 mil ha em pequenas e médias propriedades até 2007, para viabilizar empreendimentos com base em insumos florestais (BRASIL, 2004b). Essas ações irão promover significativas alterações nas paisagens locais, possivelmente alterando o sistema hidrológico das microbacias. As mudanças no uso do solo, tais como agricultura e irrigação, reflorestamento e desflorestamento, geralmente resultam em alterações nas propriedades físicas e biológicas da superfície, e assim podem potencialmente controlar o sistema climático regional, o ciclo hidrológico e do carbono (IPCC, 2001).

A hidrologia de microbacias é uma forma de conceitualizar e modelar diferentes processos não-lineares, que interagem sob condições ambientais variáveis no espaço e no tempo (Woods, 2003 *apud* SCHULER, 2003). Segundo Rodriguez-Iturbe (2000), a dinâmica das interações entre o clima, solo e vegetação, é influenciada pela escala na qual o fenômeno hidrológico ocorre, assim como pelas características fisiológicas da vegetação, pela pedologia e pelo tipo de clima. Assim, para melhor compreender os efeitos de ações antrópicas sobre o ciclo hidrológico devido às atividades de mudança de uso da terra, a microbacia é uma escala particularmente interessante para estudos dessa natureza (HORNBERGER *et al.*, 1998; LIMA, 2006). Nessa escala, o balanço hídrico relaciona os fluxos hidrológicos de forma que :

$$P = R + ET + \Delta S_v + \Delta S_s \quad (1)$$

onde P é a precipitação, R é o escoamento superficial, ΔS_v é a recarga de água na zona vadosa (não-saturada), ΔS_s é a recarga de água subterrânea, e ET é a evapotranspiração, sendo esta última a soma da interceptação da chuva pelo dossel da vegetação, da evaporação do solo e da transpiração da água extraída da zona radicular pela vegetação.

Paralelamente, o balanço de energia de uma microbacia com cobertura vegetal está associado ao balanço de massa (água), definido como

$$\frac{dQ}{dt} = R_n - G - H - LE \quad (2)$$

onde Q é a quantidade de energia armazenada em um volume de controle (meio físico ar mais biomassa) por unidade de área, R_n é o saldo de radiação, G é o fluxo de calor do solo, H é o fluxo de calor sensível e LE é o fluxo de calor latente (resultante da evapotranspiração ET).

Novos conhecimentos têm sido reportados sobre a sazonalidade e a magnitude do armazenamento de água no solo (HODNETT *et al.*, 1995; BRUNO, 2004) e dos fluxos de água e energia em ecossistemas brasileiros, relacionados às mudanças de uso da terra na floresta tropical úmida (ROCHA *et al.*, 2004) e no Cerrado *sensu stricto*, através de dados observacionais (MIRANDA *et al.*, 1996; VOURLITIS *et al.*, 2001; ROCHA *et al.*, 2002). No

Sudeste, estudos de modelagem numérica dos impactos da mudança de cobertura vegetal em escala secular indicaram que, por exemplo, a grande área de monocultura da cana-de-açúcar no norte de SP pode ser responsável pelo aquecimento regional de $\sim 0,5^{\circ}\text{C}$ (NEGRÓN-JUÁREZ, 2004), o que é corroborado por observações de campo que mostram que a plantação de cana-de-açúcar tem temperatura superior ao do Cerrado restrito (TATSCH, 2006).

No Brasil, o uso do Eucalipto iniciou-se em meados de 1868, no estado do Rio Grande do Sul (LIMA, 1996). Sua participação tem aumentado no mercado brasileiro, principalmente no século XX, com incentivos às indústrias de base. A madeira das plantações de eucalipto é utilizada em geral para fins de produção de papel, celulose, carvão e lenha. Essas plantações florestais de crescimento rápido podem ser importantes para a recuperação de áreas degradadas, na proteção das bacias hidrográficas e no controle de erosão.

O eucalipto é uma espécie de altíssima produtividade, conseqüentemente exigindo uma grande oferta de água do solo (LIMA, 2006). Mas ainda não está bem estabelecido se as altas taxas de evapotranspiração podem levar à redução da vazão e/ou da recarga de água no solo. Mais além, como as florestas são uma fonte importante na geração de umidade para a camada limite planetária através da evapotranspiração, elas fornecem condições favoráveis à dinâmica de formação de nuvens convectivas e de precipitação. O resultado da substituição do Cerrado no Centro-Oeste do Brasil pode potencialmente produzir impactos no ciclo hidrológico em todas as suas componentes do clima, aumentando a temperatura e reduzindo a chuva (HOFFMANN E JACKSON, 2000). O que se estabeleceu amplamente como a “polêmica do eucalipto”, que reduziria a oferta de água na forma de escoamento nos rios e no lençol freático, ainda não está esclarecida. A resposta bem circunstanciada a esse entendimento ocorrerá somente através da análise dos casos individuais, uma vez que há uma forte dependência da variabilidade climática regional, das formas de manejo e do tipo de solo

envolvidos, do tipo da vegetação primária e das características ecofisiológicas do eucalipto. Como o Brasil é um país de grande extensão, a variabilidade desses controles é vasta.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem o objetivo de investigar o balanço de água sobre uma área de Cerrado *sensu stricto* e sobre uma plantação de Eucalipto, por meio do monitoramento de duas microbacias pareadas de pequena escala e representativas destes ecossistemas, onde foram feitas medições diretas da precipitação, vazão, evapotranspiração, umidade do solo e nível do aquífero, durante o período de 2001 a 2009, em Santa Rita do Passa Quatro, SP.

3 METAS ESPECÍFICAS

Para a realização do objetivo, as seguintes metas específicas foram cumpridas:

1. O monitoramento, coleta e a consistência das seguintes variáveis: climáticas (temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, irradiância solar, pressão atmosférica e precipitação) por meio de estações meteorológicas automáticas; fluxos atmosféricos de calor e água, por meio de torres de fluxo com sistemas de covariância dos vórtices turbulentos; umidade do solo por meio de refletômetros no domínio da frequência; descarga hidrológica, por meio de vertedores com medidores de nível d'água; e nível do aquífero por meio de piezômetros com medidores de nível de coluna d'água; atividades estas realizadas no âmbito do Projeto Temático “Interação Biosfera-Atmosfera Fase 2: Cerrados e Mudanças de Uso da Terra”, do Programa Biota Fapesp (FAPESP 02/09289-9).
2. Implementação de um modelo hidrológico, o modelo TOPOG, para auxiliar na interpretação do balanço hídrico e como interpolador físico de falhas de dados de campo sobre a microbacia de Cerrado.

4 MATERIAL E MÉTODOS

As análises realizadas neste trabalho foram baseadas em dados coletados em duas microbacias, uma com cobertura natural de Cerrado (doravante denominada sítio PEG) e outra com monocultura de Eucalipto (doravante denominada sítio FCP), localizadas em Santa Rita do Passa Quatro, estado de São Paulo, entre os anos de 2001 e 2009.

A seguir, descrevem-se a área experimental, a instrumentação utilizada no monitoramento das variáveis micrometeorológicas e hidrológicas, os métodos analíticos e o modelo hidrológico TOPOG.

4.1 Área Experimental

A área experimental onde se desenvolveu o monitoramento hidrológico e micrometeorológico deste trabalho está localizada ao norte do estado de São Paulo, no município de Santa Rita do Passa Quatro, próximo à rodovia Anhangüera (SP-330), entre os km 253 e km 260 (Fig. 4.1).

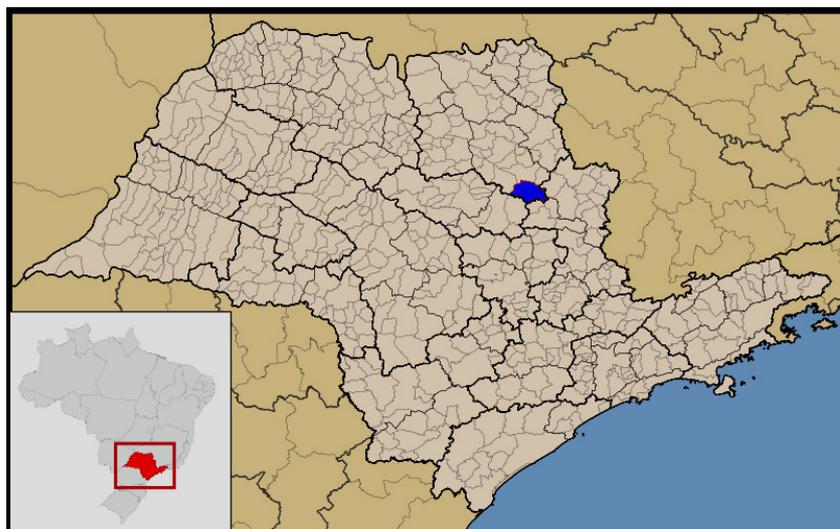


Figura 4.1. Mapa geopolítico do estado de São Paulo com destaque para a localização do município de Santa Rita do Passa Quatro (área em azul). No detalhe, mapa do Brasil com destaque para a localização do estado de São Paulo (área em vermelho).

A seguir descrevem-se os sítios experimentais:

- i. **Ecossistema de Cerrado sensu stricto (ou Restrito):** na Gleba Pé de Gigante, localizada no Parque Vassununga, Instituto Florestal/Secretaria do Meio Ambiente/São Paulo (Fig. 4.2), ocupa uma área com 1060 ha, com cotas altimétricas variando de 590 m a 750 m. Neste sítio predominam o Cerrado restrito, além de outras fisionomias de cerrado e uma pequena área com floresta decidual. A altura média do dossel da vegetação em torno da torre é de 20 m (ROCHA *et al.*, 2002), e é de 10 m na vegetação predominante na Gleba. A microbacia estudada é a do Córrego Paulicéia, que tem no vertedor a área de captação de 15,6 km².
- ii. **Agroecossistema de Eucalipto:** trata-se de uma plantação de Eucalipto, com ciclo de 7 anos, na Fazenda Cara Preta/Votorantim Papel e Celulose S.A. (Fig. 4.2), exceto pelas área de proteção ao redor dos riachos existentes, coberta com árvores nativas, e tem cotas altimétricas que variam de 590 m a 710 m. A microbacia estudada tem no vertedor a área de captação de 4,2 km², cujo córrego contribui para o Rio Bebedouro a jusante. A instrumentação foi instalada no talhão 18, após a colheita em Agosto de 2003. Em janeiro de 2004 houve uma chuva de granizo que destruiu parcialmente a plantação, tendo havido replantio em Fevereiro de 2004. A altura aproximada do dossel da plantação de eucalipto no entorno da torre micrometeorológica, desde o plantio em 2003 até dezembro de 2008, foi a seguinte: 2004 (3 m), 2005 (7 m), 2006 (13 m), 2007 (19 m), 2009 (25 m).



Figura 4.2. Área experimental na região da Gleba Cerrado Pé-de-Gigante (aproximada no perímetro azul) com torre de fluxos indicada no ponto amarelo Cerrado e vertedor no ponto Vc, e plantação de Eucalipto com torre de fluxos indicada no ponto amarelo Eucalipto e vertedor no ponto VE (com bacia aproximada no contorno azul). Fonte da imagem original: Google.

Desde a criação da Área de Relevante Interesse Ecológico Cerrado Pé-de-Gigante em janeiro de 1990, vários pesquisadores da Universidade de São Paulo e de outras universidades desenvolveram e continuam a desenvolver pesquisas científicas na região, o que possibilitou uma excelente caracterização de seus aspectos sócio-culturais, fisiográficos e ecológicos. Dentre esses estudos, destacam-se os trabalhos de PIVELLO et al. (1998), RUGGIERO (2000), ROCHA et al. (2002), RUGGIERO et al. (2002), NEGRÒN-JUÁREZ (2004), BRUNO (2004) e o livro “O Cerrado Pé-de-Gigante: ecologia e conservação - Parque Estadual de Vassununga” organizado por PIVELLO & VARANDA (2005). Por simplicidade, para a discussão deste trabalho, “área experimental” será entendida como a região que engloba as áreas pertencentes à Gleba Pé-de-Gigante e à Fazenda Cara Preta e que possui características fisiográficas comuns aos dois sítios experimentais, haja visto que os pontos

extremos de cada sítio (que são os seus vertedores) distam não mais do que 12 km entre si. Esses serão apresentados em suas peculiaridades logo após a discussão sobre o clima, o relevo e o solo da área experimental. Sendo assim, descreve-se a seguir as principais características fisiográficas da área experimental, com base nos trabalhos acima citados.

A região é caracterizada por um relevo diferenciado que apresenta desde colinas amplas, médias e pequenas, morrotes e morros residuais, até escarpas, além de planícies fluviais com predomínio de relevos suavizados e baixas declividades (0 a 10%) (PIRES NETO, 2005). Os sítios experimentais incluem as cabeceiras de vários afluentes do rio Mogi-Guaçu, entre eles o rio Bebedouro, que nasce dentro da Fazenda Cara Preta, e o córrego Paulicéia, cuja erosão formou um rebaixamento na forma de uma grande pegada, responsável pelo nome dado à gleba (RUGGIERO, 2000).

Os Neossolos Quartzarênicos são os solos predominantes na área experimental, são solos minerais profundos, com teores baixos de argila (menos que 15%), derivados de arenitos, soltos e excessivamente drenados. Apresentam horizontes A e C que se diferenciam principalmente pela presença de matéria orgânica no horizonte superficial (PIRES NETO, 2000). Os altos teores de areia conferiram a esse solo uma boa capacidade de enraizamento no seus aspectos físicos, porém uma baixa capacidade de retenção de água. Devido ao tipo de relevo a que estão associados e ao baixo grau de coesão entre as partículas, que ocorre por conta dos baixos teores de argilas, esses solos são muitíssimo susceptíveis à erosão natural (COOPER et al., 2000).

Medidas da umidade do solo volumétrica, por meio da técnica de reflectometria no domínio da frequência, foram usadas para a estimativa da porosidade, do ponto de murcha permanente e da capacidade de campo desses solos (Tabela 4.1) e comprovaram a baixa capacidade de retenção da umidade das areias quartzarênicas. Bruno (2004) reportou que a

umidade do solo medida em um perfil de 2,5 m de profundidade na Gleba Pé-de-Gigante variou de $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ nos primeiros 20 cm abaixo da superfície.

Tabela 4.1 Porosidade (ϕ , em %), ponto de murcha permanente (PMP, em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), capacidade de campo (CC, em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), capacidade de água disponível (CAD, em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e total de água armazenável (H_2O)* para areia quartzosa. Valores estimados \pm erro experimental. Perfil de 2,5 m sob Cerrado, sítio experimental: PEG, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

Profundidade (m)	ϕ (%)	PMP ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	CC ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	CAD ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	H_2O (mm de H_2O)
0,1	29 \pm 2	0,056 \pm 0,001	0,149 \pm 0,003	0,093 \pm 0,002	9
0,2	25 \pm 2	0,042 \pm 0,001	0,134 \pm 0,003	0,092 \pm 0,002	19
0,5	22 \pm 2	0,064 \pm 0,001	0,156 \pm 0,003	0,092 \pm 0,002	46
0,8	20 \pm 2	0,057 \pm 0,001	0,123 \pm 0,002	0,066 \pm 0,001	70
1	15 \pm 2	0,049 \pm 0,001	0,119 \pm 0,002	0,07 \pm 0,001	83
1,5	21 \pm 2	0,083 \pm 0,002	0,166 \pm 0,003	0,083 \pm 0,002	160
2	20 \pm 2	0,076 \pm 0,001	0,177 \pm 0,003	0,101 \pm 0,002	252
2,5	18 \pm 2	0,068 \pm 0,001	0,166 \pm 0,003	0,098 \pm 0,002	451

Total de água armazenável é a integração a cada profundidade sensoreada do produto da CAD pela correspondente espessura da camada (em mm) ao longo do perfil inteiro. Fonte: BRUNO, 2004.

A classificação climática (Koeppen) da área experimental é Cwa, com as temperaturas médias mensais variando de $17,6 \text{ }^\circ\text{C}$ a $23,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e a precipitação média anual igual a 1478 mm (Fig. 4.3). A estação chuvosa estabelece-se entre setembro a abril, enquanto que a estação seca é bem definida entre maio a agosto (PIRES NETO, 2005).

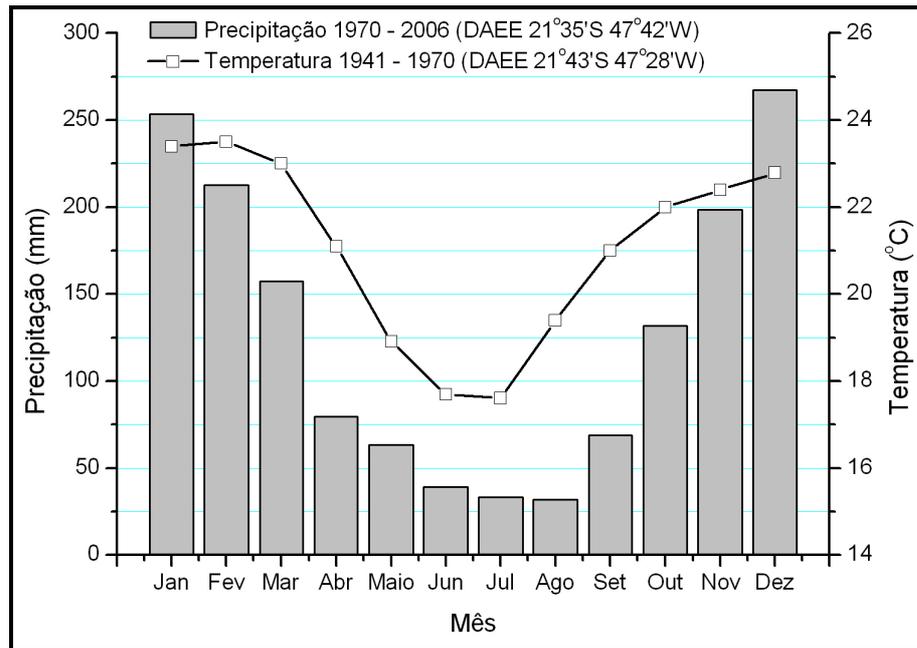


Figura 4.3. Médias climatológicas (normais) das variáveis precipitação (em mm mês⁻¹, barras cinzas), medida no posto do DAEE C4-096 localizado em Luiz Antônio, SP, (21° 35'S, 47° 42'W, altitude de 670 m) no período de 1970 a 2006, e temperatura do ar média mensal (em °C, linha preta com quadrados vazados), medida no posto do DAEE C4-107 localizado em Santa Rita do Passa Quatro, SP, (21° 43,'S 47° 28'S, altitude de 715 m) no período de 1941 a 1070.

Fonte: DAEE-SP, dados disponíveis em <http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhn.exe/plu?lig=podfp>. Acesso em 10/10/2009.

4.2 Instrumentação

No sítio PEG (Figura 4.4.a), a torre micrometeorológica foi implementada em janeiro de 2001, localizada nas coordenadas 21° 37' S e 47° 38' W, possui aproximadamente 21 m de altura e é alimentada por um conjunto de baterias recarregadas com painéis fotovoltaicos. ROCHA et al. (2002), NEGRÓN-JUÁREZ (2004) e TATSCH (2006) apresentaram detalhadamente a instrumentação instalada nesse sítio. Os dados de clima foram coletados com o uso de armazenadores (datalogger) CR10X e CR5000 (Campbell Systems) a cada 15 s e armazenados em médias de 10 min. Os instrumentos e variáveis medidas são descritos na Tabela 4.2.

No sítio FCP, a torre micrometeorológica, localizada nas coordenadas 21°35'S e 47°36'W, situa-se na fronteira nordeste da área do Cerrado restrito e sua altura variou de acordo com o crescimento do eucalipto, ficando sempre de 2 a 5 m acima do dossel. As

medidas foram implementadas em Julho de 2003, logo após a colheita do talhão 18 (Figura 4.4.b), até que em Agosto de 2004 os instrumentos foram vandalizados e a medição interrompida. A instrumentação micrometeorológica foi totalmente reformulada, o que incluiu a compra de novos equipamentos e nova montagem nos meses seguintes, no Laboratório de Clima e Biosfera do IAG/USP, e assim reinstalada em Julho de 2005 (Figura 4.4.c), perdurando até Outubro de 2009.

O monitoramento de cota hidrológica foi feito por meio de um vertedor construído em 2003 e instrumentado nos dois sítios experimentais (Tabela 4.2, Figura 4.5), sob coordenação técnica do DAEE (Dr. Gré de A. Lobo), e monitoramento da Esalq/USP na Fazenda Cara Preta sob coordenação técnica do Dr. Walter de Paula Lima. Os perfis de umidade do solo foram feitos com refletômetros no domínio da frequência, em técnica descrita conforme Bruno (2004), nas profundidades reportadas na Tabela 4.2.

Os mapas topográficos de ambas bacias são apresentados nos anexos B e C.



Figura 4.4. **(a)** Vista da Gleba Pé de Gigante na direção sudeste, de visada do topo da torre de 21 m, com anemômetro convencional ao lado; **(b)** Sistema de eddy-covariance com 3m de altura sobre Eucalipto (em 27/08/2003) após a colheita e **(c)** Torre de fluxos sobre plantação de eucalipto (Janeiro 2005), no lado inferior da foto, com Linha de energia no lado superior, na Fazenda Cara Preta. (Fotos: Laboratório de Clima e Biosfera, IAG/USP).

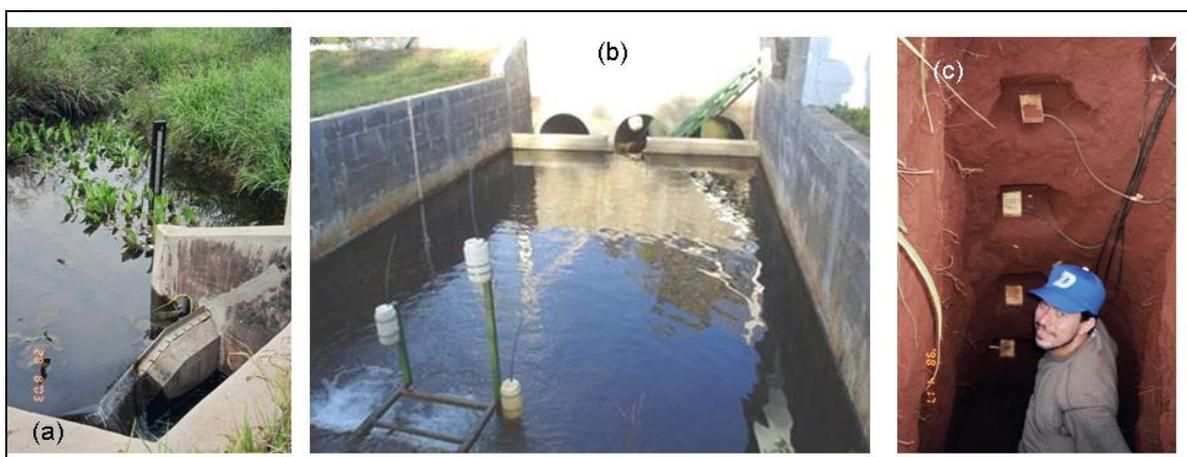


Figura 4.5. **(a)** Vertedor com régua limnológica na foz da Gleba Pé de Gigante; **(b)** Vertedor na Fazenda Cara Preta **(c)** Perfil de refletômetros de medição de umidade do solo. (Fotos: Laboratório de Clima e Biosfera, IAG/USP).

Tabela 4.2. Relação das variáveis analisadas neste trabalho e coletadas nos sítios experimentais PEG e FCP, com instrumento utilizado, altura de instalação.

Variável (unidade)	PEG		FCP	
	Sensor/Instrumento	Altura/ Profundidade (m)	Sensor/Instrumento	Altura/ Profundidade (m)
Temperatura do ar (°C)	psicrômetro CSI HMP45C	21	psicrômetro CSI HMP45C	
Precipitação (mm)	pluviômetro de balança Hydrological Services	21	pluviômetro de balança Texas Instruments	
Irradiância solar global incidente ($W m^{-2}$)	piranômetro Licor 200X até 2004, depois piranômetro CMP3 Kipp & Zonen	21	piranômetro CMP3 Kipp & Zonen	
Saldo de radiação ($W m^{-2}$)	saldo-radiômetro REBS	21	saldo-radiômetro NRLITE Kipp & Zonen	
Fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$)	fluxímetros REBS HFT3	0	fluxímetros REBS HFT3	-
Fluxo de calor latente ($W m^{-2}$)	sistema de “eddy covariance” <u>2001-2004</u> : composto por anemômetro sônico Gill R2-A e analisador de gás no infravermelho, tipo caminho fechado, LI 6262. <u>2005-2009</u> : analisador de gás no infravermelho substituído pelo tipo caminho aberto, LI 7500.	21	sistema de “eddy covariance” composto por anemômetro sônico CSAT3 e analisador de gás no infravermelho LI 7500, tipo caminho aberto.	
Fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$)	“eddy covariance” (o mesmo descrito acima)	21	“eddy covariance” (o mesmo descrito acima)	
Umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$)	refletômetros no domínio da frequência CS615 Campbell Sci.	-0,1 -0,2 -0,5 -0,8 -1,0 -1,5 -2,0 -2,5	sonda capacitiva Sentek Environ com cinco bobinas	-0,07 -0,27 -0,47 -0,67 -0,97
			refletômetros no domínio da frequência CS615 Campbell Sci.	-0,5 -1,4 -1,9 -2,35 -2,9 -3,85
Cota (mm)	transdutor de pressão com régua limnológica no vertedor do Córrego Paulicéia: Modelo Geokon 4580, de 28/08/2003 a 13/07/2005; modelo Solinst 3001 após 10/03/2006 a 29/07/2008; modelo Druck PTX1030 após 29/07/2008	-	transdutor de pressão com régua limnológica no vertedor do Córrego da Fazenda Cara Preta: Linígrafo instalado em 16/09/2003; modelo Druck CS420 após 29/07/2008	-

4.3 Consistência de dados e preenchimento de falhas

Os dados experimentais analisados neste trabalho passaram por rotinas de consistência a fim de eliminar erros aleatórios e sistemáticos.

A série de dados de precipitação possuía particularmente alguns períodos com falhas, ocorridas em parte devido ao entupimento do pluviômetro, que foram preenchidas da seguinte forma:

1) Adotou-se a série de dados coletada no pluviômetro instalado na torre micrometeorológica do PEG como referência para a área experimental;

2) Quando detectada falha nessa série, recorreu-se às séries de dados coletadas nos pluviômetros do vertedor do PEG, da torre micrometeorológica, e do vertedor do FCP, respectivamente, como base para o preenchimento da falha. O maior valor do total diário, dentre os três, foi usado como preenchimento.

3) A série de dados de umidade do solo, com instrumentos próximo ao pluviômetro PEG, foi utilizada para se localizar possíveis indicativos de ocorrência de chuva com falha nos dados. Quando um pico no valor de umidade do solo não possuía correspondente evento de chuva, um flag era adicionado na série de precipitação para posterior preenchimento, desde que houvesse chuva nos demais pluviômetros da área experimental.

4) Por fim, a cada dia preenchido, fez-se uma comparação entre os valores totais diários registrado na torre do PEG e em duas estações do DAEE próximas à Gleba Pé-de-Gigante (C4-096: 21° 35' S, 47° 42' W, altitude 670 m, em Luis Antônio; e C4-107: 21° 42' S, 47° 28' W, altitude 780 m, em Santa Rita do Passa Quatro), adotando-se o maior valor entre os três como a precipitação correta, com os ajustes necessários nos preenchimentos anteriores.

Obteve-se finalmente uma série de dados de precipitação, que por simplicidade será utilizada como a mesma série ora para a microbacia de Cerrado como para a de Eucalipto, para fins do balanço de água.

As falhas nos dados do fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente foram parcialmente preenchidas com interpolação física por meio de valores calculados com um modelo ecofisiológico (Simple Biosphere Model, SiB2, Sellers et al. 1996) calibrado com dados observados do Cerrado e do Eucalipto, respectivamente, reportado em Martins (2010). O modelo SiB2 é um dos modelos mais complexos de descrição dos fluxos no sistema solo-planta-atmosfera, que descreve parametrizações baseadas no conceito de Penman-Monteith em trajetórias de resistência no dossel, conforme sintetiza a Tabela 4.3 O modelo é estruturado com uma camada do dossel, e multi-camadas no solo. As forçantes atmosféricas são, respectivamente: temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, pressão parcial de CO₂ e O₂, irradiância solar incidente na superfície no visível (direta e difusa), infra-vermelho próximo (direta e difusa) e termal, e precipitação. O modelo tem onze variáveis prognósticas: temperatura do dossel, da superfície do solo, e do solo profundo; água interceptada pelo dossel, e pela superfície do solo; gelo e neve interceptados pelo dossel, e na superfície do solo; grau de saturação da umidade do solo na camada de superfície, na camada de raízes, e na camada de drenagem profunda; e a condutância de superfície. Resumidamente os produtos são as trocas de água, calor e CO₂ :

$$\text{fluxo de calor latente: } \lambda E_c + \lambda E_g = \lambda E_{ct} + \lambda E_{ci} + \lambda E_{gs} + \lambda E_{gi}$$

$$\text{fluxo de calor sensível: } H_c + H_g$$

$$\text{fluxo de CO}_2: F_c = A_c - R_s - R_D$$

$$\text{escoamento superficial: } R_s$$

$$\text{escoamento sub-superfície: } R_d$$

Tabela 4.3. Fluxos de calor sensível (H), calor latente (λE) e CO_2 ($F_c=R_D-A_c$) calculados em trajetórias especificadas com uma diferença de potencial e uma resistência determinada, onde (T_a, e_a) = temperatura e pressão de vapor d'água no espaço aéreo do dossel (K,Pa); (T_m, e_m)= temperatura e pressão de vapor d'água no nível de referência z_m (K,Pa); r_d = resistência aerodinâmica entre o solo e o espaço aéreo do dossel ($s\ m^{-1}$); r_a = resistência aerodinâmica entre o espaço aéreo do dossel e o nível de referência z_m ($s\ m^{-1}$); r_c = resistência estomática do nível superior do dossel ($s\ m^{-1}$); r_{soil} = resistência de superfície do solo nú ($s\ m^{-1}$); r_b = resistência da camada limite do dossel ($s\ m^{-1}$); h_{soil} = umidade relativa nos poros da superfície do solo; $e_s(T)$ = pressão de vapor de saturação à temperatura T (Pa); W_c = fração de cobertura de umidade e neve do dossel; W_g = fração de cobertura de umidade e neve do solo; c_a = pressão parcial de CO_2 no espaço aéreo do dossel (Pa); c_l = pressão parcial de CO_2 bulk interna das folhas (Pa).

Fluxo	Diferença de potencial	Resistência
H_c	$\rho c_p (T_c - T_a)$	r_b
H_g	$\rho c_p (T_g - T_a)$	r_d
$H_c + H_g$	$\rho c_p (T_a - T_m)$	r_a
λE_{ct}	$\rho c_p / \gamma [e_s(T_c) - e_a]$	$(r_c + 2 r_b) / (1 - W_c)$
λE_{ci}	$\rho c_p / \gamma [e_s(T_c) - e_a]$	$2 r_b / W_c$
λE_{gi}	$\rho c_p / \gamma [e_s(T_g) - e_a]$	r_d / W_g
λE_{gs}	$\rho c_p / \gamma [h_{soil} e_s(T_g) - e_a]$	$(r_{soil} + r_d) / (1 - W_g)$
$\lambda E_{ct} + \lambda E_{ci} + \lambda E_{gs} +$	$\rho c_p / \gamma (e_a - e_m)$	r_a
$R_D - A_c$	$p (c_a - c_l)$	$1,6 r_a + 2,8 r_b$

A calibração do modelo SiB2 para o Cerrado foi feita com base no ano de 2001 (Figuras 4.6 e 4.7), e o Eucalipto calibrado nos anos (hidrológicos) de 2005/2006, e 2007/2008, para os fluxos de calor latente e fluxo de calor sensível (Figuras 4.8 a 4.11). O ajuste dos dados observados com os cálculos do modelo foram muito satisfatórios, conforme sugerem as figuras, o que proveu um adequado preenchimento das falhas nos dados de campo para a evapotranspiração do Cerrado e do Eucalipto.

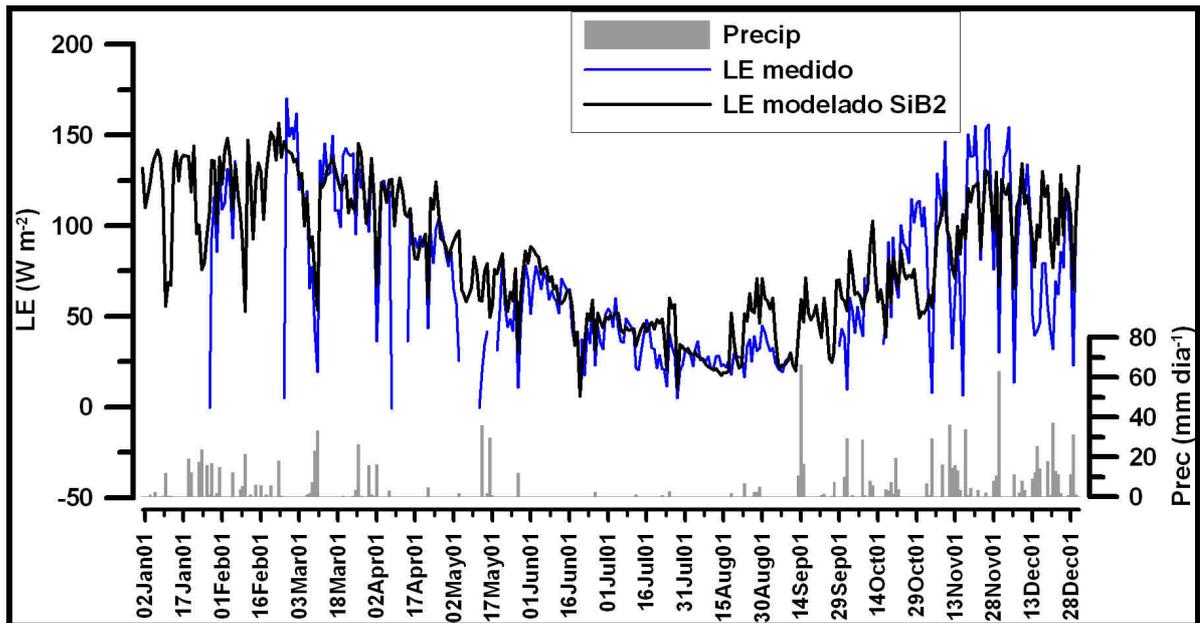


Figura 4.6. Fluxo de calor latente médio diário (em W m^{-2}): (a) na área de Cerrado durante o ano de 2001, observado (linha) e calculado pelo modelo SiB2 calibrado (linha). Fonte: Martins (2010).

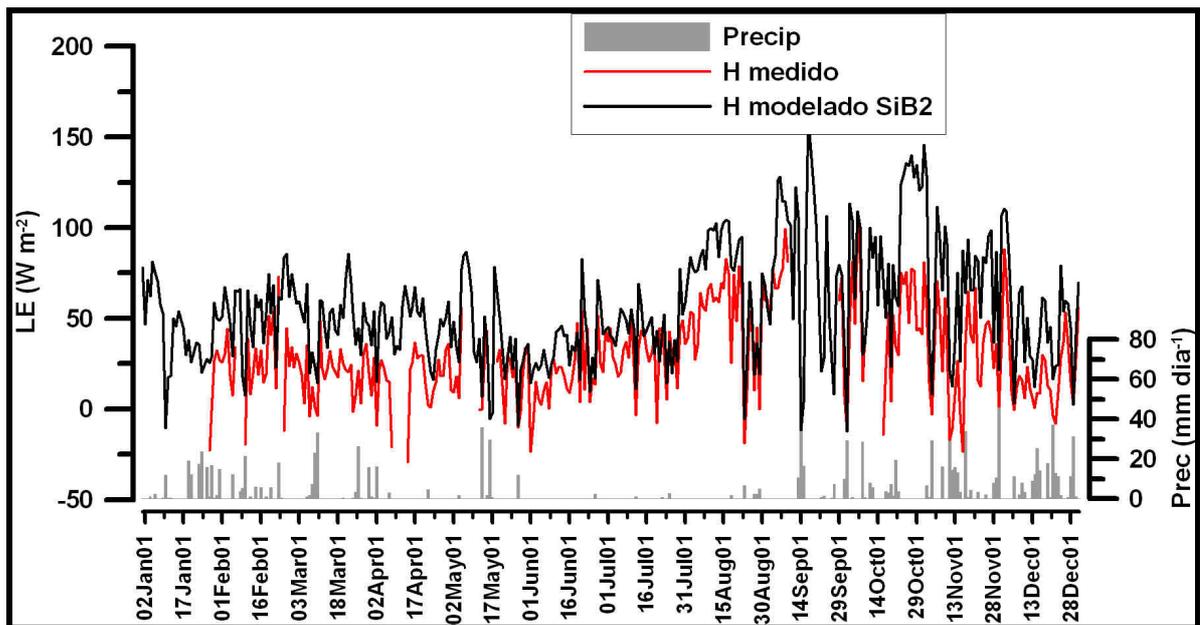


Figura 4.7. Fluxo de calor sensível médio diário (em W m^{-2}): (a) na área de Cerrado durante o ano de 2001, observado (linha) e calculado pelo modelo SiB2 calibrado (linha). Fonte: Martins (2010).

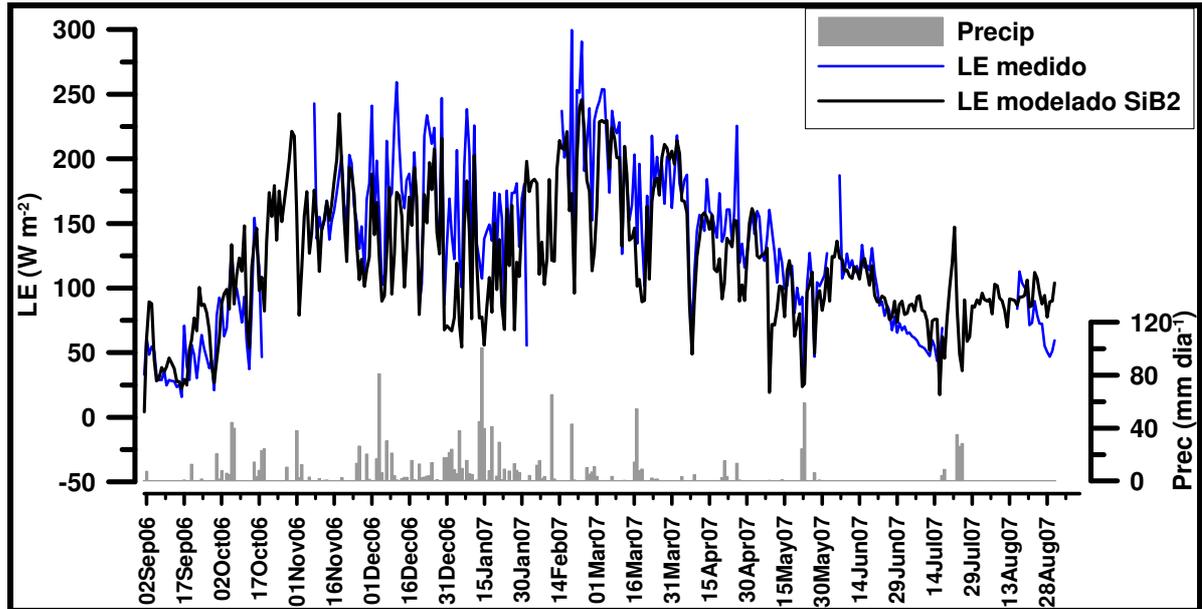


Figura 4.8. Fluxo de calor latente médio diário (em W m^{-2}) na área de Eucalipto durante o período de Setembro 2006 a Agosto 2007, observado (linha azul) e calculado (linha preta) pelo modelo SiB2 calibrado (linha), e precipitação média diária (em mm dia^{-1}). Fonte: Martins (2010).

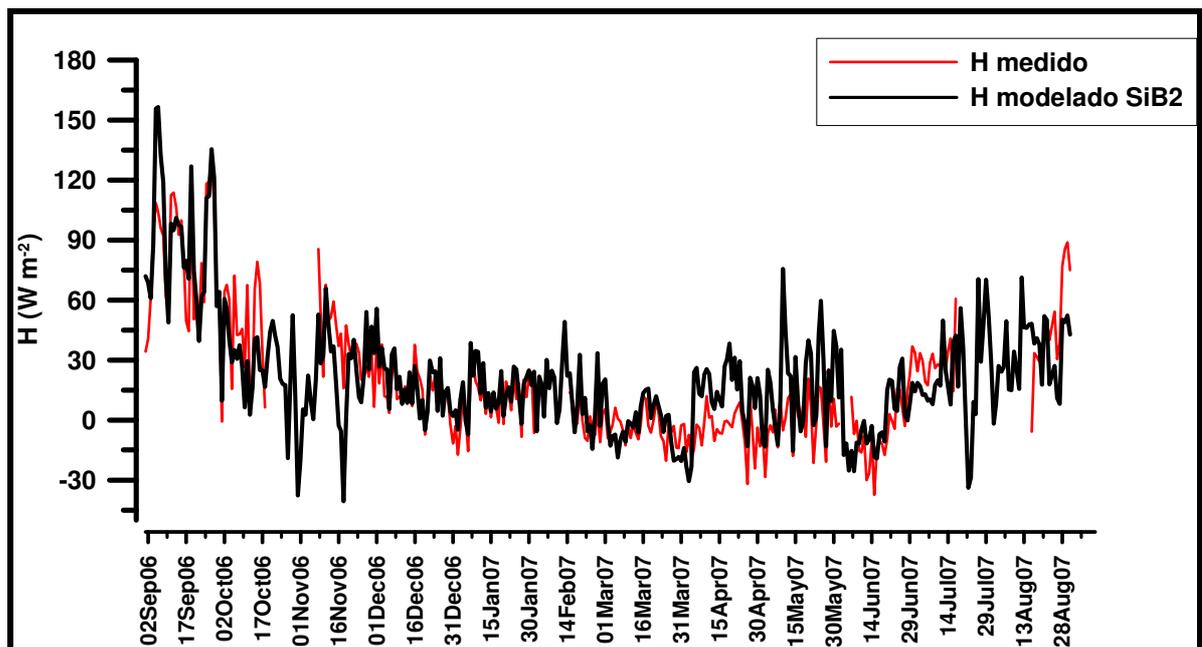


Figura 4.9. Fluxo de calor sensível médio diário (em W m^{-2}) na área de Eucalipto durante o período de Setembro 2006 a Agosto 2007, observado (linha azul) e calculado (linha preta) pelo modelo SiB2 calibrado (linha), e precipitação média diária (em mm dia^{-1}). Fonte: Martins (2010).

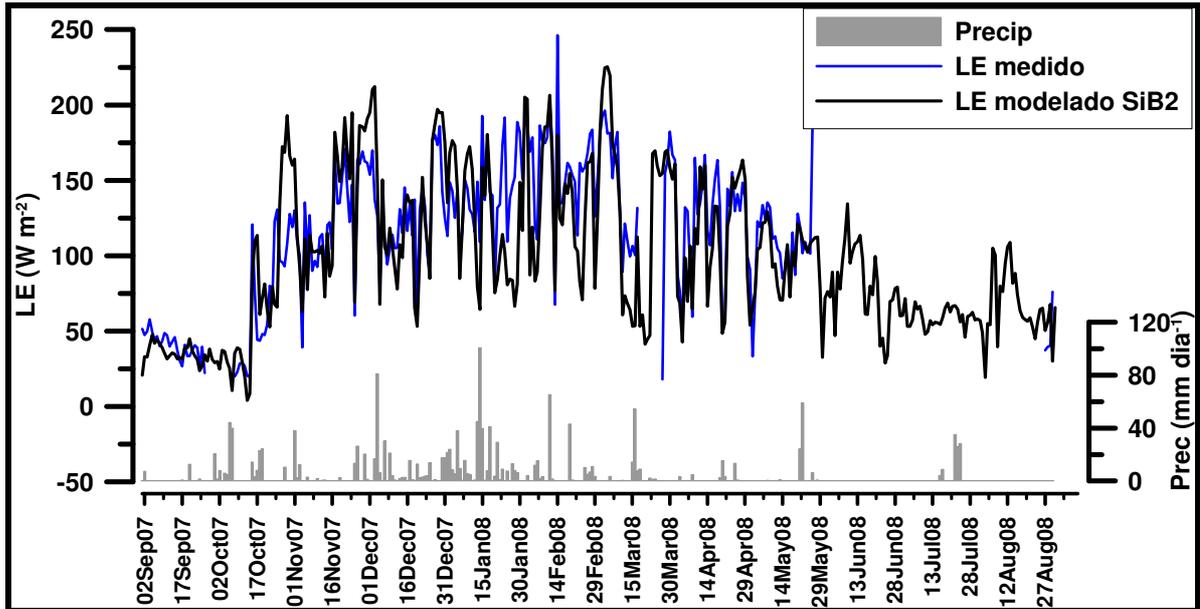


Figura 4.10. Fluxo de calor latente médio diário (em W m^{-2}) na área de Eucalipto durante o período de Setembro 2007 a Agosto 2008, observado (linha azul) e calculado (linha preta) pelo modelo SiB2 calibrado (linha), e precipitação média diária (em mm dia^{-1}). Fonte: Martins (2010).

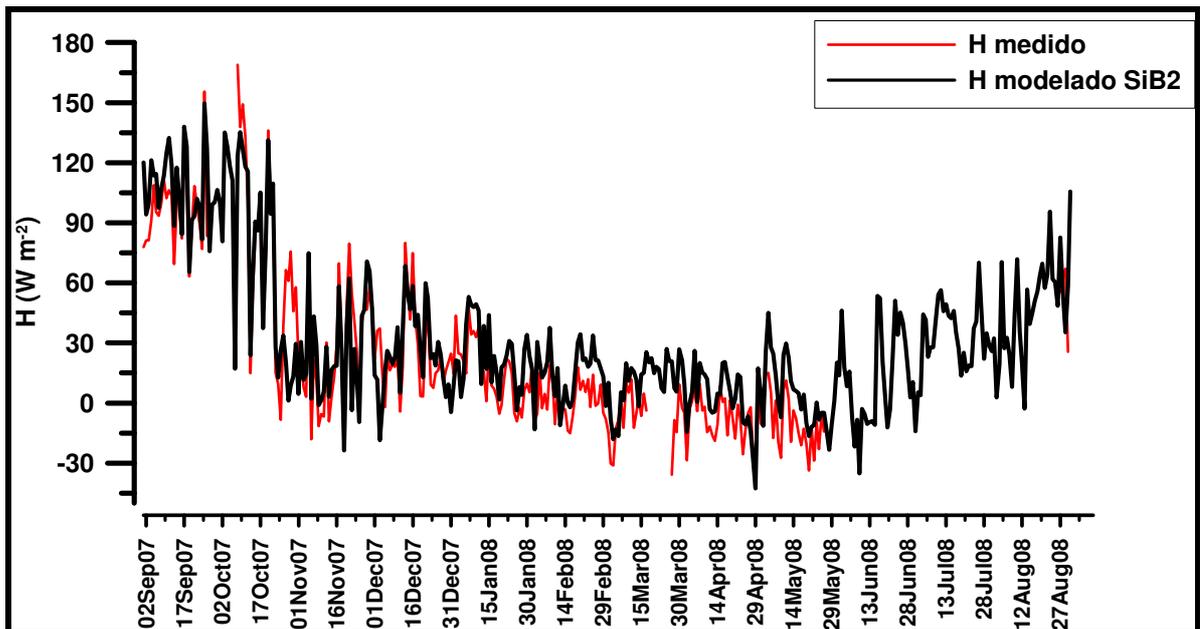


Figura 4.11. Fluxo de calor sensível médio diário (em W m^{-2}) na área de Eucalipto durante o período de Setembro 2007 a Agosto 2008, observado (linha azul) e calculado (linha preta) pelo modelo SiB2 calibrado (linha), e precipitação média diária (em mm dia^{-1}). Fonte: Martins (2010).

4.4 Análise hidrológica

4.4.1 Modelo hidrológico

O modelo hidrológico denominado TOPOG (CSIRO, 2000; O'LOUGHIN, 1986), usado neste trabalho, foi desenvolvido pela Divisão de Recursos Hídricos da Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (CSIRO), Austrália. Trata-se de um modelo ecohidrológico, dinâmico, determinístico e distribuído. Conforme define PONCE (1989), um modelo distribuído, ou de parâmetros distribuídos, é aquele cujos parâmetros podem ser discretizados espacialmente dentro da bacia. O modelo determinístico é aquele cuja formulação é baseada em leis físicas e em processos químicos e/ou bioquímicos por meio de equações diferenciais, as quais relacionam os parâmetros a um conjunto de variáveis. Além disso, o TOPOG é um modelo ecohidrológico dinâmico no sentido de que pode simular o crescimento da vegetação e sua dinâmica ao longo do tempo.

O TOPOG simula basicamente as seguintes variáveis: interceptação da chuva pelo dossel; fluxo subsuperficial lateral; drenagem vertical; dinâmica da umidade do solo vertical saturada/não saturada, fornecendo o conteúdo de umidade do solo com a profundidade; estoques de carbono na vegetação (foliar, tronco e radicular); e balanço de energia superficial, fornecendo os fluxos de calor latente (ou a evapotranspiração).

O modelo foi baseado na solução por diferenças finitas da equação de Richards para resolver a dinâmica da umidade do solo na vertical. Para isso, considerou-se que o solo é incompressível, não-histerético e isotérmico, além de que o movimento da umidade no solo ocorre somente na fase líquida e através da matriz do solo, e não através de macroporos ou por caminhos maiores preferenciais. A condutividade hidráulica saturada do solo é aplicada à formulação da lei de Darcy para os movimentos laterais, para isto assume-se que o solo é isotrópico para propósitos de fluxos subsuperficiais. Por fim, a profundidade do lençol

freático é suposta constante em cada elemento da topografia e esse é paralelo à superfície do solo.

O TOPOG simula os processos hidrológicos no passo de tempo diário, o que traz algumas implicações para o balanço de energia superficial. A superfície é caracterizada pela equação de Penman-Monteith e os termos de armazenamento são considerados zero no balanço diário. Além disso, o balanço de energia em cada elemento da superfície é considerado independente de sua vizinhança ou seja, a advecção é ignorada. Também não há retroalimentação da vegetação para as forçantes climáticas dentro de um passo de tempo.

Qualquer simulação feita com o TOPOG requer no mínimo os seguintes parâmetros, separados nas categorias: topografia, informações do solo e da vegetação.

1) Topografia

A descrição da microbacia em termos de elementos de fluxo unidimensionais para compor o modelo digital de terreno tridimensional é o núcleo do modelo TOPOG. Antes de iniciar a simulação hidrológica propriamente dita, deve-se fazer uma análise de terreno com o auxílio de alguns módulos que acompanham o modelo, seguindo os seguintes procedimentos:

- Construir um arquivo no formato ASCII com coleção de dados de elevação do terreno, por pontos isolados ou por linhas de contorno;
- Converter os dados para o formato de entrada do SPLIN2H (Hutchinson, 1988; citado por Dawes e Hatton, 1993);
- Interpolar a superfície usando o SPLIN2H;
- Construir as curvas de nível para a superfície;
- Fazer o preenchimento de pontos relevantes no terreno, tais como picos e pontos de sela;
- Construir um arquivo com contornos, e se necessário, arquivos com informações sobre as coordenadas de sub-bacias e de cabeceiras dos rios;
- Rodar o modelo de análise de terreno do TOPOG.

2) Informações do solo

A solução da equação de Richards requer informações características para cada tipo de solo prescrito para a microbacia, tais como, a umidade característica, a curva de retenção e a curva de condutividade hidráulica do solo em função do conteúdo ou do potencial hídrico do solo. Para tanto, segundo DAWES e HATTON (1993), há um utilitário que gera as curvas característica e de condutividade do solo, a partir de um dos quatro modelos de solo possíveis:

i) Broadbridge e White (1988)

ii) Clapp e Hornberger (1978)

iii) Campbell (1974)

iv) Ross et al. (1991)

O modelo Broadbridge e White (1988) possui cinco parâmetros que podem ser medidos *in situ* ou por métodos gravimétricos. São eles:

- a condutividade hidráulica saturada (K_s , em m/dia),
- o conteúdo de umidade volumétrica saturada (θ_s , em $m^3 m^{-3}$),
- o conteúdo de umidade volumétrica residual (θ_r , em $m^3 m^{-3}$),
- a escala de comprimento de capilaridade, a qual é função da sorptividade do solo (λ_c , em m), e
- o parâmetro de forma relacionado à estrutura do solo (C , adimensional e, normalmente ente 1,01 e 1,5)

Como o modelo Broadbridge e White (1988) possibilita obter a curva característica do solo sem a necessidade de se fazerem medidas em laboratório, adotou-se o seu uso em todas as simulações deste trabalho. Assim sendo, não nos aprofundaremos nos demais modelos disponíveis no TOPOG.

Além de definir o modelo de solo para a elaboração das curvas característica e de condutividade para cada tipo de solo, deve-se também prescrever para cada diferente tipo de

solo, uma tabela com as informações acima. Cada diferente tipo de solo requer um arquivo de perfil. Esse consiste de uma lista com as profundidades dos nós para a solução da equação de Richards e um tipo de solo para cada cada profundidade. Assim, os tipos de solo são equivalentes aos horizontes que podem ocorrer em cada perfil de solo, e esse é que podem ser distribuídos em regiões distintas da microbacia.

Outra informação necessária para o início de uma simulação com o TOPOG é a condição de umidade antecedente. Esta pode ser definida manualmente para cada tipo de solo ou, então, aproveitando-se da condição de umidade final de uma simulação antecedente, tal como se fosse um processo de warm-up do modelo.

3) Informações da vegetação

O módulo de evapotranspiração do modelo necessita de informações específicas para cada tipo de vegetação que tenha sido prescrito para a microbacia.

Quando se utiliza o TOPOG sem a opção de crescimento da vegetação, esses parâmetros são os seguintes:

- Albedo do dossel (A_{can} , adimensional)
- Albedo do solo (A_{soil} , adimensional)
- Coeficiente de interceptação da chuva pelo dossel (R_{int} , em $m\ iaf^{-1}\ dia^{-1}$, onde iaf é o índice de área foliar)
- Coeficiente de extinção da luz (L_{ex} , adimensional)
- Condutância máxima do dossel (cc_{max} , em $m\ s^{-1}$)
- Coeficiente angular da relação do déficit de pressão de vapor em função da condutância estomática (m , adimensional)
- Potencial hídrico do solo máximo para umidade disponível às plantas ($lwpm_{max}$, em m)
- Profundidade máxima para camada radicular (r_{max} , em m)
- Resistência aerodinâmica para o dossel (r_a , em $s\ m^{-1}$)

- Resistência aerodinâmica para a superfície do solo (r_s , em $s\ m^{-1}$)
- Função de densidade radicular (rootfn, adimensional; 0- Modelo de decaimento de Ritchie, 1- extração proporcional a espessura da camada do solo, 2- extração baseada na lei de potência na forma $x*(\text{espessura da camada})^m$, onde x e m são parâmetros de ajuste da função)

4) Forçantes e parâmetros climáticos

As forçantes necessárias para uma simulação dinâmica com o TOPOG são:

- a) Temperatura do ar máxima diária (T_{\max} , em $^{\circ}C$)
- b) Temperatura do ar mínima diária (T_{\min} , em $^{\circ}C$)
- c) Precipitação diária (P , em mm)

Além dessas, ainda são exigidas duas forçantes que, em caso de não existirem medidas locais, o modelo pode estimar com o uso do módulo TOPOG_climate, que é uma modificação do programa elaborado por Running et al. (1987) para a estimativa da irradiância sobre uma superfície horizontal para um dado dia do ano e uma latitude específica.

A transmissividade atmosférica é estimada pelo método de Bristow e Campbell (1984) e é usada para atenuar a radiação de onda-curta que atravessa a atmosfera, além da partição desta nas componentes direta e difusa.

O déficit de pressão de vapor (DPV, em mbar) é calculado a partir das temperaturas máxima e mínima e da temperatura do ponto de orvalho, se fornecida.

Outra facilidade que o TOPOG tem é que, se não houver à disposição dados de estação meteorológica dentro dos limites da microbacia, pode-se extrapolar os dados obtidos em outra estação próxima, mesmo que esta esteja localizada em outra altitude e que possua precipitação anual diferente daquela normal para a microbacia experimental.

5) Saídas

As principais saídas modeladas pelo TOPOG, todas em mm, são na forma de séries temporais das variáveis:

- Precipitação total
- Interceptação pelo dossel
- Transprecipitação
- Evaporação do solo
- Transpiração do dossel
- Evapotranspiração total
- Escoamento subsuperficial específico (fluxo em $m^3 / \text{área da bacia em } m^{-2}$)
- Escoamento direto específico (fluxo em $m^3 / \text{área da bacia em } m^{-2}$)
- Deflúvio total da bacia

Além dessas, pode-se obter também a série temporal da umidade volumétrica do solo ($m^3 m^{-3}$) em todas as profundidades (perfil) de um determinado elemento da bacia.

Os parâmetros de solo e vegetação prescritos na simulação do modelo TOPOG para a microbacia do Cerrado, na simulação de 9 anos de dados, que resultaram na melhor simulação, estão descritos na Tabela 5.2.

Tabela 4.5. Parâmetros descritos para a simulação de calibração do TOPOG e profundidades (em m) dos nós do perfil de solo para cada elemento da topografia da microbacia.

Classe	Parâmetro	Valor
Solos (Modelo Broadbridge e White)	Condutividade hidráulica do solo	8 m/d
	Umidade do solo na saturação	0,29 m ³ /m ³
	Umidade do solo residual	0,056 m ³ /m ³
	Parâmetro C	1,02
	Parâmetro λ_c	0,2
	Potencial hídrico no estado de solo mais seco	-150 m
	Máxima variação da umidade do solo	0,01
	Profundidades dos nós do perfil de solo para cada elemento da bacia	0,00; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8; 1,0; 2,0 até 60: de 2 em 2 m
Vegetação	Albedo do dossel	0,15
	Albedo do solo	0,1
	Coefficiente de interceptação da chuva do dossel	0,003 m/iaf/dia
	Coefficiente de extinção da luz através do dossel	-0,6
	Condutância estomática máxima do dossel	0,0025 s/m
	Potencial hídrico do solo no ponto de murcha permanente	-148 m
	Profundidade máima do sistema radicular	1,5 m
	Resistência aerodinâmica do dossel	59
	Resistência aerodinâmica do solo	150
	Função de distribuição radicular	Função de Ritchie
	Altura do solo ao centro de gravidade do dossel da vegetação	8 m

4.4.2 Nível do aquífero

O levantamento de algumas variáveis hidrogeológicas da área experimental foi realizado pela equipe do Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Unesp/Rio Claro, coordenado pelo Dr. Hung K. Chang, e da equipe do DAEE coordenada pelo Dr. Gré A. Lobo, por meio de ensaios geofísicos com o método de eletroresistividade ou técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), proveu o mapeamento da superfície potenciométrica do lençol freático e o monitoramento do aquífero utilizando poços piezométricos. Dos 5 poços tubulares de nível de água subterrânea construídos para monitoramento, 3 deles foram perfurados na borda da

Gleba Pé-de-Gigante e 2 na Fazenda Cara Preta (**Erro! A origem da referência não foi encontrada.**4.12), com profundidade final dos poços e dos níveis de água (NA) registrados logo após a construção entre 27 e 89 m (Tabela 4.6). Foram feitas medidas quinzenais de níveis dos poços com equipamento elétrico manual, com profundidade indicada pela medida do comprimento do cabo até o nível de água. O poço PDG-1 foi monitorado com um transdutor de pressão conectado ao *data logger*, programado para adquirir registros com frequência de 10 minutos. Os poços foram monitorados de março de 2006 a junho de 2008, com exceção do poço PDG-1 que foi monitorado somente até julho de 2006, interrompido por pane instrumental.

Tabela 4.6 – Dados dos poços de monitoramento, com profundidade obtida no final da construção e nível do aquífero (NA) medido.

Poço	Data construção	Prof. (m)	NA (m)
PDG-1	22/08/2005	90	69,48
PDG-2	25/01/2006	81	57,70
PDG-3	30/01/2006	104	89,40
CP-1	07/02/2006	81	27,45
CP-2	11/02/2006	102	41,03



Figura 4.12. Mapa de localização dos poços de monitoramento nas áreas da reserva Pé-de-Gigante (PDG1, PDG2 e PDG3, em vermelho) e da Fazenda Cara Preta (CP1 e CP2, em amarelo). Referência: imagem Google Earth (2004).

O modelo hidrogeológico conceitual mostrou a unidade estratigráfica que representa o Sistema Aquífero Guarani naquela área (formação Pirambóia), com nível de água profundo, atingindo até 70 m de profundidade, e indicou as correntes de fluxo de água subterrânea em concordância com a topografia de superfície (Figura 4.13).

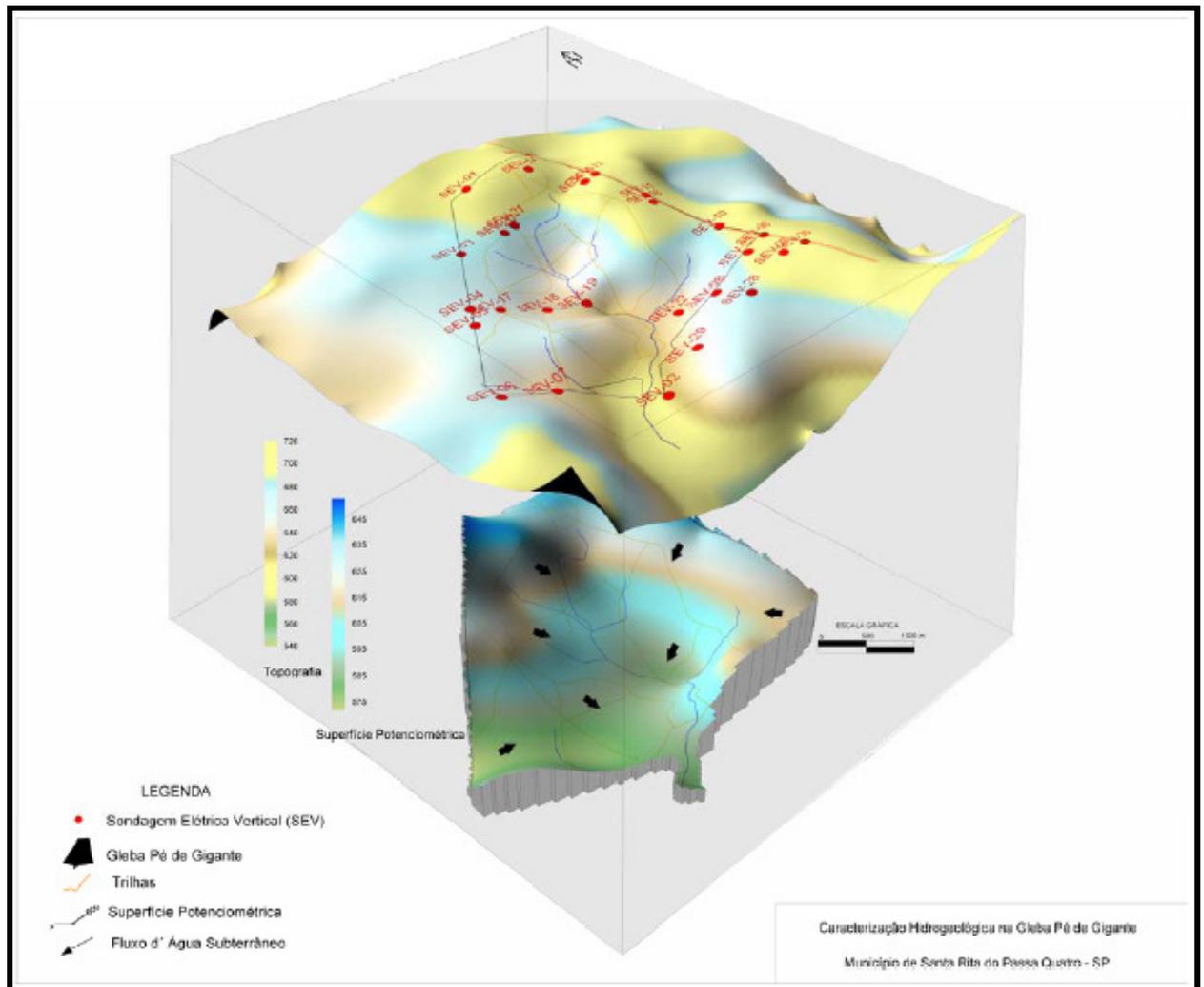


Figura 4.13. Bloco diagrama da área de Cerrado (Gleba Pé de Gigante), indicando as correntes de fluxo de água subterrânea, em concordância com a topografia. Fonte: Zamprogno et al. (2005).

5 RESULTADOS

5.1 Padrões de variáveis climáticas

O monitoramento das variáveis climáticas no sítio PEG iniciou-se em novembro de 2000, quando foi instalada a plataforma instrumental na Gleba Cerrado Pé-de-Gigante. A variabilidade climática observada nesse local, desde a implementação da torre até o ano de 2002, já foi discutida por Rocha et al. (2002, 2005) e Negrón-Juarez (2004). Os resultados apresentados neste trabalho, registrados entre 2003 e 2009, apresentaram padrões de variabilidade similares aos discutidos nos trabalhos anteriores.

No sítio FCP, o monitoramento climático teve início em julho de 2003, quando foi realizado o corte do eucalipto no talhão 18 da Fazenda Cara Preta. Por aquela época, foram feitas medidas das variáveis climáticas e de fluxos de CO₂ e de calor latente e sensível, com instrumentação afixada no alto de um mastro. Houve um hiato nas medidas entre junho de 2004, quando foram praticados atos de vandalismo contra a instrumentação operante naquele momento, até junho de 2005, quando foi instalada definitivamente a torre micrometeorológica e a instrumentação de medidas de solo.

5.1.1 Irradiância solar global média diária

A irradiância solar global incidente média diária observada no PEG variou de 200 W m⁻² a 350 W m⁻², durante as estações secas (junho) e chuvosas (dezembro), respectivamente. Conforme Rocha et al. (2002), essa variação é condizente com a radiação recebida no topo da atmosfera durante os solstícios de inverno, em 22/junho, e de verão, em 22/dezembro (Fig. 5.1).

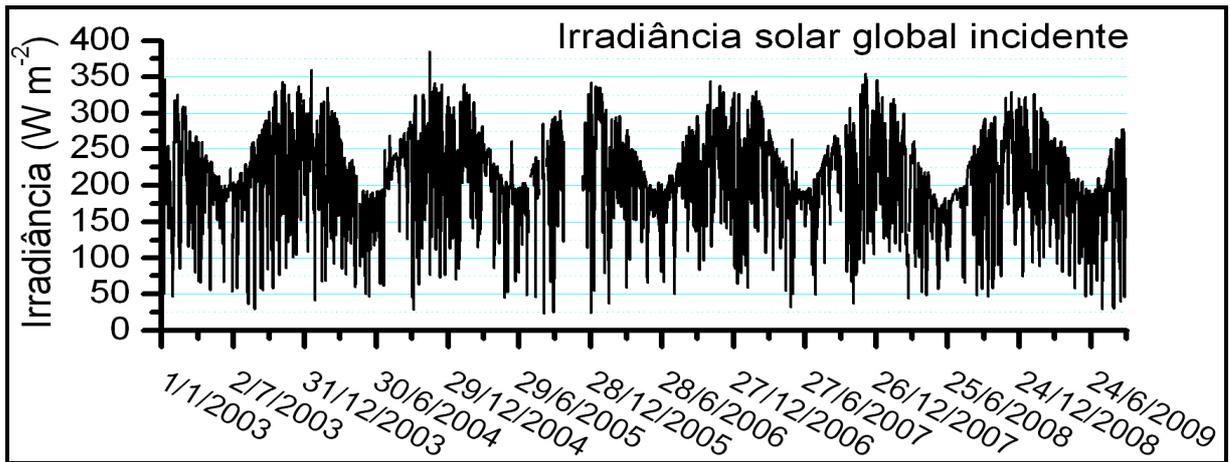


Figura 5.1. Irradiância solar global incidente média diária (em $W m^{-2}$) medida na área experimental, de 2003 a 2009 (dados coletados no sítio experimental PEG, completados com dados do sítio experimental).

Ao longo dos anos foram registrados valores mínimos abaixo de $50 W m^{-2}$, o que pode ser resultado de dias com alta nebulosidade, conforme já discutiram ROCHA et al. (2002, 2005) e NEGRÓN-JUÁREZ (2005).

A proximidade geográfica resulta em se ter, praticamente, as mesmas quantidades diárias de irradiância solar global incidindo à superfície de ambos os sítios experimentais. Na Fig. 5.2b, pode-se observar que os valores diários de irradiância distribuem-se ao longo da reta 1:1 e que, por meio de ajuste linear com a interceptação na origem das retas assegurada, obteve-se a relação de 1,02, o que indica não haver desvio significativo entre as medidas. Ou seja, a pequena discrepância existente, muito provavelmente, se deve a erros intrínsecos e sistemáticos dos instrumentos, suas calibrações e instalações, como por exemplo, uma pequena variação o zênite de cada piranômetro.

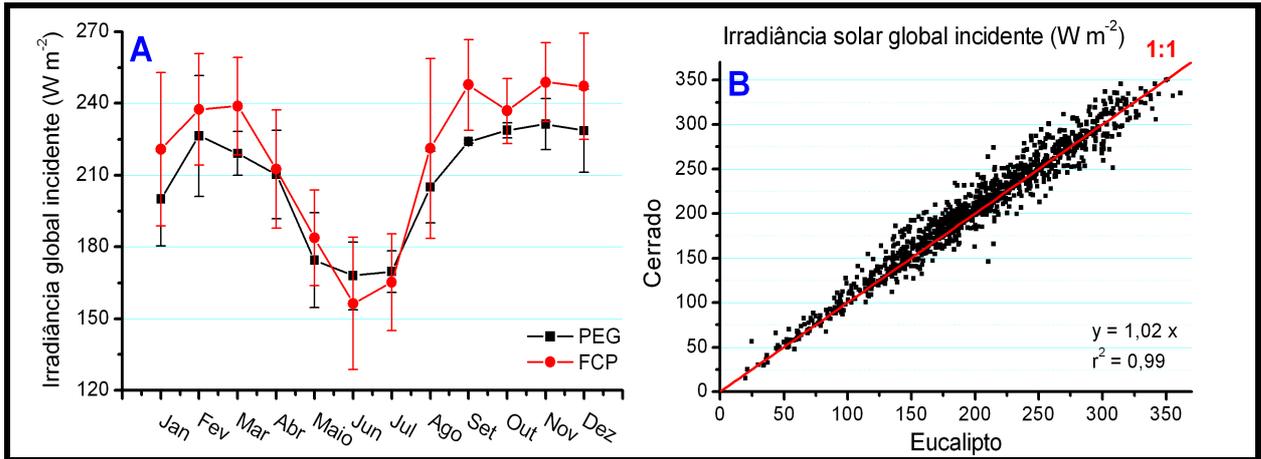


Figura 5.2. (a) Ciclo anual da irradiância solar global incidente média mensal (em $W m^{-2}$) medida nos sítios PEG (linha preta com quadros pretos) e FCP (linha vermelha com círculos vermelhos), com respectivos desvios-padrão (barras verticais); e (b) comparação entre as médias diárias da irradiância global incidente (em $W m^{-2}$) medidas nos sítios PEG e FCP. Com destaque para o resultado da regressão linear com interceptação na origem e reta 1:1 (linha vermelha). Período de junho de 2003 a agosto de 2009.

Ao longo do ano, a média mensal de irradiância solar global medida nos sítios variou de pouco mais de $150 W m^{-2}$ no inverno (junho) a valores acima de $240 W m^{-2}$ durante os meses de primavera e verão (setembro a março). Existe uma pequena variação no padrão das médias mensais observadas em cada sítio experimental. Durante os meses de agosto a maio, as médias são relativamente superiores no sítio FCP, enquanto que de junho a julho, os valores observados no PEG superam os do FCP. Isso sugere que haveria maior radiação disponível sobre o Eucalipto, contradizendo o resultado apresentado na Fig. 5.2b, elaborado a partir das médias diárias. Porém, deve-se levar em conta que as curvas apresentadas na fig 5.2b não diferem além dos respectivos desvios-padrão e, portanto, essas diferenças observadas entre os sítios se devem apenas a fatores intrínsecos da calibração e da instalação dos instrumentos.

5.1.2 Temperatura do ar

A temperatura do ar média diária, medida a 21 m de altura, variou de menos de $15 ^\circ C$ no inverno a mais de $27 ^\circ C$ no verão (Fig. 5.3).

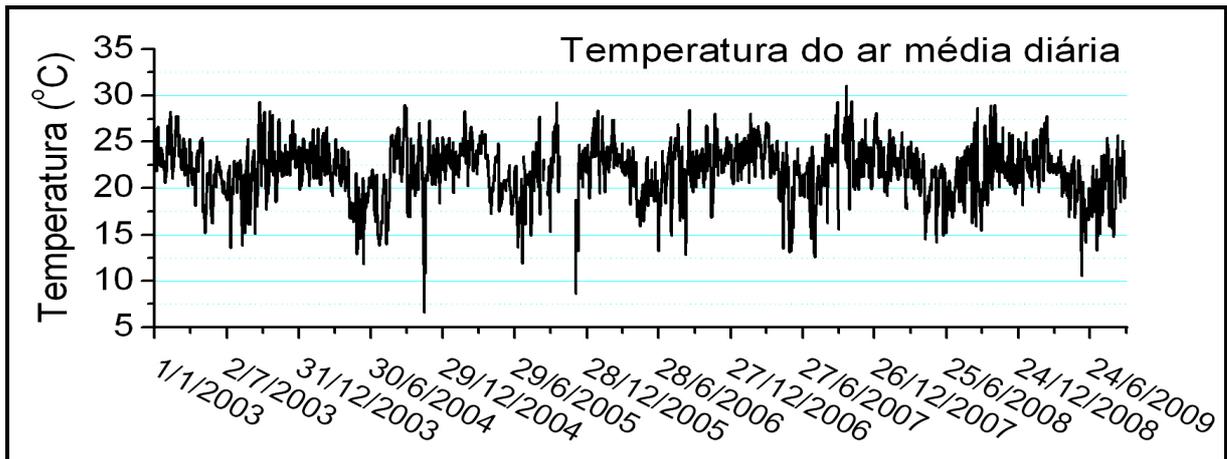


Figura 5.3. Temperatura do ar média diária (em °C) medida na área experimental, de 2003 a 2009 (dados coletados no sítio experimental PEG, completados com dados do sítio experimental)

Há de se destacar três episódios com temperaturas em torno e abaixo de 10 °C: em 11/11/2004, 15/11/2004 e 02/12/2005. Segundo ROCHA et al. (2002) e NEGRÓN-JUÁREZ (2004), temperaturas mínimas muito baixas na região noroeste de São Paulo se devem à atuação de frentes frias que alcançam a região não somente no inverno, quando são mais frequentes, mas também no final da primavera e no início do verão.

Além de fenômenos de meso e de grande escala, também o uso da terra e o tipo de cobertura do solo exercem influência sobre o clima local (Bonan, 2002). Logo, ao se considerar que a vegetação do Cerrado encontra-se em condição de equilíbrio dinâmico, enquanto que a plantação de Eucalipto é submetida ciclicamente a diferentes estágios: plantio – crescimento – equilíbrio – corte, além das diferenças funcionais e fisiológicas intrínsecas de cada ecossistema, espera-se encontrar diferenças significativas entre o microclima existente em cada sítio experimental.

Em razão de ter havido o corte e o posterior replantio do talhão em julho de 2003, analisaram-se os dados de temperatura do ar medidas no (i) primeiro ano de crescimento do eucalipto (julho de 2003 a julho de 2004) e no (ii) período de 2005 a 2009, no estágio maduro da plantação, a fim de verificar se a alteração do uso do solo implicou em alteração na temperatura do ar local e em relação à vegetação do Cerrado.

No primeiro ano de crescimento do eucalipto (2003), a temperatura do ar mínima foi em torno de 1,2 °C maior sobre o cerrado do que sobre o eucalipto. Em relação à temperatura do ar média, observou-se também essa tendência positiva, porém apenas 0,5 °C maior. Por outro lado, a temperatura do ar máxima medida acima do dossel foi, em média, 1,2 °C mais fria no cerrado do que no eucalipto (Figs. 5.4a-c).

Nesse ano, a cobertura vegetal no FCP variou desde o solo quase desnudo, apenas com restos do corte (galhos, folhas, etc) dispersos pelo terreno, até uma cobertura vegetal de pequeno porte (as plantas de eucalipto não ultrapassavam 1,2 m de altura), o que explica esse padrão marcante com temperaturas muito altas durante o dia e mínimas durante a noite, superestimando durante o dia e subestimando durante a noite as temperaturas do ar medidas sobre o dossel do PEG (Figs. 5.4).

Nos anos pós 2005, quando o eucalipto atingiu a altura mínima de 7 metros, também houve notável variação de temperatura entre os sítios experimentais, mas como pode-se observar nas figs. 5.5a-c, as temperaturas do ar mínima, média e máxima foram respectivamente: 0,3; 0,6; e 0,9 graus Celsius menores sobre o eucalipto do que sobre o cerrado. Pode-se explicar essa condição do ar sobre o eucalipto ser mais frio do que sobre o cerrado pelo mecanismo de retirada de calor do ar local para manutenção do processo de evapotranspiração, maior no eucalipto do que no cerrado.

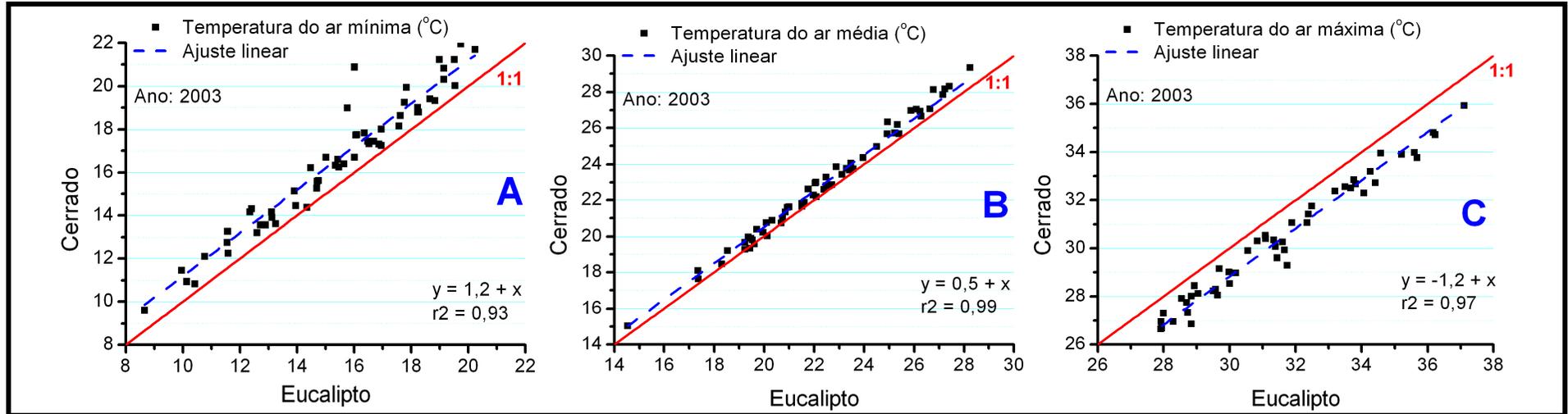


Figura 5.4. Relação entre temperatura do ar (A) mínima, (B) média e (C) máxima, em °C, valores diários medidos nas torres micrometeorológicas dos sítios experimentais do Cerrado e do Eucalipto. A reta pontilhada em azul é o ajuste linear com coeficiente angular igual a 1. Dados obtidos em 2003.

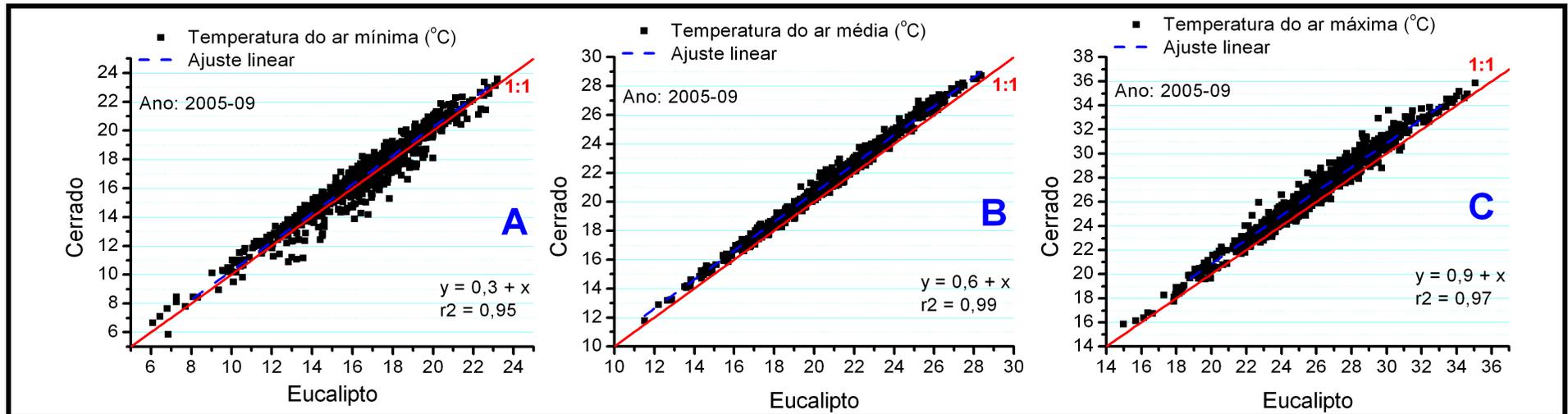


Figura 5.5. Relação entre temperatura do ar (A) mínima, (B) média e (C) máxima, em °C, valores diários medidos nas torres micrometeorológicas dos sítios experimentais do Cerrado e do Eucalipto. A reta pontilhada em azul é o ajuste linear com coeficiente angular igual a 1. Dados obtidos nos anos de 2005 a 2009.

Com relação às médias mensais, a temperatura do ar máxima mensal medida no eucalipto foi menor do que a medida no cerrado (Fig. 5.6b). Por outro lado, a temperatura mínima mensal não apresentou um padrão único ao longo do ano, mas duas diferentes tendências: o ar sobre o eucalipto, em relação ao cerrado, foi mais frio nos meses de janeiro a julho e mais quente nos meses de agosto a dezembro (Fig. 5.6a)

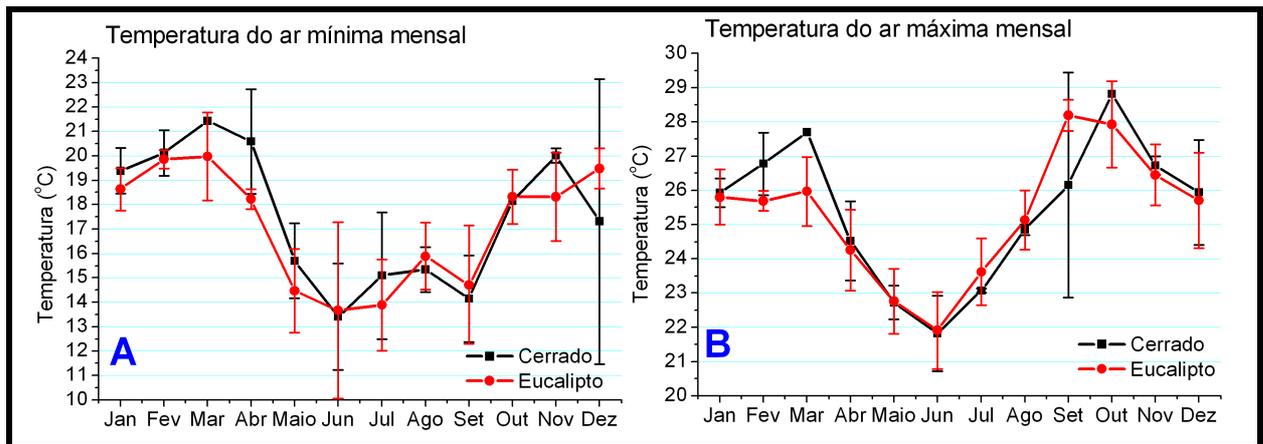


Figura 5.6. Médias mensais das temperaturas do ar (a) mínima e (b) máxima, medidas nos sítios Cerrado e Eucalipto, entre os anos de 2005 a 2009.

5.2 Precipitação

A precipitação pluviométrica foi medida em quatro distintos pontos na área experimental: em cada torre meteorológica e em cada vertedor.

A distribuição das chuvas no transcorrer de todo o período de monitoramento variou muito de ano a ano, com extremos diários em 2007 e 2008 (Fig. 5.7). O ano hidrológico 2008/2009 foi o mais úmido, com 1713 mm precipitados, enquanto que o ano 2005/2006 foi o mais seco, quando foram precipitados apenas 871 mm (Tabela 5.1).

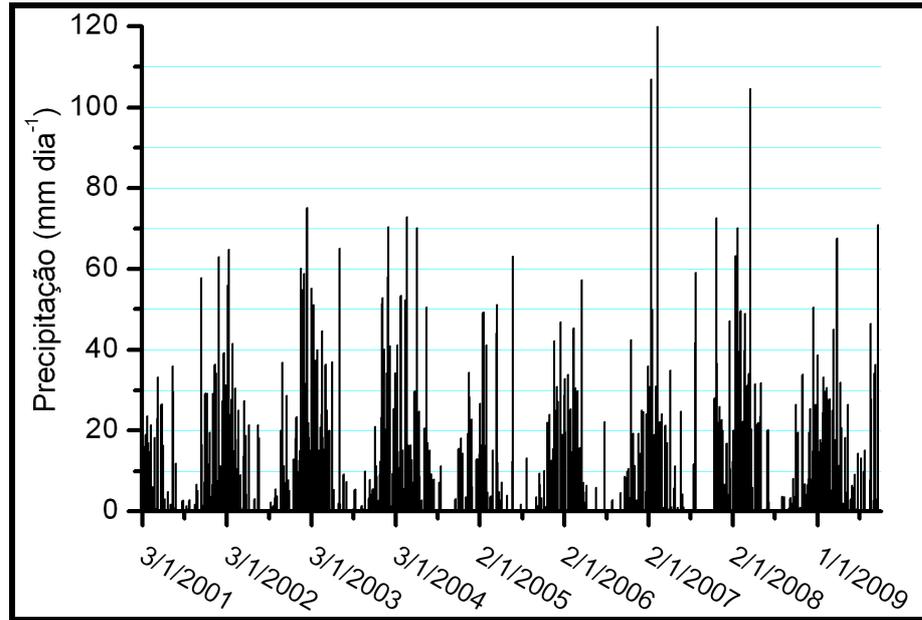


Figura 5.7. Precipitação acumulada diária (em mm dia^{-1}) medida na torre micrometeorológica do sítio PEG e complementada com dados obtidos na torre micrometeorológica do FCP, nos vertedores e nas estações C4-096 e C4-107 do DAEE.

Os valores acumulados diários precipitados na área experimental foram, na maioria das vezes, inferiores a 5 mm, porém há uma boa distribuição de chuvas com intensidades entre 5 e 20 mm, o que são chuvas muito efetivas quanto a recarga do solo (Fig. 5.8).

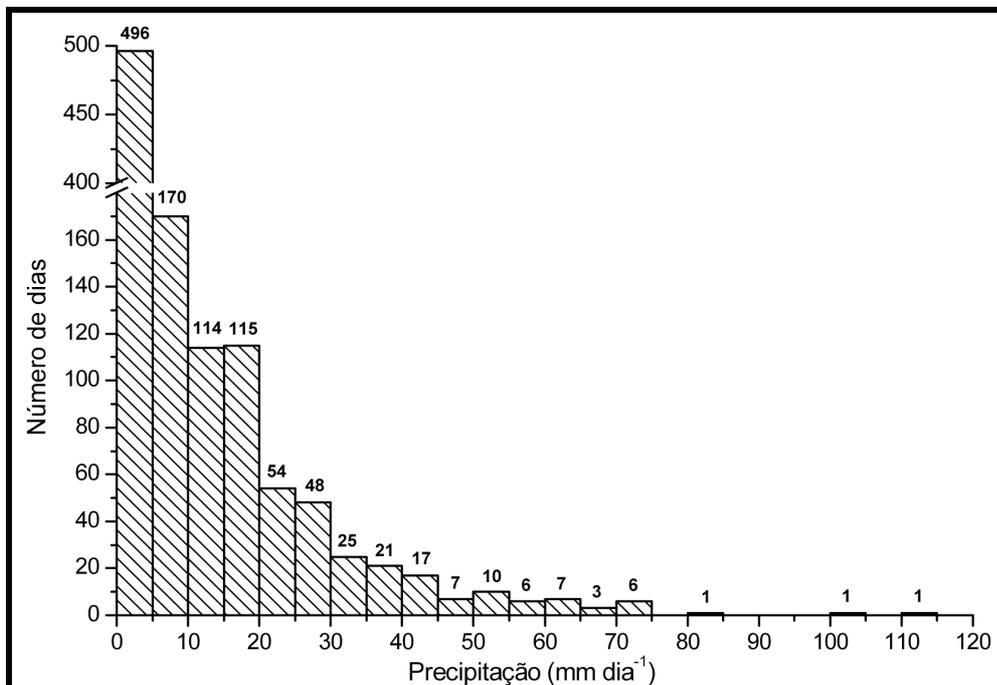


Figura 5.8. Distribuição do número de dias que ocorreram diferentes volumes de precipitação na área experimental, entre os anos de 2003 e 2009.

Nota-se no período de estudo que houve inicialmente uma fase de precipitação próxima da média de 2001 a 2004, seguida por uma fase de anomalias fortemente negativas no período de 2005 a 2007, que por sua vez precede uma terceira fase de 2007 a 2009, em que os desvios mensais não tem uma anomalia definida. Períodos com anomalias extremas, tais como esses, podem gerar impacto na vegetação de forma mais evidente, de forma a estimular respostas do sistema interessantes para a compreensão dos seus limites funcionais.

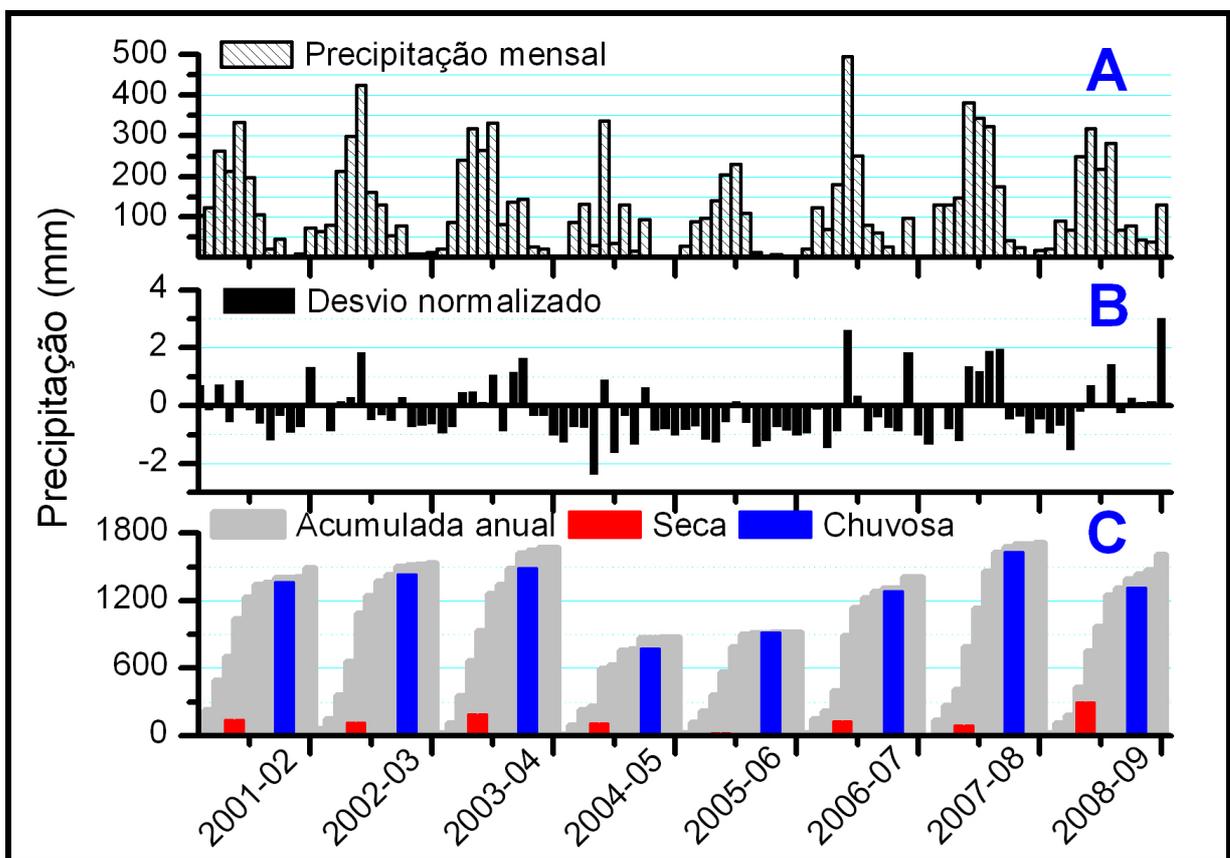


Figura 5.9. (A) Precipitação acumulada mensal (em mm m-1) medida na área experimental; (B) desvios normalizados (em mm m-1) em relação à precipitação média normal obtida na estação meteorológica do DAEE (C4-107) em Santa Rita do Passa Quatro, SP; (C) Precipitação acumulada anual (em mm, áreas cinzas) medida na área experimental de 1° de setembro a 31 de agosto do ano subsequente, Precipitação acumulada na estação seca (em mm, barras vermelhas) e na estação chuvosa (em mm, barras vermelhas), medida na área experimental de 1° de maio a 31 de agosto e de 1° de setembro a 30 de abril, respectivamente.

A distribuição do volume precipitado entre os meses de estação seca e úmida é muito acentuada (Tabela 5.1). As estações secas na área experimental são muito severas, acumulando não mais que 20% do total anual precipitado, em média, abaixo dos 10%. A

estação úmida mais chuvosa foi a do ano hídrico 2008/2009, com 1630 mm, enquanto que a estação seca mais chuvosa foi registrada no biênio 2009/2010. Por outro lado, a estação seca mais severa foi a de 2006/2007, com apenas 2 mm.

Tabela 5.1. Precipitação acumulada (em mm) durante as estações úmida (de 01 de setembro do ano anterior a 30 de abril do ano corrente) e seca (de 01 de maio a 31 de agosto do ano corrente) e Precipitação total anual (em mm, ano hidrológico: de 01 Setembro a 31 de Agosto), com respectivas percentagens, para os anos de 2002 a 2009, observadas na área experimental.

Ano	Estação Úmida		Estação Seca		Total
	P (mm)	(%)	P (mm)	(%)	P(mm)
2001/2002	1359	91	129	9	1487
2003/2004	1424	93	108	7	1532
2004/2005	1477	89	189	11	1666
2005/2006	769	88	102	12	871
2006/2007	908	98	15	2	923
2007/2008	1281	91	125	9	1407
2008/2009	1630	95	83	5	1713
2009/2010	1313	82	289	18	1601

5.3 Umidade do solo

A umidade do solo no PEG é monitorada desde a instalação da torre micrometeorológica em 2001 e já foi discutida por ROCHA et al. (2002, 2005), NEGRÓN-JUÁREZ (2004) e TANNUS (2005). Em 2004, BRUNO demonstrou que o uso de calibração específica para os sensores FDR instalados no PEG resultavam em valores de umidade volumétrica mais próximos aos valores esperados para o tipo de solo do sítio experimental, corrigindo em até 48% subestimativas devido ao uso das equações de calibração propostas pelo fabricante.

Após quase 10 anos de medidas automáticas no sítio PEG, os sensores ainda apresentam resultados com boa confiabilidade, sem quaisquer indicações de derivas nas medidas instantâneas (médias 10 min). Apesar disso, 3 sensores (instalados nas profundidades de 0,5 m, 1,0 m e 2,5 m) deixaram de operar devido a problemas técnicos, muito provavelmente devido a avarias por descargas elétricas naturais.

No FCP, houve dois momentos distintos de medidas da umidade do solo. O primeiro foi logo após ao corte do eucalipto, quando foram instalados tripletas de sensores nas profundidades de 0,1 e 0,2 m; o outro, logo após a implantação da torre micrometeorológica,

em 2005. Nessa segunda etapa, foram instalados os sensores FDR por meio de tudos de acesso nas profundidades 0,5 m; 1,4 m; 1,9 m; 2,35 m; 2,9 m; e 3,85 m. A umidade do solo da camada superficial foi monitorada com um sensor capacitivo Sentek com bobinas centradas em 0,07 m; 0,27 m, 0,47 m; 0,67 m; e 0,97 m.

Mesmo com o uso de sensores de umidade do solo baseados em diferentes técnicas, porém com o mesmo princípio físico: a variação do valor da constante dielétrica do meio, obteve-se, após as devidas calibrações, resultados que não apresentaram desvios significativos, o que possibilitou fazer as análises concernentes com bom grau de confiabilidade (Fig. 5.10).

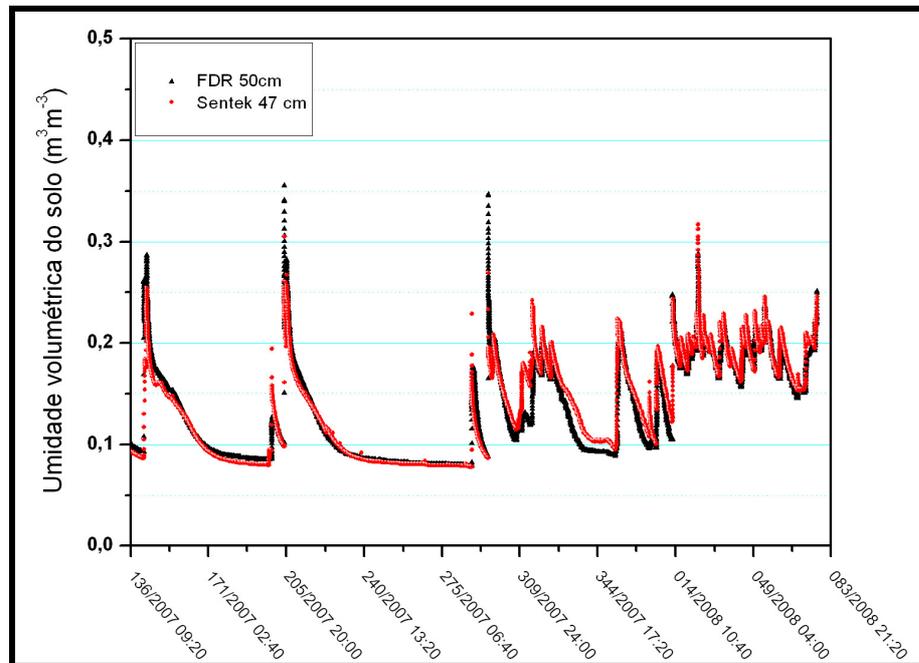


Figura 5.10. Comparação entre os sinais já calibrados dos sensores de umidade do solo instalados no sítio do Eucalipto.

Conforme pode-se observar nas figs. 5.11a-d a 5.15a-d, a umidade do solo medida na profundidade de 20 cm sob o PEG variou entre $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ao final dos períodos de longa estiagem e $0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ no auge da estação chuvosa. Esse padrão se repete durante todo o período de estudo. A umidade do solo medida na mesma profundidade sob o FCP apresenta mínimos e máximos muito similares aos medidos no cerrado, com exceção do primeiro ano de

crescimento do eucalipto (2001/2002), quando a umidade no FCP foi maior do que no PEG, incluindo os valores mínimos. Apesar da condição muito exposta em que o solo se encontrava no primeiro ano logo após ao plantio do eucalipto, a condição excessivamente úmida da profundidade de 20 cm abaixo do solo sob o eucalipto pode ser apenas devido a instalação e calibração dos sensores ali inseridos ou alguma singularidade da matriz do solo naquele local. (Fig. 5.12b). Similarmente, no ano de 2007 e na profundidade de 80 cm também houve excessivo umedecimento do solo (Fig. 5.14c), o que corrobora a possibilidade desse excesso ser apenas resultado de problemas na instalação do sensor.

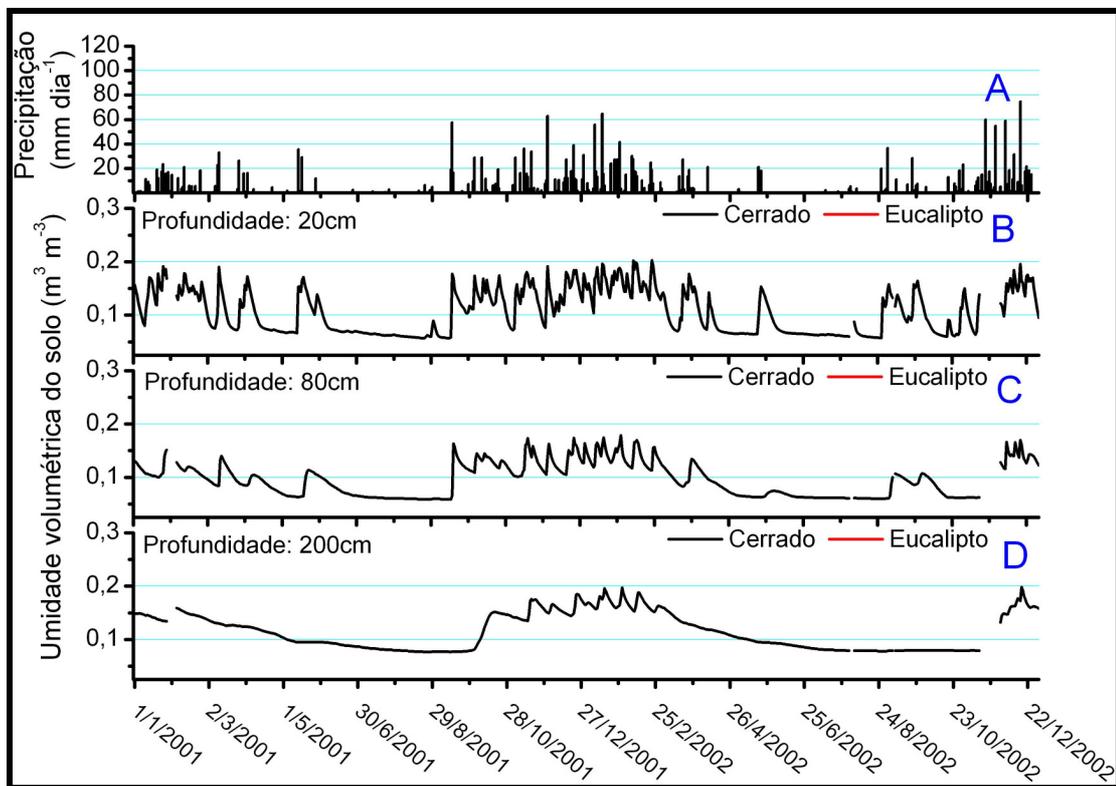


Figura 5.11. Séries históricas da (A) Precipitação diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) entre os anos de 2001 e 2002.

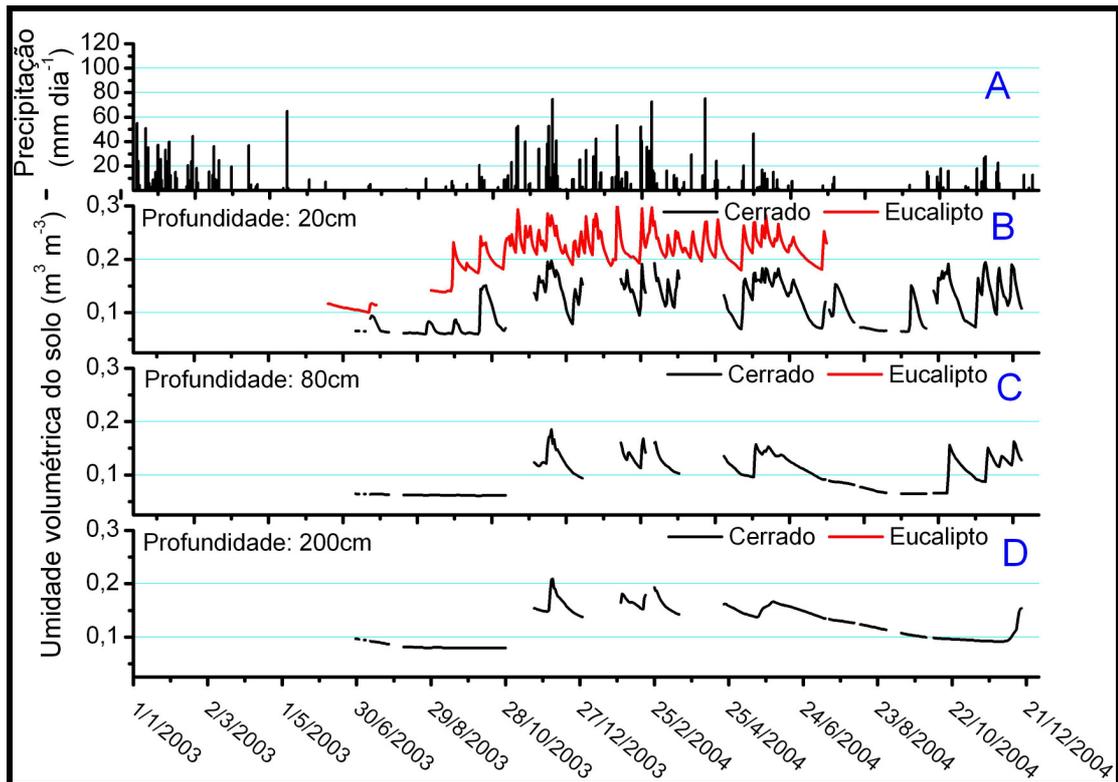


Figura 5.12. Séries históricas da (A) Precipitação diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) entre os anos de 2003 e 2004.

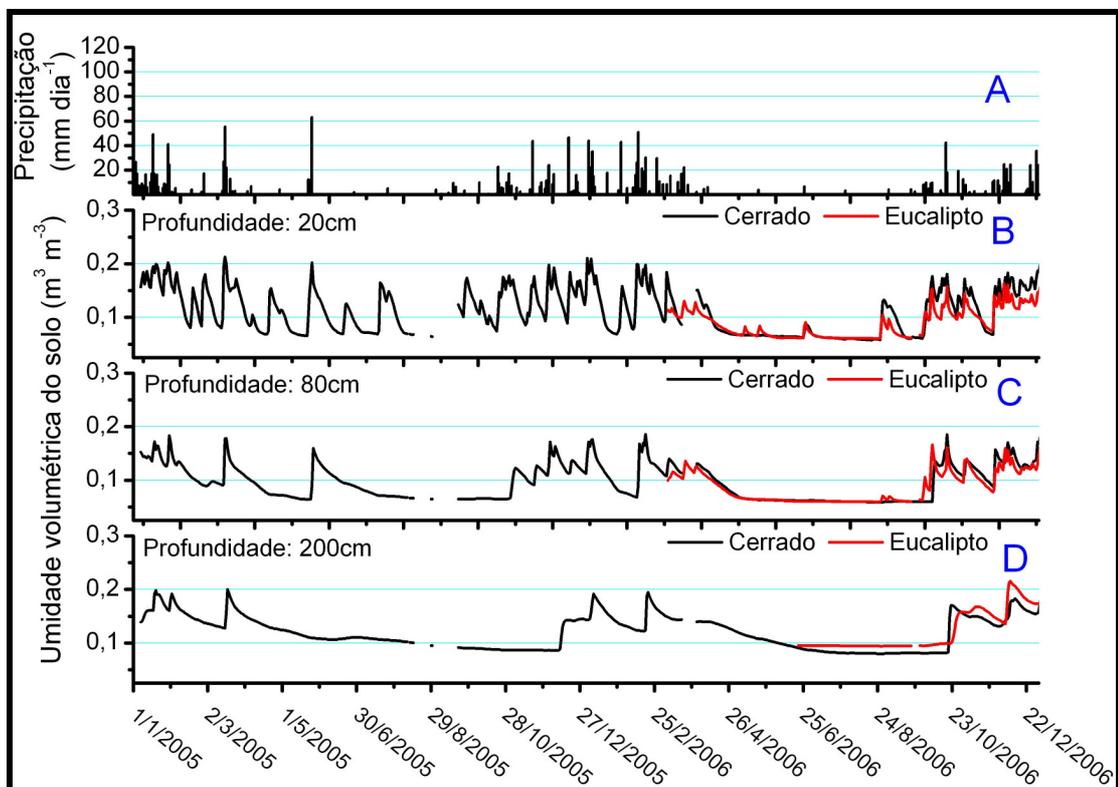


Figura 5.13. Séries históricas da (A) Precipitação diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) entre os anos de 2005 e 2006.

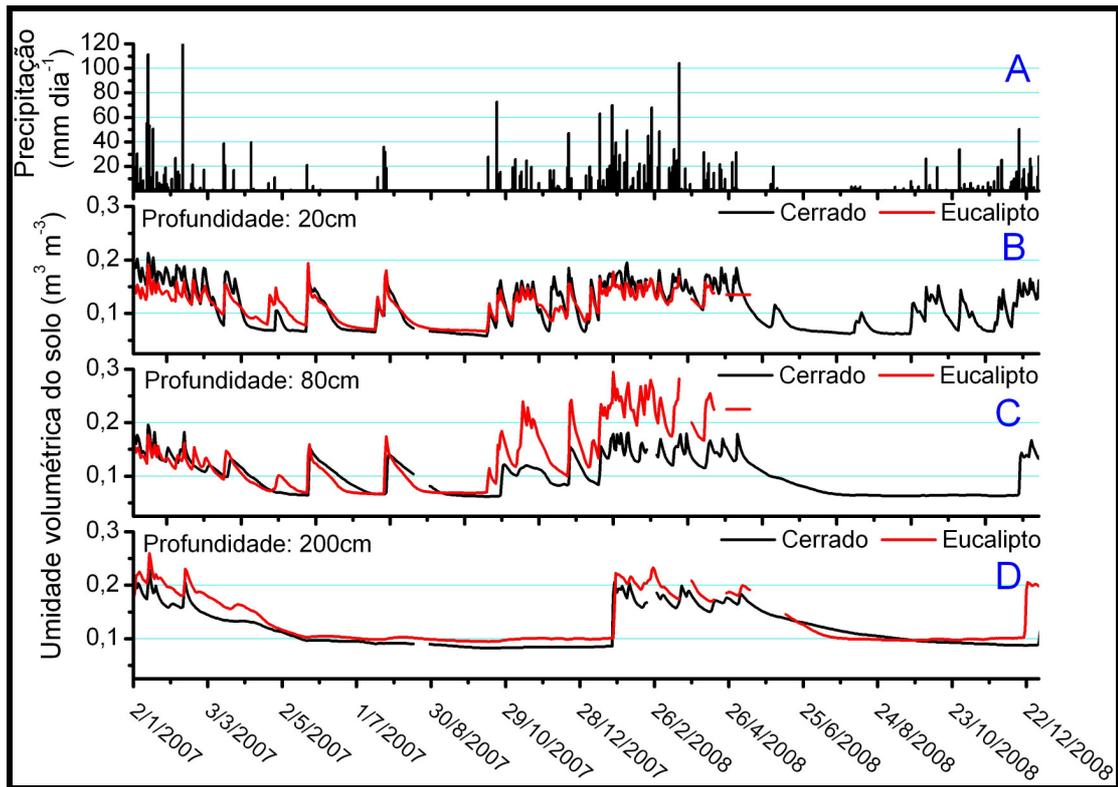


Figura 5.14. Séries históricas da (A) Precipitação diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) entre os anos de 2007 e 2008.

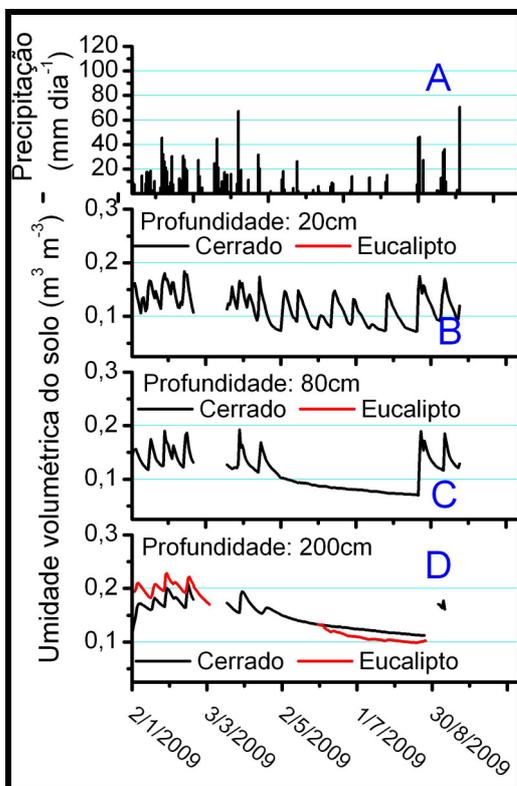


Figura 5.15. Séries históricas da (A) Precipitação diária (em mm) e da umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) nas profundidades de (B) 0,2 m, (C) 0,8 m e (D) 2,0 m, medidas nos sítios experimentais do Cerrado (linha preta) e do Eucalipto (linha vermelha) no ano de 2009.

Não obstante esses problemas, de modo geral, o padrão de umidade do solo registrado desde 2001 não apresentou derivação significativa e, quando comparado aos resultados discutidos por BRUNO (2004), conclui-se que os solos da área experimental são muito homogêneos e constantes quanto à suas propriedades físicas. Fato esse também observado quando se compararam os dados de umidade medidos nas diversas profundidades nos dois sítios experimentais (Fig. 5.16). Apenas no nível de 250 cm há a sugestão de maior umedecimento sob o sítio FCP, porém devido à incertezas na calibração e à amostragem em um único ponto (em cada sítio), não se pode afirmar que houve diferença expressiva da umidade do solo entre os dois sítios.

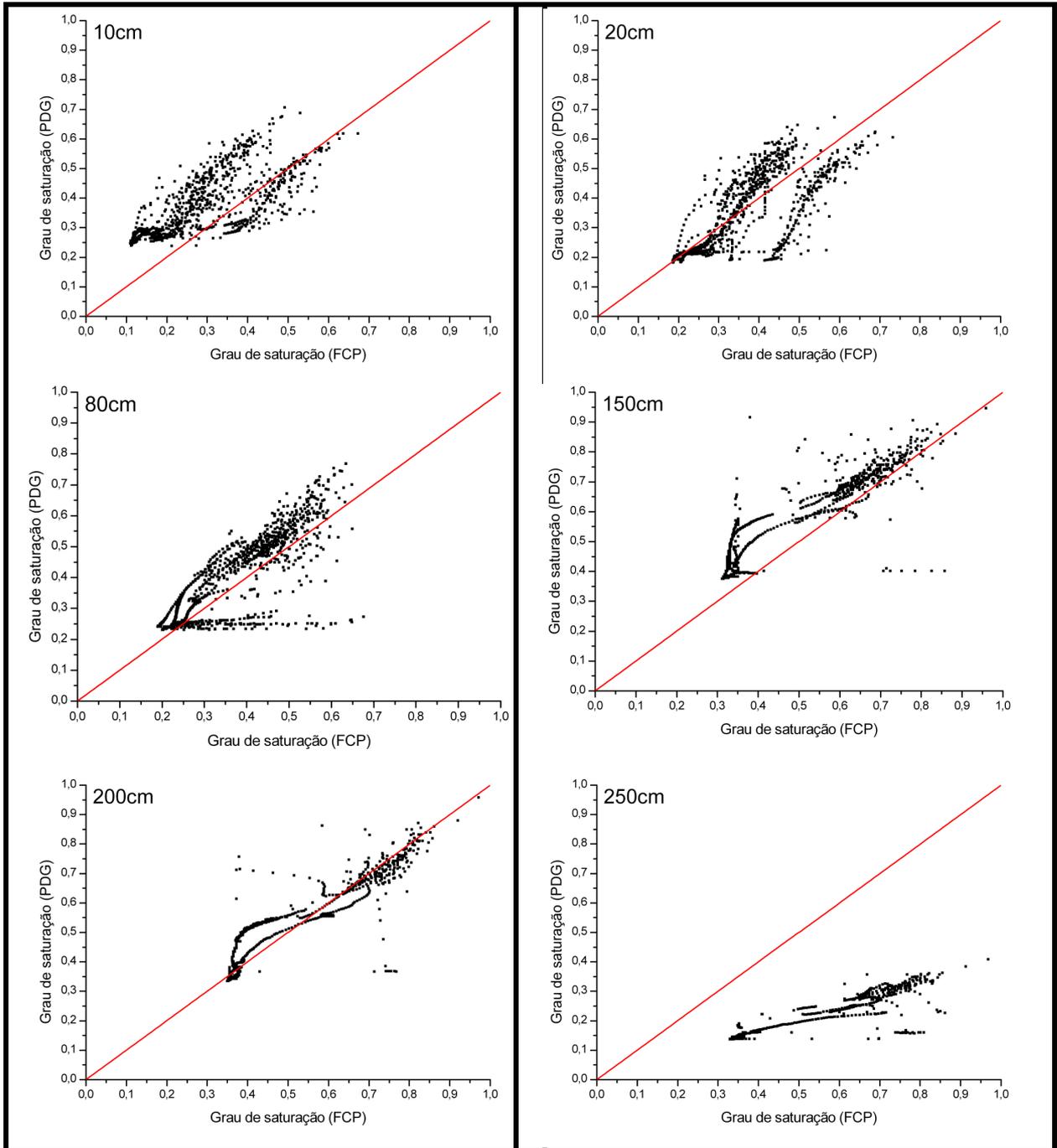


Figura 5.16. Relação entre o grau de saturação da umidade no solo (em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) medida nos sítios experimentais do Cerrado (PEG) e do Eucalipto (FCP)

Assim sendo, é válido usar os valores estimados para o ponto de murcha permanente, a capacidade de campo e a capacidade de água disponível como referência. Quanto a porosidade, deve-se tomar cuidado para não tomar como referência valores estimados com as medidas feitas nos dois períodos aqui discutidos, em que houve notória superestimativa da umidade do solo.

A análise do campo de grau de saturação da umidade no solo observada sob o Cerrado (fig. 5.17) e sob o Eucalipto (fig. 5.18) permite identificar como ocorrem processos tais como a drenagem. Pode-se observar que no auge da estação úmida, em ambos os sítios experimentais, houve o rápido e completo umedecimento da coluna do solo, alcançando valores acima de 90% abaixo de 1,25 m sob o Cerrado e abaixo de 0,6 m sob o Eucalipto, mas retornando imediatamente a valores em torno de 60% e de 20% nas camadas superficiais do Cerrado e do Eucalipto, respectivamente.

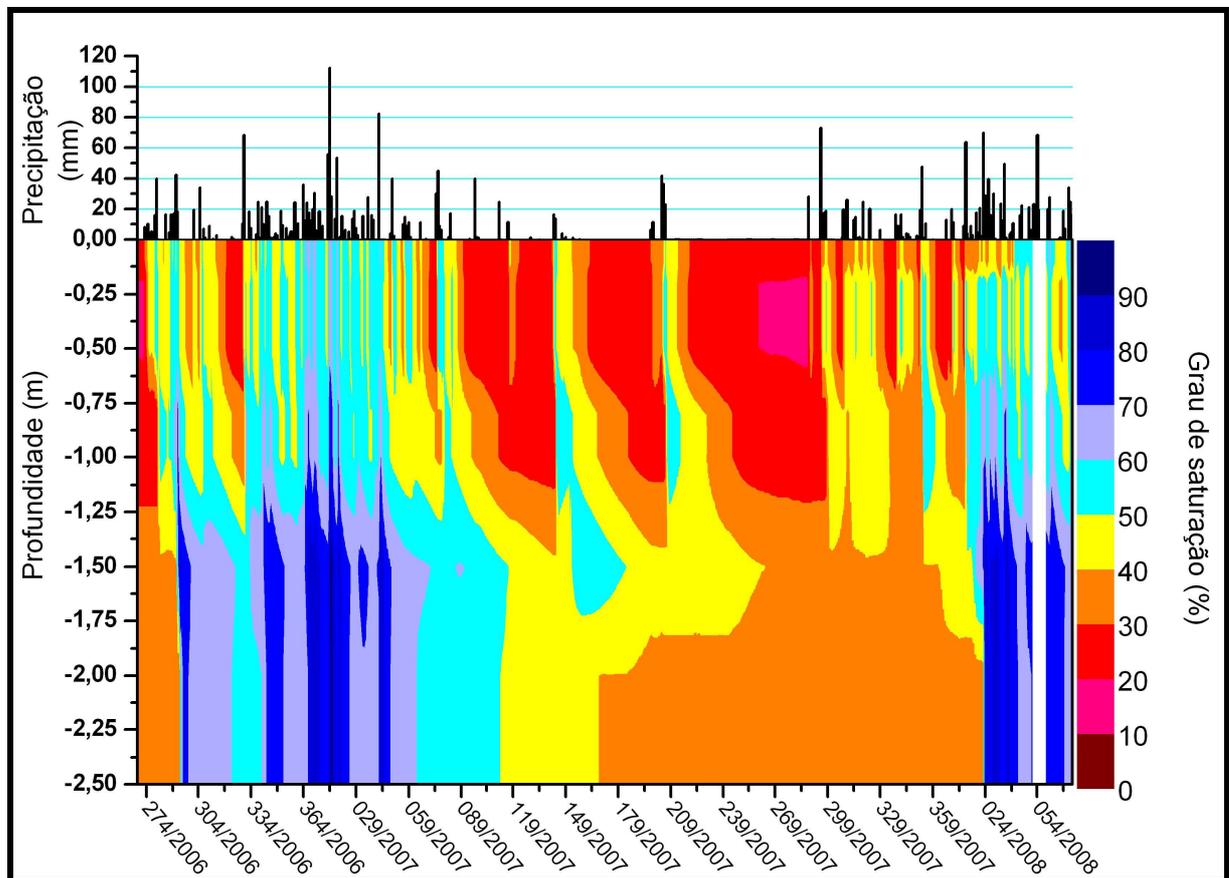


Figura 5.17. Campo do grau de saturação da umidade no solo (em %) medida no sítio experimental do Cerrado e precipitação diária medida na área experimental.

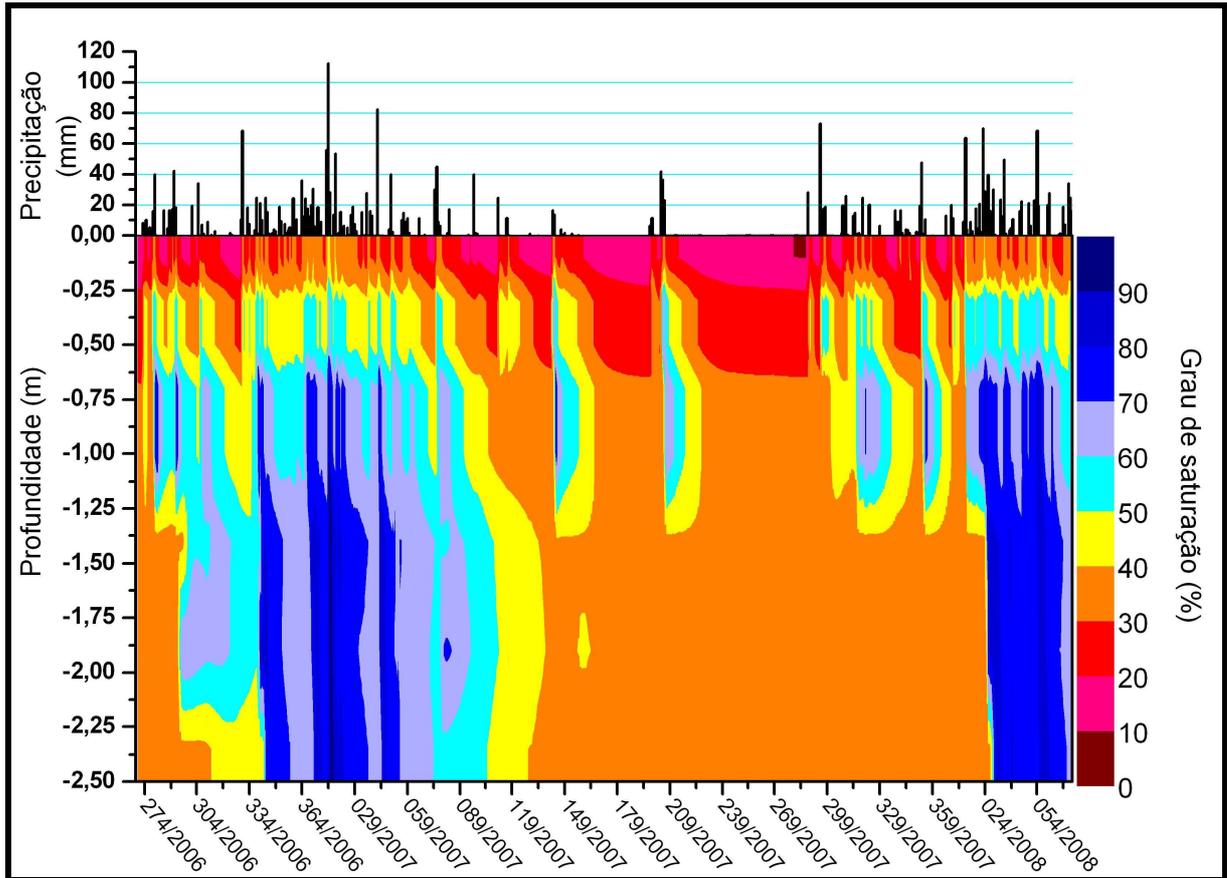


Figura 5.18. Campo do grau de saturação da umidade no solo (em %) medida no sítio experimental do Eucalipto e precipitação diária medida na área experimental.

Por outro lado, na estação seca houve o estabelecimento de “bolhas” secas em ambos os sítios, variando de 40% a menos de 20%. Os padrões da umidade sob o eucalipto e o Cerrado são de certa forma semelhantes na variabilidade sazonal e vertical. Os eventos de precipitação isoladas no período seco geralmente levam ao umedecimento até a profundidade de 1,5 m, o qual parece ser o limite de drenagem observada, comum aos dois sítios experimentais em comum. No Eucalipto, apesar desse limite ser um pouco mais raso, é notável que as camadas subjacentes à superfície mantêm sempre com teores de umidade abaixo de 30%.

Ao se comparar a umidade do solo apenas nas camadas superficiais sob o Eucalipto, distinguindo-se a fase pós-plantio (um ano completo) e a fase de desenvolvimento avançado

da plantação, nota-se facilmente o decréscimo abrupto da condição de umidade do solo de um período para o outro, em até 50% do valor médio observado no primeiro ano (Fig. 5.19)

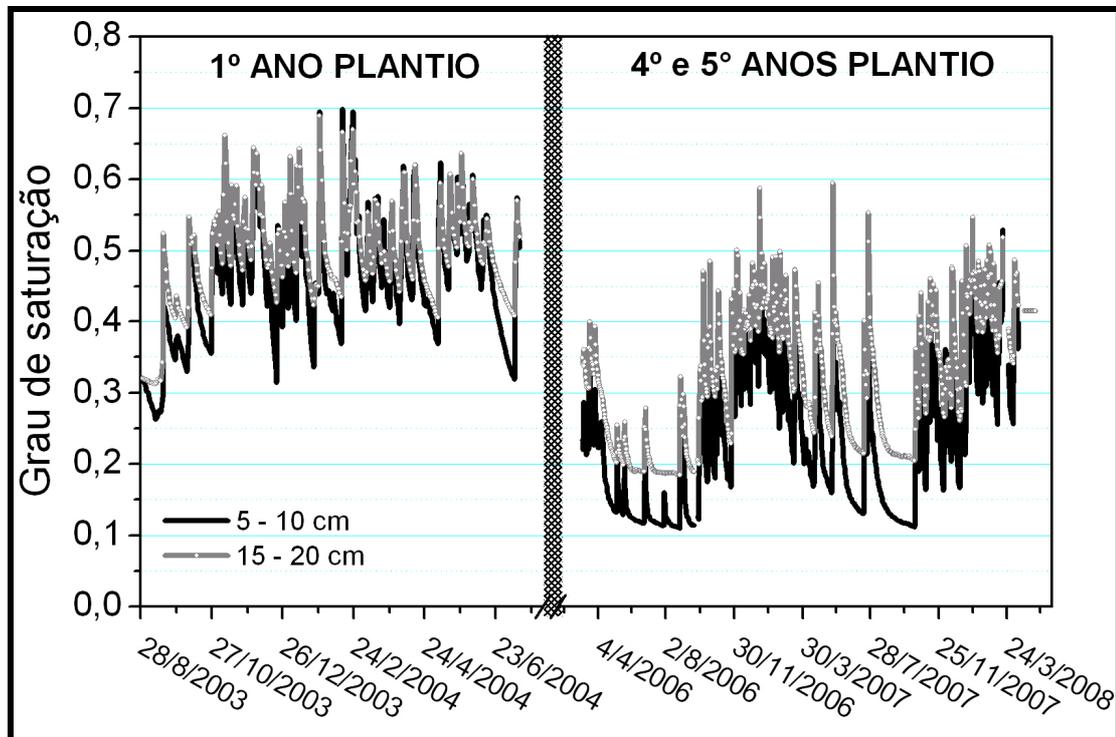


Figura 5.19. Comparação da umidade nos níveis rasos do eucalipto, nos períodos de desenvolvimento inicial com o período de desenvolvimento avançado da vegetação.

Enquanto na primeira fase a umidade variou de 30% a 70%, na fase seguinte esses valores decaíram para 10% e 55%, respectivamente. O que pode ser o indicativo da maior extração radicular nessa segunda fase.

5.4 Balanço de energia

O fluxo de calor latente médio diário estimado sobre o Cerrado e o Eucalipto mostraram um padrão sazonal em concordância com a oferta de radiação solar e também correlacionados com a umidade do solo, com máximos centrados aproximadamente em Fevereiro, e mínimos mais acentuados em Agosto (Figuras 5.20.a-c).

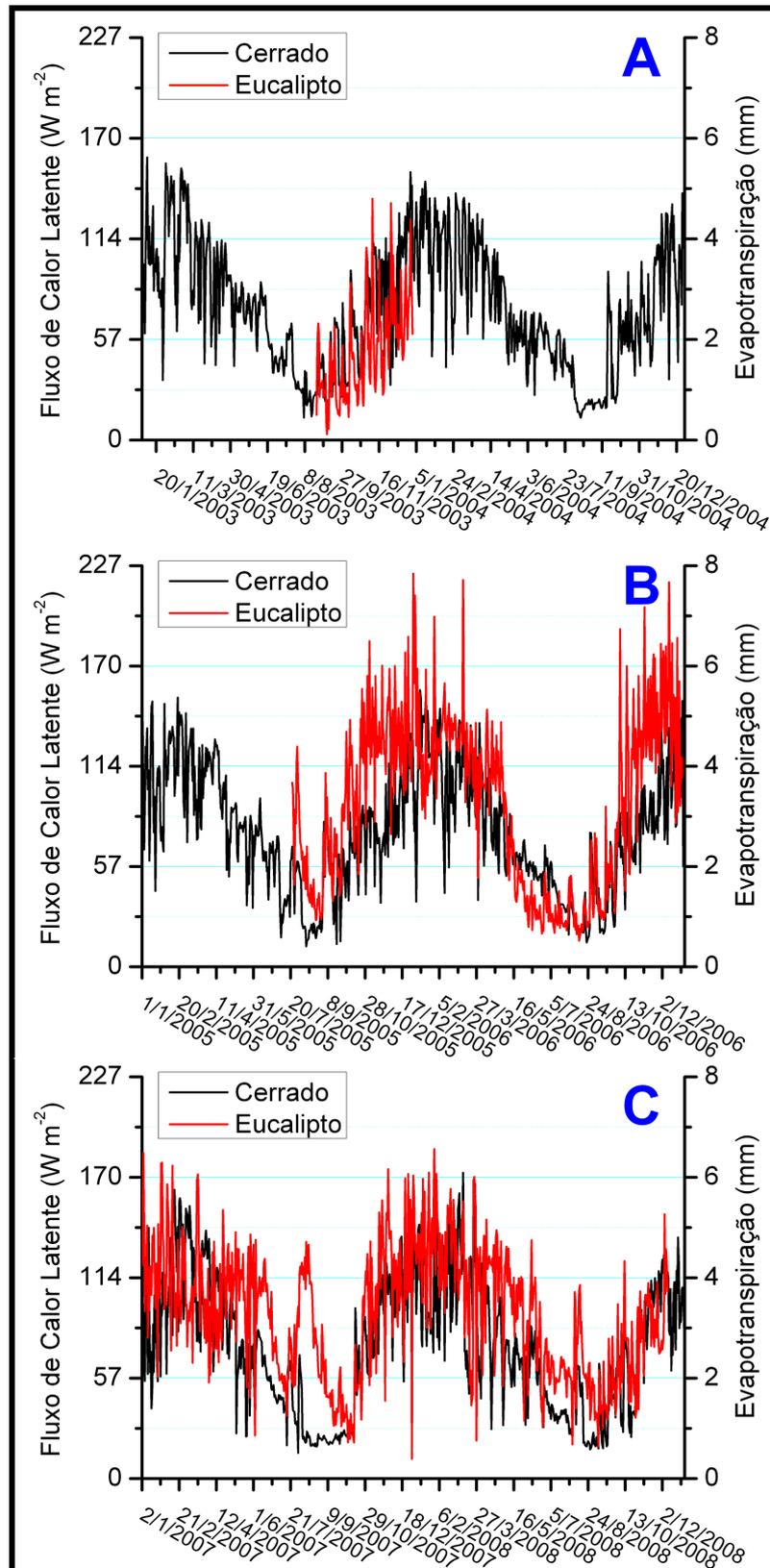


Figura 5.20. Fluxo de calor latente médio diário (em $W m^{-2}$ no eixo à esquerda e em $mm dia^{-1}$ no eixo à direita) sobre o Cerrado (linha sólida preta) e sobre o Eucalipto (linha sólida vermelha), nos períodos bienais de (a) 01/01/2003 a 31/12/2004, (b) 01/01/2005 a 31/12/2006, (c) 01/01/2007 a 31/12/2008.

Os mínimos de evapotranspiração nos dois locais ocorreram aproximadamente 2 meses atrasados do solstício de Inverno, geralmente entre Agosto e Setembro, devido à progressiva redução da umidade do solo durante a época de estiagem. Os mínimos de evapotranspiração média diária nos dois locais foram próximos entre si, de $\sim 1 \text{ mm dia}^{-1}$. Nas fases de estiagem mais pronunciada notou-se que ocorreram alguns picos na escala intrasazonal, especialmente após os eventos de chuva, onde as taxas de evapotranspiração foram ligeiramente superiores a $\sim 2 \text{ mm dia}^{-1}$ sobre o Cerrado, e substancialmente superiores sobre o eucalipto, de $\sim 4 \text{ mm dia}^{-1}$, como indicam os casos de Agosto de 2005 (Figura 5.20.b) e Agosto de 2007 (Figura 5.20.c). Embora não haja elementos para discutir em profundidade estas diferenças dos picos intrasazonais de evapotranspiração entre os dois locais, pode-se listar como possíveis explicadores: a maior capacidade de resposta ao estímulo do umedecimento no Eucalipto, associado à uma relativamente maior quantidade de folhas verdes, que secaram apenas parcialmente durante o Inverno; e secundariamente, devido à maior perda de água por interceptação da chuva no Eucalipto, devido à cobertura do dossel relativamente mais fechada e homogênea do que sobre o Cerrado.

Os máximos de evapotranspiração diária manifestaram-se sazonalmente nos dois locais desde o final da Primavera até o início do Outono (Figuras 5.20.a-c). As taxas máximas de evapotranspiração diária foram de $\sim 5 \text{ mm dia}^{-1}$ sobre o Cerrado, e ligeiramente maiores sobre o Eucalipto, de $\sim 6 \text{ mm dia}^{-1}$.

No período de 2003 a evapotranspiração do Cerrado foi maior do que a do Eucalipto, em diferenças de $\sim 2 \text{ mm dia}^{-1}$ (Figura 5.21.a) o que se atribui principalmente devido ao estágio inicial de crescimento da plantação naquele ano, o que, apesar de haver supostamente uma alta taxa de transpiração foliar nos indivíduos emergentes, resulta em uma reduzida taxa transpiração por unidade de área devido ao baixo índice de área foliar. Nos demais anos, a partir de 2005, a evapotranspiração média diária foi substancialmente maior no

Eucalipto, mais notavelmente para os eventos superiores a 2 mm dia^{-1} , ou seja, aqueles pronunciadamente na estação chuvosa, como sugere a comparação de eventos (Figuras 5.21.b-f)

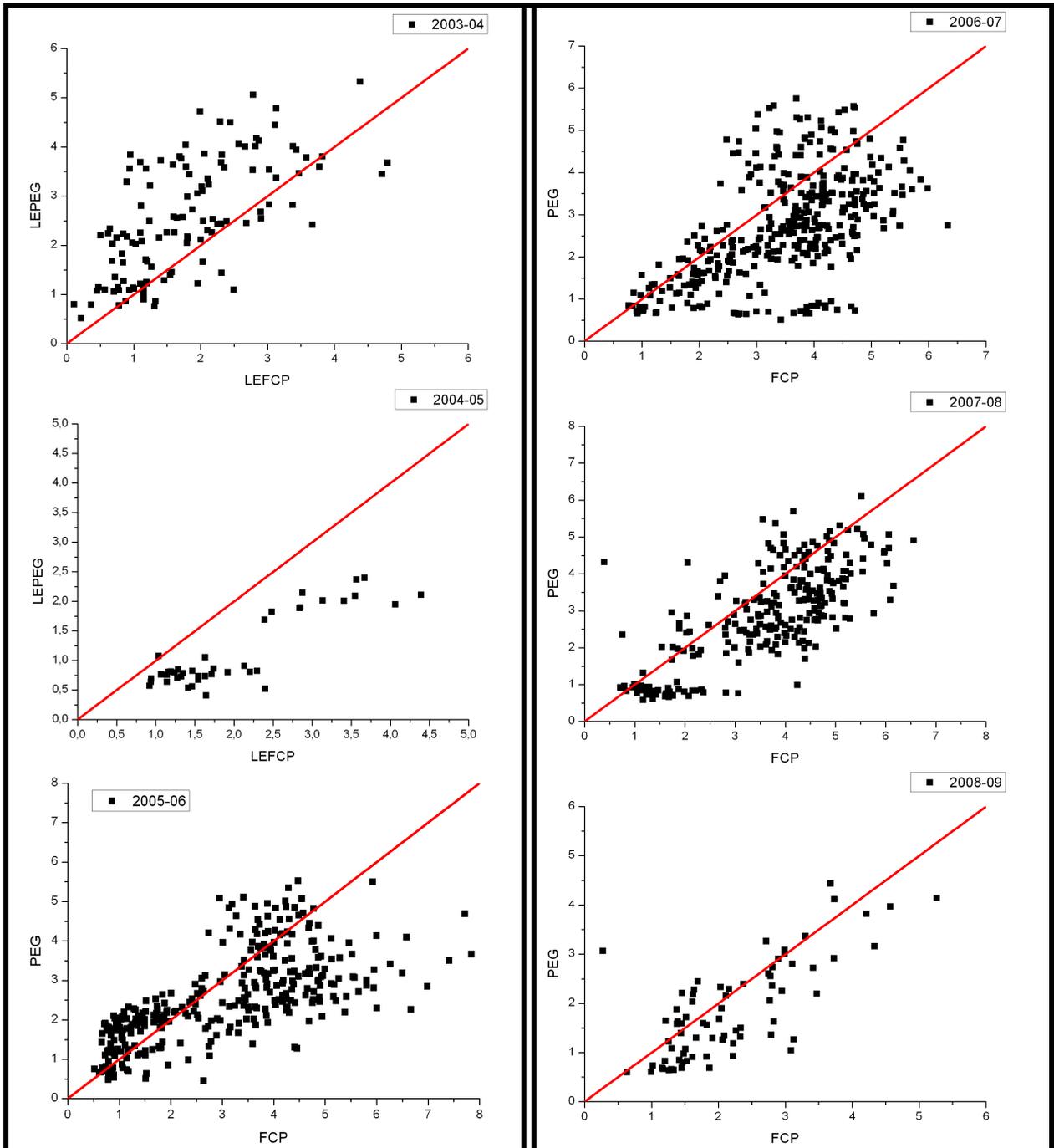


Figura 5.21. Relação entre o fluxo de calor latente médio horário (em W m^{-2}) sobre o Cerrado (PEG) e sobre o Eucalipto (FCP), nos períodos de (a) 2003-04, (b) 2004-05, (c) 2005-06, (d) 2006-07, (e) 2007-08, e (f) 2008-09.

O fluxo de calor sensível médio diário sobre o Cerrado e o Eucalipto mostraram um padrão sazonal de fraca concordância com a sazonalidade da radiação solar, mas notavelmente correlacionado com a umidade do solo, com máximos acentuados aproximadamente em Agosto, no final da estiagem, como sugerem os dados dos períodos de 2003 e de 2005-2006 (Figuras 5.22.a-b). Os máximos do fluxo de calor sensível médio diário foram de $\sim 150 \text{ W m}^{-2}$ no Cerrado, durante todos os anos de estimativa, que por sua vez mostraram-se comparativamente superiores aos do Eucalipto, de $\sim 100 \text{ W m}^{-2}$, tanto no período de 2003 (Figura 5.22.a) como no período de 2006 (Figura 5.22.b). No período de 2003, quando a cobertura vegetal era inicial no Eucalipto, houve mais comparabilidade do fluxo de calor sensível entre os dois locais, como sugerem os valores médios horários, mas que ainda assim mostram valores superiores sobre o Cerrado para as taxas mais altas, por exemplo as superiores a 100 W m^{-2} (Figura 5.23.a). No período de 2005 a 2009, com a vegetação do Eucalipto em estágios avançados, o fluxo de calor sensível mostrou-se predominantemente superior no Cerrado, em escalas horárias geralmente de 20 a 60 W m^{-2} .

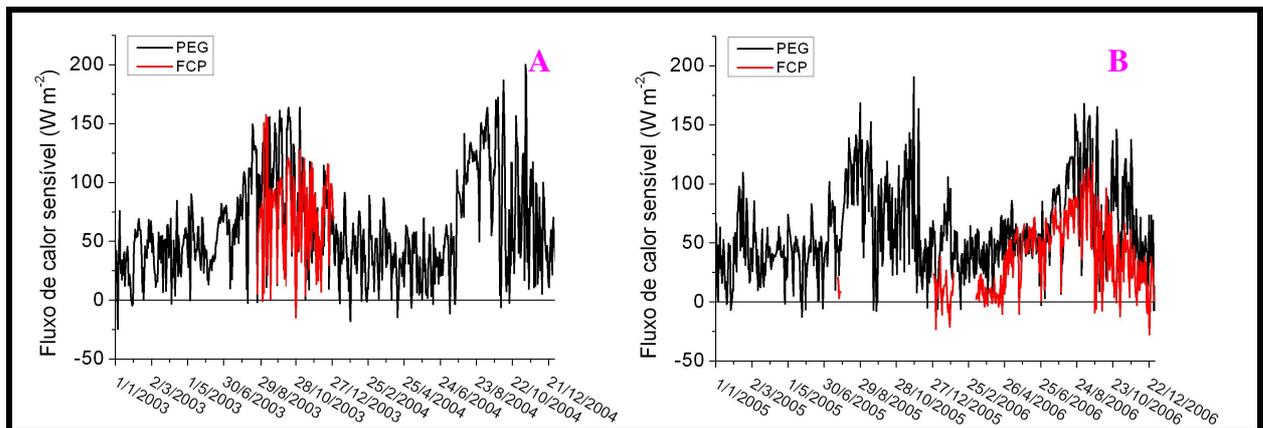


Figura 5.22. Fluxo de calor sensível médio diário (em W m^{-2}) sobre o Cerrado (linha sólida preta) e sobre o Eucalipto (linha tracejada vermelha), nos períodos bienais de (a) 01/01/2003 a 31/12/2004, (b) 01/01/2005 a 31/12/2006.

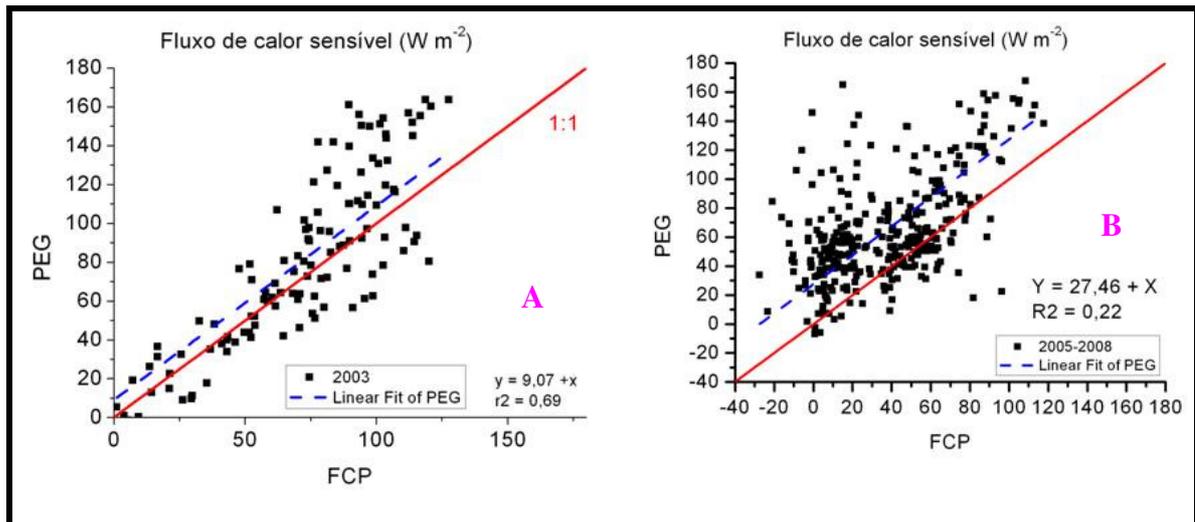


Figura 5.23. Relação entre o fluxo de calor sensível médio horário (em $W m^{-2}$) sobre o Cerrado (PEG) e sobre o Eucalypto (FCP), nos períodos de (a) 2003 e (b) 2005 a 2009.

Desta forma mostra-se notável que a partição de energia foi predominantemente favorável ao Eucalypto em relação ao Cerrado no sentido de indicar maior evapotranspiração no primeiro, e de aumentar o fluxo de calor sensível no segundo local. Somente durante o 1º ano de plantio de Eucalypto essa comparação não foi fundamentada dessa maneira, período em que a evapotranspiração foi comparável entre os dois locais. A maior evapotranspiração do Eucalypto também corrobora a comparação da temperatura do ar máxima diária mais fria naquele local do que sobre o Cerrado, em função do favorecimento de dispêndio de energia na evaporação da água.

5.5 Descarga hidrológica

Com relação às cotas medidas e vazões estimadas nas microbacias, há dois pontos notáveis: uma certa tendência de decréscimo da cota, desde 2003 até 2008, para ambas as microbacias (Fig. 5.24); em segundo lugar, o fluxo básico na microbacia FCP manteve-se sempre inferior ao da microbacia PEG (Fig. 5.25).

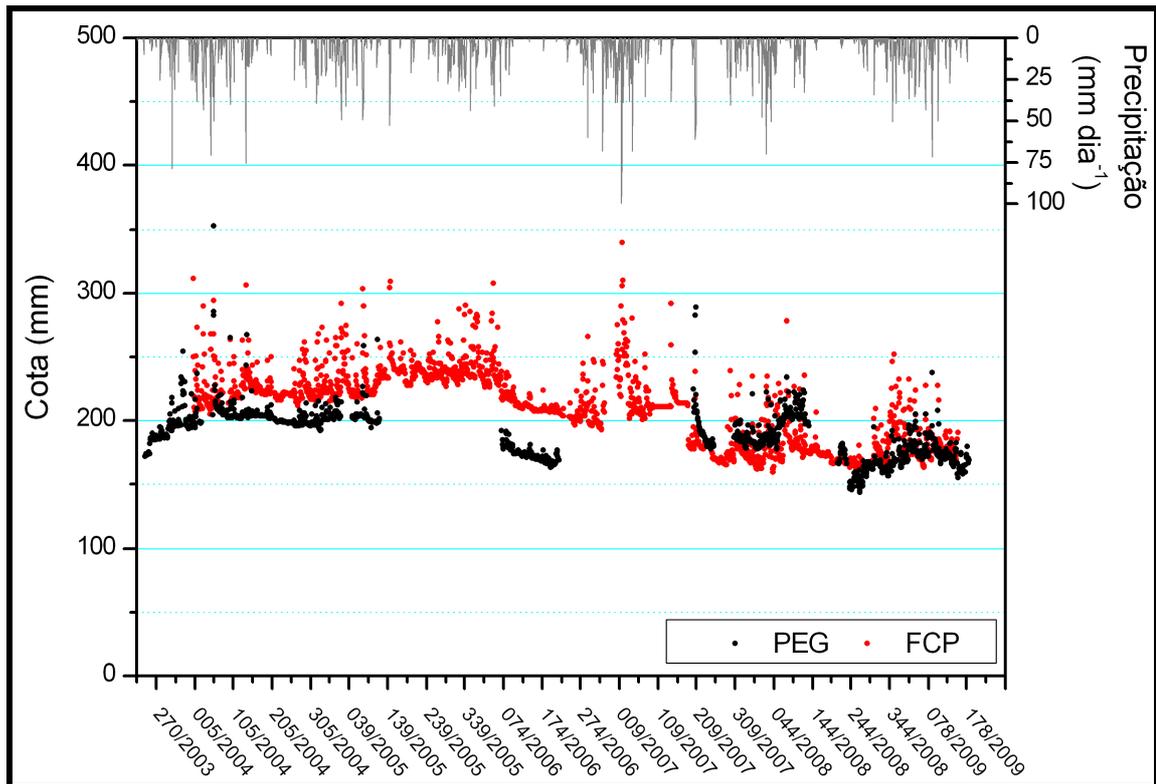


Figura 5.24. Cota (em mm) e Precipitação (em mm dia⁻¹) observados nos sites do Cerrado (em preto) e do Eucalipto (em vermelho), desde 270/2003 a 186/2009.

Com relação ao decréscimo das medidas de cota no tempo, notam-se particularmente três subperíodos distintos do padrão de cota diária, que mostraram-se controlados pelo regime de precipitação discutido anteriormente (Fig. 5.9): no primeiro subperíodo, do início do monitoramento até aproximadamente Fevereiro de 2006, as médias mantiveram-se estacionárias, associadas com padrões de estação chuvosa e seca dentro da normalidade. No segundo subperíodo, do início de 2006 até meados de 2007, houve uma forte tendência de redução da cota média, que por sua vez esteve associada ao regime de anomalias negativas de chuva que começaram a ocorrer até um pouco antes, em 2005 (conforme discussão da Fig. 5.9). E o terceiro subperíodo, a partir de aproximadamente final de 2007, mostra que as medidas de cota estabilizaram-se, e com clareza em um patamar inferior ao de 2003. Neste terceiro subperíodo, o padrão de chuva também voltou a oscilar ao redor da média, ou seja, não houve anomalia positiva de precipitação capaz de restabelecer as cotas de 5 anos atrás.

Ao se converter os dados de cota para vazão (Fig. 5.25), por meio das curvas-chave dos vertedores (Anexo A), fica evidente que o padrão da média de cotas da bacia PEG ser inferior à da bacia FCP, inverte-se para a vazão, ou seja, a vazão PEG variou de $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que foi um intervalo claramente superior ao da vazão do córrego FCP, que variou de $0,02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

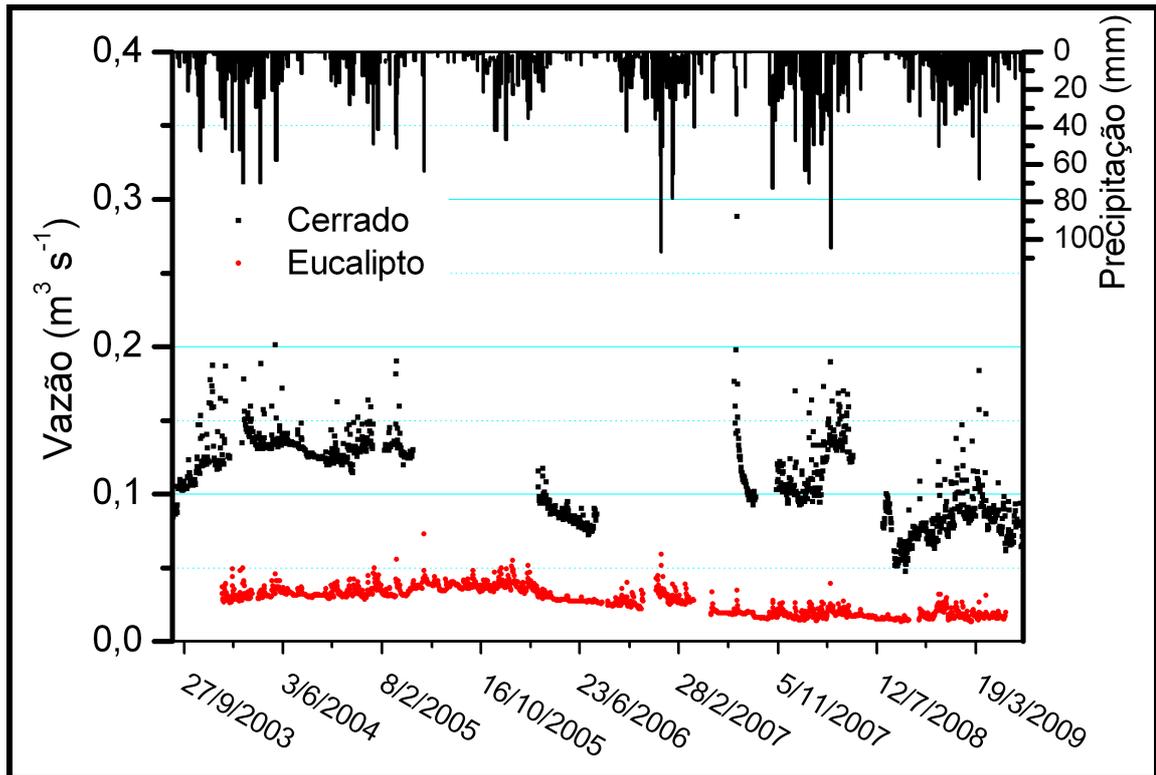


Figura 5.25. Vazão (em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) e Precipitação (em mm dia^{-1}) observados nos sítios do Cerrado (em preto) e do Eucalipto (em vermelho), desde 27/9/2003 a 19/3/2009.

O padrão da vazão medida nas microbacias sugere um regime de maior oscilação ao redor média na bacia PEG, em relação à bacia FCP, o que sugere que sua resposta aos eventos de chuva é mais sensível. A redução da cota média em ambas as microbacias também foi notada no regime de vazão, ou seja, a bacia FCP teve diminuição do fluxo básico desde o final de 2005 até 2009, passando de $\sim 40 \text{ L s}^{-1}$ para $\sim 16 \text{ L s}^{-1}$ (variação percentual de -150%) enquanto que na bacia PEG a redução foi de aproximadamente $\sim 140 \text{ L s}^{-1}$ para $\sim 80 \text{ L s}^{-1}$ (variação percentual de -75%). Com relação ao padrão de deflúvio, as médias estimadas nas duas bacias são comparáveis (Fig. 5.26), ou seja, é um padrão de comparação diferente do

padrão da cota e também da vazão. Como esperado, os padrões de tendência do deflúvio são exatamente os mesmos da vazão. Em ambas as bacias, as médias passam de $\sim 0,75$ mm no início do monitoramento para $\sim 0,32$ mm após o final de 2007 (Fig. 5.26). A variabilidade da vazão e do deflúvio podem ser explicados principalmente pela redução da chuva, mas a maior variação percentual da vazão na bacia FCP pode ter sido também devido ao controle intrínseco do ecossistema em si.

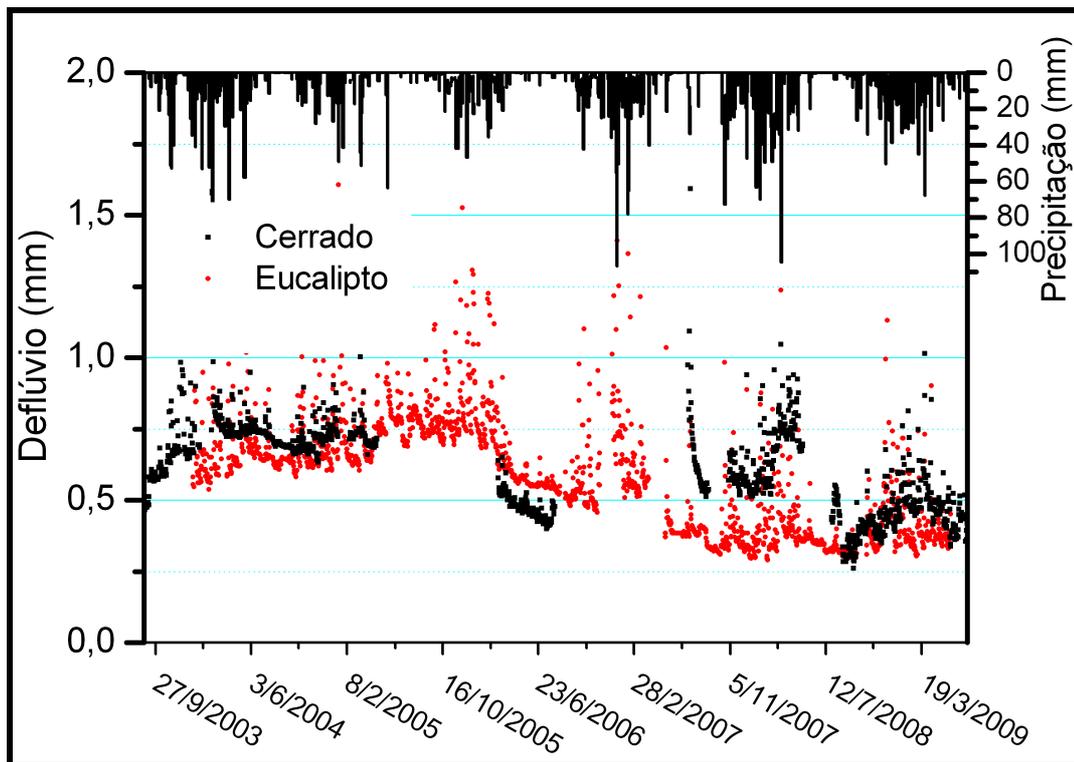


Figura 5.26. Deflúvio (em mm dia^{-1}) e Precipitação (em mm dia^{-1}) medidos nos sítios do Cerrado (preto) e do Eucalipto (vermelho), desde Setembro/2003 a Julho/2009 (abscissa em Dia do Ano/Ano).

5.6 Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão

O modelo hidrológico TOPOG é composto por um núcleo e vários módulos aplicativos. Esse núcleo contém um conjunto de rotinas para análise de terreno, as quais são usadas para gerar uma rede de elementos da bacia hidrográfica. Para cada célula da bacia serão calculados balanços hídricos com passo de tempo de 1 hora ou menos. A rotina de análise de terreno do TOPOG se baseará em um modelo digital de terreno – MDT - (ou um mapa de contorno digitalizado) para (1) calcular os divisores da bacia: desde os picos e pontos

de cela¹ (indicados pelo usuário) até o exutório delimitado pela curva de nível de menor cota (também indicado pelo usuário); (2) segmentar a bacia em uma rede de elementos interconectados; e (3) calcular atributos topográficos hidrologicamente relevantes para cada célula.

A elaboração inicial do MDT para ser fornecido ao TOPOG, de forma que o mesmo pudesse resolver a rede de elementos, calcular as trajetórias de fluxo e os atributos topográficos, não foi resolvido com o MDT inicialmente utilizado², que apesar de ter resolução de 10 m x 10 m, apresentou incongruências nas curvas de nível ou “sujeiras” (pontos com altitudes deslocadas), que truncaram o processo de segmentação da bacia pelo modelo TOPOG. Como solução, foram utilizadas imagens SRTM³ com resolução de 90m x 90m para a elaboração do MDT. A partir da imagem SRTM original, com o uso do software IDRISI, foi recortada uma janela com a imagem da região de interesse (enquadrando apenas a área da Gleba Pé-de-Gigante: coordenadas superior/esquerda (lat/lon) -21.600557 / -47.666279 e inferior/direita (lat/lon) -21.666951 / -47.599289), a qual foi convertida de coordenadas naturais para coordenadas UTM, sistema de coordenadas geográficas Córrego Alegre 23k, e interpolada de 81 x 81 pontos para uma matriz de 400 x 400 pontos (Fig. 5.27a)

A partir do MDT, gerou-se uma matriz com latitude, longitude e altitude, a qual serviu como base para o TOPOG gerar as curvas de nível e as análises de terreno (Fig. 5.27b).

¹ Picos são curvas de nível fechadas rodeadas por cotas mais baixas, mesmo que localmente. Pontos de cela são regiões topográficas localizadas pelo menos entre dois picos, representando um ponto de mínimo local entres esses dois pontos máximos.

² Gentilmente fornecido pelo Dr. Humberto Mesquita Jr. que fez a caracterização da vegetação da Gleba Pé-de-Gigante baseada em sensoriamento remoto, durante seu mestrado no ICB-USP.

³ <http://srtm.csi.cgiar.org/>

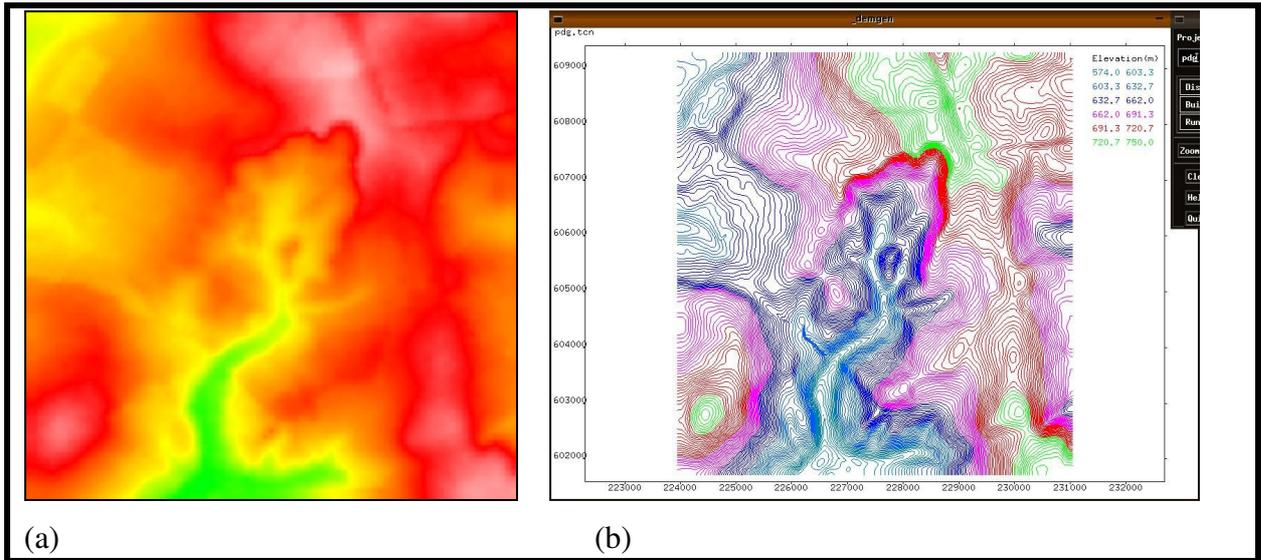


Figura 5.27. a) Modelo digital de terreno elaborado a partir de imagem SRTM para assimilação pelo TOPOG; b) Curvas de nível elaboradas pelo módulo de análise de terreno do TOPOG

A partir do MDT o TOPOG conseguiu resolver as linhas de trajetória, os limites da bacia e sua segmentação (Fig. 5.28)

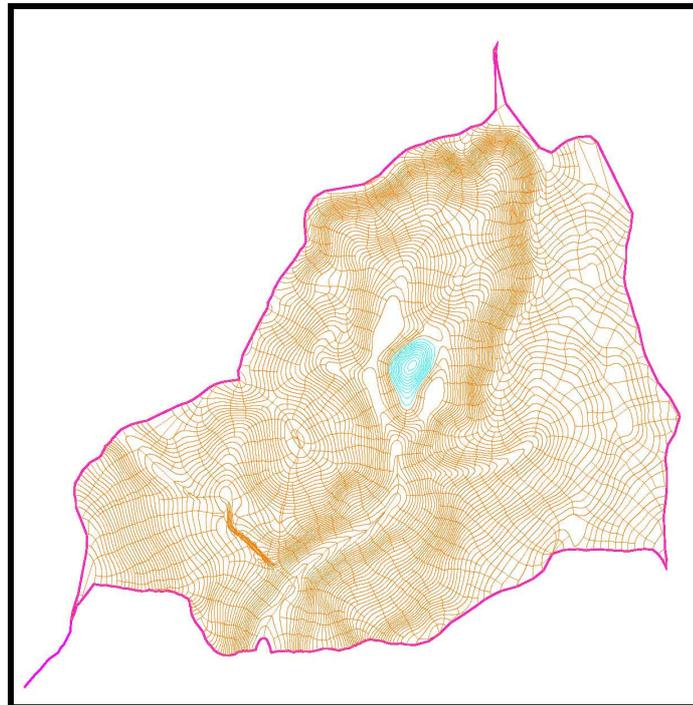


Figura 5.28. Modelo digital de terreno elaborado pelo TOPOG com os limites da bacia, os elementos de área e as linhas de trajetória.

Conforme podemos observar na Fig. 5.29a, a declividade da bacia variou de 0° a 50° , com um pequeno trecho de até 75° . Já com relação ao aspecto, pode-se observar na Fig. 5.29b

que a bacia apresenta áreas variando de 0 a 360 graus, mas com duas principais faces: para leste (270°) e para oeste (90°).

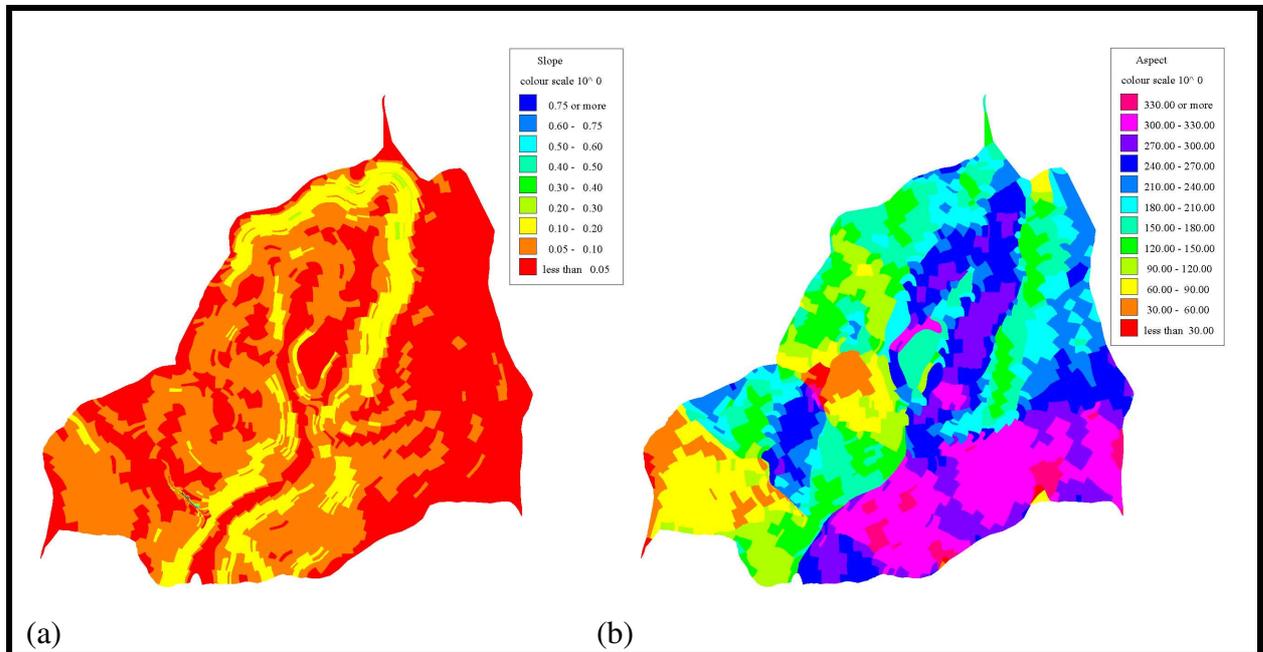


Figura 5.29. a) Declividade (Slope) e b) Aspecto na área da bacia córrego Paulicéia, Gleba Cerrado Pé-de-Gigante, Santa Rita do Passa Quatro, SP.

O trabalho de prescrição dos parâmetros, para se obter uma estimativa do deflúvio calculado próxima do deflúvio observado, passou por uma sucessão de testes de sensibilidade de todos eles. Por simplicidade, não será discutido este trabalho de calibração, mantendo-se o foco no resultado que se mostrou o mais satisfatório dentre os testes realizados. O desempenho do modelo para o cálculo do deflúvio na bacia PEG mostrou um padrão de fluxo básico próximo ao observado em grande extensão do período, tendo havido discrepância apenas em 2004 (Fig. 5.30). Uma certa deficiência do modelo mostrou-se em superestimar os eventos de maior oscilação do deflúvio, ou seja, os picos de vazão após os eventos de chuva. Esse viés ocorreu devido à tendência do modelo em superestimar o escoamento superficial, em detrimento do escoamento básico e subsuperficial. Apesar disso, o escoamento básico mostrou-se bem simulado, resultado este que mostrou-se particularmente útil para o

preenchimento de falhas na série de dados de deflúvio do Cerrado, a fim de auxiliar no fechamento do balanço hídrico anual.

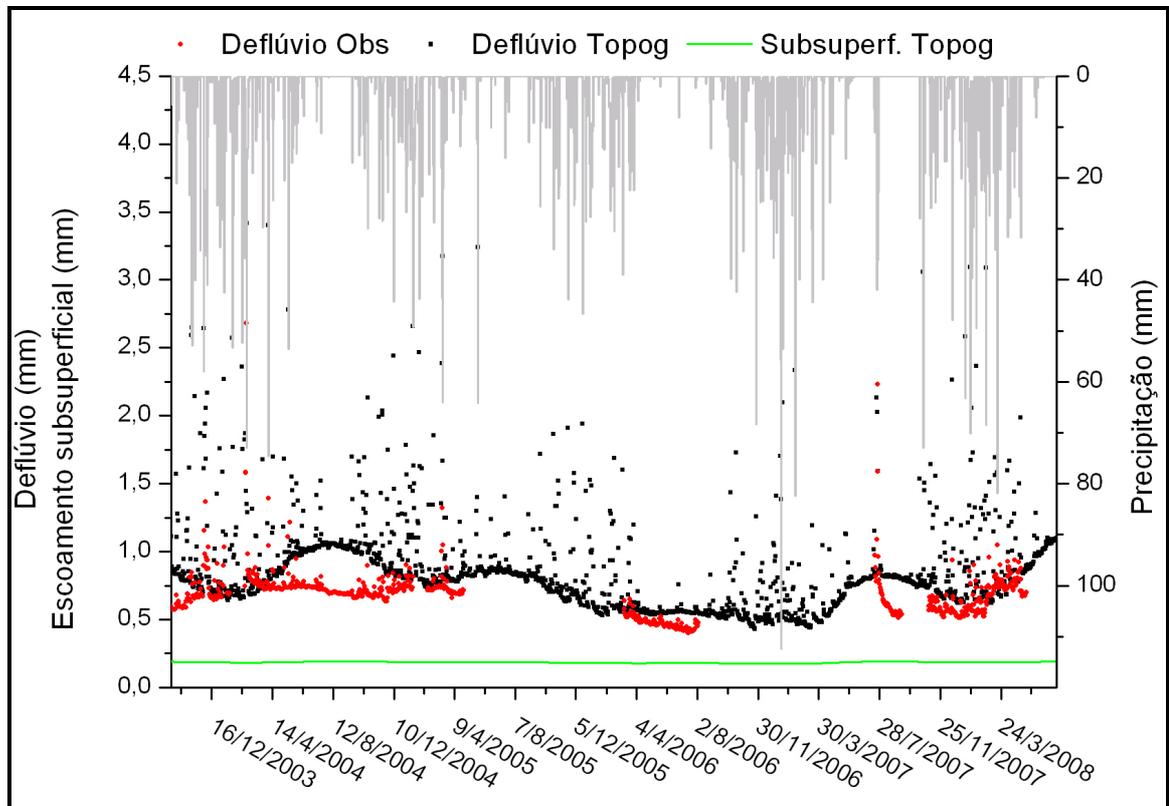


Figura 5.30. Precipitação (barras verticais) e Deflúvio (ambos em mm dia^{-1}) observado (pontos vermelhos) e simulado pelo modelo TOPOG (pontos pretos), e escoamento subsuperficial simulado (linha verde) para o período de 2003 a 2008, para a microbacia da Gleba Cerrado Pé-de-Gigante

5.7 Balanço hídrico

Os totais anuais de precipitação, evapotranspiração e deflúvio medidos nas microbacias de Cerrado e de Eucalipto são apresentados na Tabela 5.2. O número de eventos utilizados para o cálculo do balanço anual foi limitado inferiormente pela variável com o menor número de eventos dentre todas consideradas.

Tabela 5.2. Totais anuais (ano hidrológico de 01 de setembro a 31 de agosto do ano subsequente) das componentes precipitação, evapotranspiração e deflúvio, todas em mm, para o balanço hídrico das microbacias de Cerrado e de Eucalipto, de 2004 a 2009. (Valores em negrito indicam a microbacia de maior valor anual)

Ano	Precipitação	Cerrado		Eucalipto	
		Evapotranspiração	Deflúvio	Evapotranspiração	Deflúvio
2004-2005	1217	981	255	-- ⁺	273
2005-2006⁺⁺	725	820	178	982	222
2006-2007	1721	994	227	1333	195
2007-2008	1618	942	237	1301	144
2008-2009⁺⁺⁺	951	566	92	714	77

⁺ apenas 41 dias coletados devido a falhas na instrumentação.

⁺⁺ apenas 317 dias coletados devido a falhas na instrumentação.

⁺⁺⁺ apenas 194 dias devido a desativação do sítio experimental.

A comparação das médias anuais de evapotranspiração indicam maiores valores sobre o Eucalipto em todos os anos de avaliação (Tabela 5.2), o que está de acordo com a discussão anterior da variabilidade das médias diárias. Nos anos sem falhas (2006 a 2008), a diferença foi de ~350 mm ano⁻¹.

A comparação das médias anuais do deflúvio mostraram que este foi superior no Eucalipto no período de 2004 a 2006, e inferior nos demais anos. Nos anos sem falhas (2006 a 2008), a diferença variou de ~32 a 93 mm ano⁻¹ a mais no deflúvio do Cerrado.

O valor médio do Coeficiente de deflúvio (deflúvio/precipitação médios anuais) mostra médias superiores em ambas as bacias no período 2004 a 2006, em relação ao período posterior (2006 a 2009), o que pode ser explicado pela redução da chuva no período intermediário, e pela redução do deflúvio no período final. A comparação entre os dois locais mostrou médias superiores do coeficiente de deflúvio na bacia de Eucalipto no período de 2004 a 2006, e inferior de 2006 a 2009, respectivamente (Tabela 5.3).

A relação de evapotranspiração/precipitação média anual, nos anos sem falhas nos dados (2006 a 2008), mostra valores superiores no Eucalipto (0,77 a 0,80) em relação ao Cerrado (0,57 a 0,58).

Tabela 5.3. Balanço hídrico para a bacia da Fazenda Cara Preta, Santa Rita do Passa Quatro, SP, de 2004 a 2008. (Valores em negrito indicam a microbacia de maior valor anual). Falhas nos períodos conforme descrito na Tabela 5.2.

Ano	Precipitação	Coeficiente de deflúvio		Evapotranspiração/Precipitação	
		PEG	FCP	PEG	FCP
2004-2005	1217	0,21	0,22	0,81	--
2005-2006	725	0,24	0,31	1,13	1,35
2006-2007	1721	0,13	0,11	0,57	0,77
2007-2008	1618	0,15	0,09	0,58	0,80
2008-2009	951	0,10	0,08	0,59	0,75

A evapotranspiração média anual pelo balanço hídrico simplificado mostrou-se sempre superior à evapotranspiração medida diretamente (Tabela 5.4), nos anos sem falha de dados (2006 a 2008). As discrepâncias são maiores no Cerrado (de 438 a 500 mm) do que no Eucalipto (173 a 193 mm). O balanço hídrico simplificado supõe que em um ano hídrico não há variação significativa do armazenamento de água, e estima a evapotranspiração como resíduo da chuva e do deflúvio.

Tabela 5.4. Evapotranspiração média anual (em mm) estimada pelo balanço hídrico simplificado (Ebal) e medida diretamente (Eobs) nos sítios experimentais do Cerrado e do Eucalipto para os anos hidrológicos (de 01 de setembro a 31 de agosto do ano subsequente) de 2005-06 a 2008-09.

Ano	Cerrado			Eucalipto		
	Ebal	Eobs	Diferença	Ebal	Eobs	Diferença
2005-06	547	820	-273	503	982	-478
2006-07	1494	994	+500	1526	1333	+193
2007-08	1380	942	+438	1473	1301	+173
2008-09	855	566	+289	874	714	+160

Os valores do coeficiente de deflúvio estimados no Eucalipto após o 2º ano de plantio foram comparáveis com valores estimados por Mosca (2003) na plantação de eucalipto em estágio avançado em Bofete, SP (Tabela 5.5). Os valores do coeficiente de deflúvio estimados no Cerrado variaram entre 0,1 a 0,24, superiores aos da floresta tropical, e mais comparáveis com os da pastagens ou plantações de pinus, respectivamente.

Tabela 5.5. Valores da Relação Deflúvio/Precipitação, área da bacia (em km²), tipo da cobertura vegetal e localização da bacia hidrográfica, e autor do estudo.

Relação Deflúvio/Precipitação	Área da bacia (km ²)	Cobertura vegetal	Localização	Autor
0,08		Eucalyptus grandis	Bofete, SP	Mosca, 2003
0,09				
0,20		Pastagem		
0,26				
0,26	10	Pastagem	Paragominas, PA	Schuler, 2003
0,02		Floresta tropical		
0,09	0,7	Pinus, antes corte	Paraná	Lima, 2006
0,22		Pinus, pós corte		
0,22		Pinus, + 2 anos pós corte		
0,10 a 0,24	13	Cerrado	Santa Rita do Passa Quatro, SP	Este estudo
0,08	4	Eucalipto (após 2º ano)		

5.8 Medidas do nível do aquífero

A variação dos níveis d'água nos poços FCP1, FCP2, PDG2 e PDG3 (Figura 5.31) indica que no poço FCP1 há uma clara influência de recarga por pluviometria, como ocorre

no final de 2006 até início de 2007, influência essa pouco provável nos outros poços, pelo menos durante o período das medições. Uma possível explicação para esse padrão é o fato de que o poço FCP1 possui o nível estático mais raso dentre os outros poços (ao redor de 28m), contra 41m, 70m e 89m para FCP2, PDG2 e PDG3, respectivamente. Para que haja uma variação de nível relacionada à recarga pluviométrica, é necessário a princípio que a carga de chuva infiltrada seja transmitida através da zona não-saturada, fazendo com que a umidade acima do nível d'água efetivamente atinja a zona saturada.

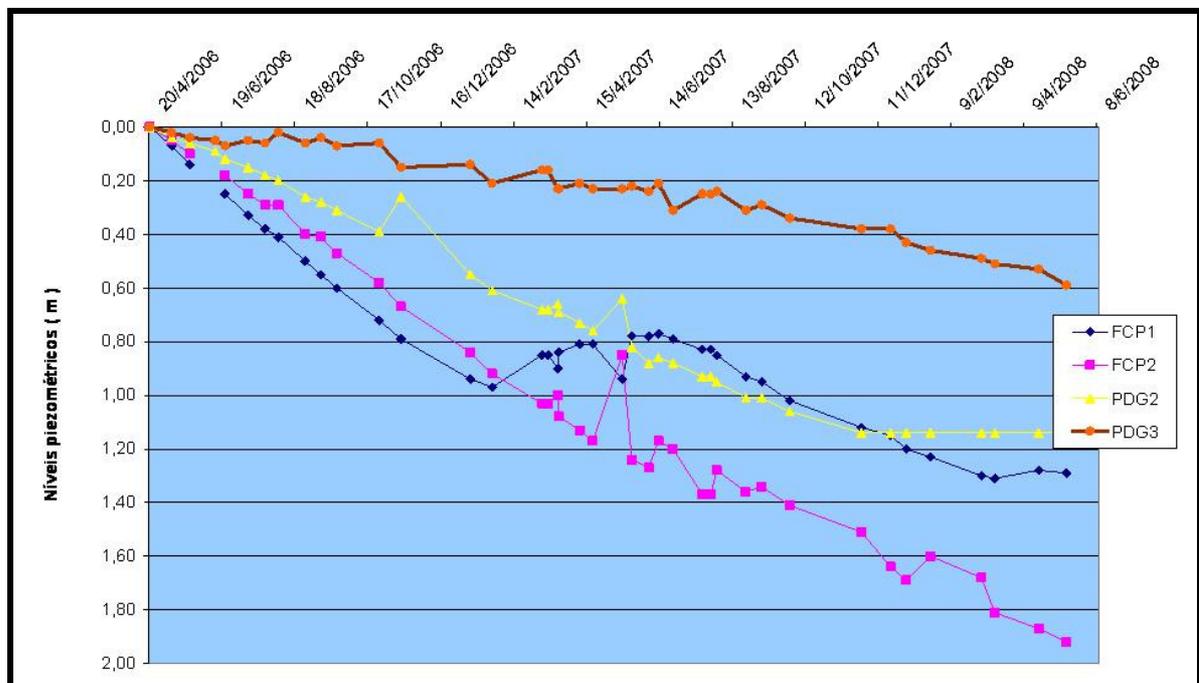


Figura 5.31. Variação do nível (em metros) nos poços piezométricos na área experimental, no período de Abril de 2006 a Junho de 2008, em relação ao nível inicial medido.

Quanto mais fundo está posicionado o nível estático, maiores as chances de ocorrência de heterogeneidades na zona não-saturada, e assim, em poços mais profundos, como o FCP2, PDG2 e PDG3, essas variações são atenuadas a ponto de serem imperceptíveis. Outro fator a se considerar é a magnitude do fluxo regional horizontal em comparação com o fluxo vertical das áreas dos poços de monitoramento. Os poços FCP2, PDG2 e PDG3 estão localizados em áreas com elevado gradiente hidráulico, que apresentam portanto alta velocidade de fluxo horizontal, o que faz com que a recarga não interfira de maneira perceptível na carga

hidráulica desses poços. Os ensaios das Sondagens Elétricas Verticais realizadas atestam a inexistência, em grande parte da Bacia, da conectividade destas com o escoamento subsuperficial, decorrente das grandes profundidades do NA, ou seja, próximo da calha do rio a superfície do lençol está próximo da cota do rio e parte da água infiltrada é capturada pelo rio, enquanto nas porções mais distantes a água infiltrada não atinge o canal (Dr. H. K. Chang/IGCE/Unesp – com. pessoal).

6 CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho mostraram a comparação do balanço de água e calor sobre duas microbacias de Cerrado e Eucalipto, e indicaram que a evapotranspiração média anual é predominantemente superior no Eucalipto em relação ao Cerrado. Essa dominância se estabelece principalmente durante a estação chuvosa, e a partir do 2º ano de plantio do Eucalipto. Durante o 1º ano de plantio de Eucalipto, a comparação foi inversa, ou seja, neste período a evapotranspiração foi comparável entre os dois locais. A maior evapotranspiração do Eucalipto também corrobora a comparação da temperatura do ar máxima diária mais fria naquele local do que sobre o Cerrado, em função do favorecimento da partição de energia na evaporação da água.

A comparação das médias anuais do deflúvio mostraram que há redução do deflúvio no Eucalipto após o 2º ano de plantio, em relação ao Cerrado. As duas microbacias foram monitoradas em um período de tempo de variabilidade climática interanual com redução da chuva, sem recuperação notável do deflúvio médio em ambas, mas o impacto foi maior na bacia de Eucalipto, que teve uma redução percentual de -150%, contra -75% no Cerrado. O controle da vegetação do Eucalipto, ao reduzir as variáveis como o deflúvio, o coeficiente do deflúvio, e o aumento da evapotranspiração, e o aumento da relação evapotranspiração/precipitação, em relação ao Cerrado, sugerem que há uma expressiva e significativa diferença entre os dois ecossistemas.

A variabilidade do nível do aquífero monitorado indicou que o balanço de água na superfície não está exatamente fechado devido à incerteza da recarga da água subterrânea, que por sua vez provavelmente ocorre em uma escala espacial maior do que a microbacia de superfície. Ou seja, há incertezas indicando que o balanço de água formado apenas pelos

termos de Precipitação, Evaporação e e Umidade do Solo na zona radicular são insuficientes para responder pela completa variância do Deflúvio.

SUGESTÕES DE PRÓXIMOS TRABALHOS

Estudos de balanço hídrico devem considerar a água subterrânea. Estudos de pequenas bacias, se essas não estiverem com a área de captação na superfície próximas da área da bacia hidrogeológica, podem incorrer em erros.

O modelo hidrológico deverá ser aperfeiçoado para reproduzir mais fielmente os pulsos hidrológicos nos eventos de chuva.

Os resultados aqui apresentados apontam para a necessidade de, sempre que possível, efetuar estudos de impacto de mudança do uso da terra com pelo menos a precipitação, o deflúvio, a evapotranspiração e a dinâmica da umidade do solo na zona radicular medidos *in situ*, evitando-se assim análises baseadas apenas na equação de balanço hídrico simplificado. É desejável ainda, ter-se estimativas do fluxo de recarga subterrânea, a fim de melhorar o fechamento do balanço hídrico na microbacia.

Para um estudo mais completo, sugere-se também o monitoramento dos processos fisiológicos (balanço de carbono) da vegetação predominante na bacia, por medidas diretas e com o auxílio de modelos solo-vegetação-atmosfera (SiB2) acoplados a modelos hidrológicos.

7 REFERÊNCIAS*

- BONAN, G. *Ecological Climatology*. Cambridge University Press, 690p. 2002.
- BRASIL, 2002. Agenda 21 Brasileira: Resultado da Consulta Nacional por Maria do C. de L. Bezerra, Márcia M. Facchina e Otto Ribas. Brasília. MMA/PNUD. Documento eletrônico disponível em <http://www.mma.gov.br>. Acessado em 21/11/2004.
- BRASIL, 2004a. Programa Nacional de Conservação e Uso Sustentável do Bioma Cerrado – Programa Cerrado Sustentável. Grupo de Trabalho do Bioma Cerrado. Documento eletrônico disponível em <http://www.mma.gov.br/port/sbf/consulta.html>. Acessado em 21/11/2004.
- BRASIL, 2004b. Programa Nacional de Florestas. MMA/SBF/IBAMA. Documento eletrônico disponível em <http://www.mma.gov.br/port/sbf/pnf/>. Acessado em 21/11/2004.
- BRISTOW, K.L. e CAMPBELL, G.S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature, *Agriculture and Forest Meteorology*, 31, 159-166, 1984.
- BROADBRIDGE, P. e WHITE, I. Constant rate rainfall infiltration: a versatile nonlinear model 1. Analytic solution. *Water Resource Research*, 24, 145-154, 1988.
- BRUNO, R.D. Variabilidade observada da umidade do solo em Floresta Tropical e Cerrado. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). IAG/USP, São Paulo, 2004.
- COOPER, M.; RUGGIERO, P.G.C.; SPAROVEK, G.; e PIRES NETO, A.G. Caracterização física do Cerrado Pé-de-Gigante e uso das terras na região: 5. Solos da gleba Cerrado Pé-de-Gigante. In: *O Cerrado Pé-de-Gigante: ecologia e conservação – Parque Estadual de Vassununga*. Vânia Regina Pivello e Elenice Mouro Varanda (orgs.). São Paulo: SMA, 2005
- CSIRO. 2000. TOPOG: User Guide. Disponível em <http://www.clw.csiro.au/topog/user/user.html>. Acessado em 17/11/2000
- DAWES, W.R. e HATTON, T.J. TOPOG_IRM: 1. Model description. Technical memorandum 93/5. CSIRO Division of Water Research. 1993.
- DAWES, W. R.; ZHANG, L.; HATTON, T. J.; REECE, P. H. ; BEALE, G. T. H.; PACKER, I. Evaluation of a distributed parameter ecohydrological model (TOPOG_IRM) on a small cropping rotation catchment. *Journal of Hydrology*, Camberra, v. 191, p. 64-86, 1997.
- GRACE, J., J. LLOYD, J. MCINTYRE, MIRANDA, A.C., P. MEIR, H.S. MIRANDA, J. B. MONCRIEFF, J.B. MASSHEDER, I. WRIGHT, AND J. GASH. Carbon dioxide uptake by

* De acordo com:

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS. Grupo DiTeses. Diretrizes para apresentação de dissertações e teses da USP: documento eletrônico e impresso. São Paulo, 2004.

um undisturbed tropical rainforest in south west Amazonia 1992-1993. *Science*, vol. 270, 778-780. , 1996

HODNETT, M.G.; SILVA, L.P. DA; ROCHA, H.R. DA; & SENNA, R.C. Seasonal soil water changes beneath central Amazonian rainforest and pasture. *J. of Hydrology*, vol. 170, p. 233-254, 1995.

HOFFMAN, W.A. e JACKSON, R.B. Vegetation-climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. *Journal of Climate*, 13, p. 1593-1602. 2000.

HORNBERGER, G.M.; RAFFENSPERGER, J.P.; WIBERG, P.L. e ESHLEMAN, K.N. Elements of physical hydrology. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1998.

HUTCHINSON, M.F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of pits. *Journal of Hydrology*, 106, 211-232, 1988.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). *Climate Change. Radiative forcing of Climate Change and An evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. 1994

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change): *Synthesis report*. Watson, R.T. and the core writing (Eds). IPCC, Geneva, Switzerland, pp 184. 2001.

KLINK, C.A.; MIRANDA, H.S.; GONZALES, M.I. & VICENTINI, K.R.F. Documento disponível no endereço eletrônico: http://www.icb.ufmg.br/~peld/port_site03.pdf. Acesso em 25/09/2004. 2004.

KRONKA, F.J.N.; JOLY, C. B.; & COUTO, H. T. Z. Inventário florestal das áreas reflorestadas do Estado de São Paulo. *Revista do Instituto Florestal*. vol. 1, p. 1-184. 2002.

LIMA, W.P. E M. J. ZAKIA *Hidrologia de Matas Ciliares*. Piracicaba, SP. Disponível em <http://www.ipef.br/>. Acesso em 01 de outubro de 2004.

LIMA, W. DE P. Efeitos hidrológicos do Manejo de Florestas Plantadas. In: *As florestas Plantadas e a água: Implementando o conceito da microbacia hidrográfica como unidade de planejamento*. Walter de Paula Lima e Maria José Brito Zakia (orgs.). Rima Editora, São Carlos. 2006.

MARTINS, C. A. Estimativa da evapotranspiração regional no estado de São Paulo com o modelo SiB2. *Dissertação de Mestrado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (em prep.)*.

MIRANDA, A.C., H.S. MIRANDA, J. LLOYD, J. GRACE, J.A. MCINTYRE, P. MEIR, P. RIGGAN, R. LOCKWOOD, J. BRASS, Carbon dioxide fluxes over a Cerrado Sensu Stricto in central Brazil. in *Amazon Deforestation and Climate*, eds. J.C.H. Gash, C.A. Nobre, J.M. Roberts and R. Victória. John Wiley & Sons, Chichester, UK, p. 353-364. 1996.

MOSCA, A.A.O. Caracterização hidrológica de duas microbacias visando identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas. Piracicaba. *Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo*. Piracicaba. 120 p. 2003.

NEGRÓN-JUÁREZ, R.I. Variabilidade climática regional e controle da vegetação no sudeste: um estudo de observações sobre cerrado e cana-de-açúcar e modelagem numérica da atmosfera. Tese (Doutorado). IAG. 2004.

PIRES NETO, A.G.; ROCHA, H.R. da; COOPER, M.; e SHIDA, C.N. Caracterização física do Cerrado Pé-de-Gigante e uso das terras na região. 1. Fisiografia da Região. In: O Cerrado Pé-de-Gigante: ecologia e conservação – Parque Estadual de Vassununga. Vânia Regina Pivello e Elenice Mouro Varanda (orgs.). São Paulo: SMA, 2005

PIVELLO, V.R.; BITTENCOURT, M.D.; MANTOVANI, W.; MESQUITA JUNIOR, N. de; BATALHA, M.A.; e SHIDA, C.N. Proposta de zoneamento ecológico para a Reserva de Cerrado Pé-de-Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP). Brazilian Journal of Ecology, vol. 02, n. 2, Rio Claro, 1998.

PIVELLO, V. R. e VARANDA, E.M. O Cerrado Pé-de-Gigante: ecologia e conservação - Parque Estadual de Vassununga. São Paulo: SMA, 2005.

PONCE, M.V. Engineering Hydrology: principles and practices. Prentice-Hall, New Jersey, 1989.

ROCHA, H.R. da; FREITAS, H.C. de; ROSOLEN, R.; NEGRÓN-JUÁREZ, R.I.; TANNUS, R.N.; LIGO, M.A.; CABRAL, O.M.R.; e SILVA DIAS, M.A.F. Measurements of CO₂ exchange over a woodland savanna (Cerrado *Sensu stricto*) in southeast Brasil. Biota Neotropica, vol. 2, n. 1, pp. 1-11. Disponível em: <http://www.biotaneotropica.org.br/v2n1/pt/abstract?article+BN01702012002>. Acessado em maio de 2003.

ROCHA, H.R. DA; GOULDEN, M.L.; MILLAR, S.D.; MENTON, M.C.; PINTO, L.D.V.O.; FREITAS, H.C. DE; & FIGUEIRA, A.M. E S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. Ecological Applications, vol. 14(4). p. S22-S32. 2004.

ROCHA, H.R. da; FREITAS, H.C. de; ROSOLEM, R.; TANNUS, R.N.; NEGRÓN-JUÁREZ, R.I.; LIGO, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MESQUITA JR., H.N. de; BITENCOURT, M.D. Caracterização física do Cerrado Pé-de-Gigante e uso das terras na região: 4. Ciclo Hidrológico e microclima.

RODRIGUEZ-ITURBE, I. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. Water Resources Research, vol. 36(1), pp. 3-9. 2000.

RUGGIERO, P.G.C.; BATALHA, M.A.; PIVELLO, V.R.; e MEIRELLES, S.T. Soil-vegetation relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. Plant Ecology, 160, pp 1-60, 2002.

RUGGIERO, P.G.C. Levantamento pedológico relacionado às fisionomias encontradas na Gleba Pé-de-Gigante, Parque Estadual de Vassununga, Santa Rita do Passa Quatro, SP. Dissertação (Mestrado) São Paulo, 2000.

RUNNING, S.W.; NEMANI, R.R.; e HUNGERFORD, R.D. Extrapolation of synoptic meteorological data in mountains terrain, and its use for simulating forest evapotranspiration and photosynthesis. *Journal of Forest Research*, 17, 472-483, 1987.

SELLERS, P.J., D.RANDALL, C.COLLATZ, J.BERRY, C.FIELD, D.DALZICH, C. ZHANG, G.COLLELO. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part I: Model formulation. *J. Climate*, 9, 676-705. 1996.

SCHULER, A.E. Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará. Tese (Doutorado em Ciências). CENA/USP, Piracicaba. 2003.

TATSCH, J. D.. Uma análise dos fluxos de superfície e microclima sobre Cerrado, Cana-de-açúcar e Eucalipto em São Paulo, com implicações para mudanças climáticas regionais. Dissertação de mestrado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

VOURLITIS, G., N.FILHO, M..HAYASHI, J.NOUEIRA,F.CASEIRO & J.CAMPELO JR., Seasonal variations in the net ecosystem CO₂ exchange of a mature amazonian transitional tropical forest (Cerradão). *Functional ecology*, vol. 15, p. 338-395. 2001

ZAMPROGNO, C.F. Caracterização Hidrogeológica da Gleba Pé de Gigante – Parque Estadual de Vassununga, Município de Santa Rita do Passa Quatro, SP. 62 f. (Trabalho de Conclusão de Curso) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas/Unesp – Rio Claro, Dezembro de 2005.

ANEXOS

ANEXO A – Curva chave das Microbacias experimentais

A curva-chave do vertedor do córrego Paulicéia é a seguinte:

$$Q = 3,5 \times (h^{2,5} - p_1^{2,5}) + 1,95 \times p_1^{1,5} + 1,87 \times p_2^{1,5}$$

onde $p_1 = h - 0,3$, $h \geq 0,3$ e $p_2 = h - 0,094$, $h \geq 0,094$

A curva-chave do vertedor do córrego da Fazenda cara Preta é a seguinte:

$$Q = 1,37 \times (h^{2,5} - p_1^{2,5}) + 6,15 \times p_2^{1,5}$$

onde $p_1 = h - 0,3$, $h \geq 0,3$ e $p_2 = h - 0,465$, $h \geq 0,465$

ANEXO B - Mapa Topográfico da Gleba Cerrado Pé-de-Gigante.

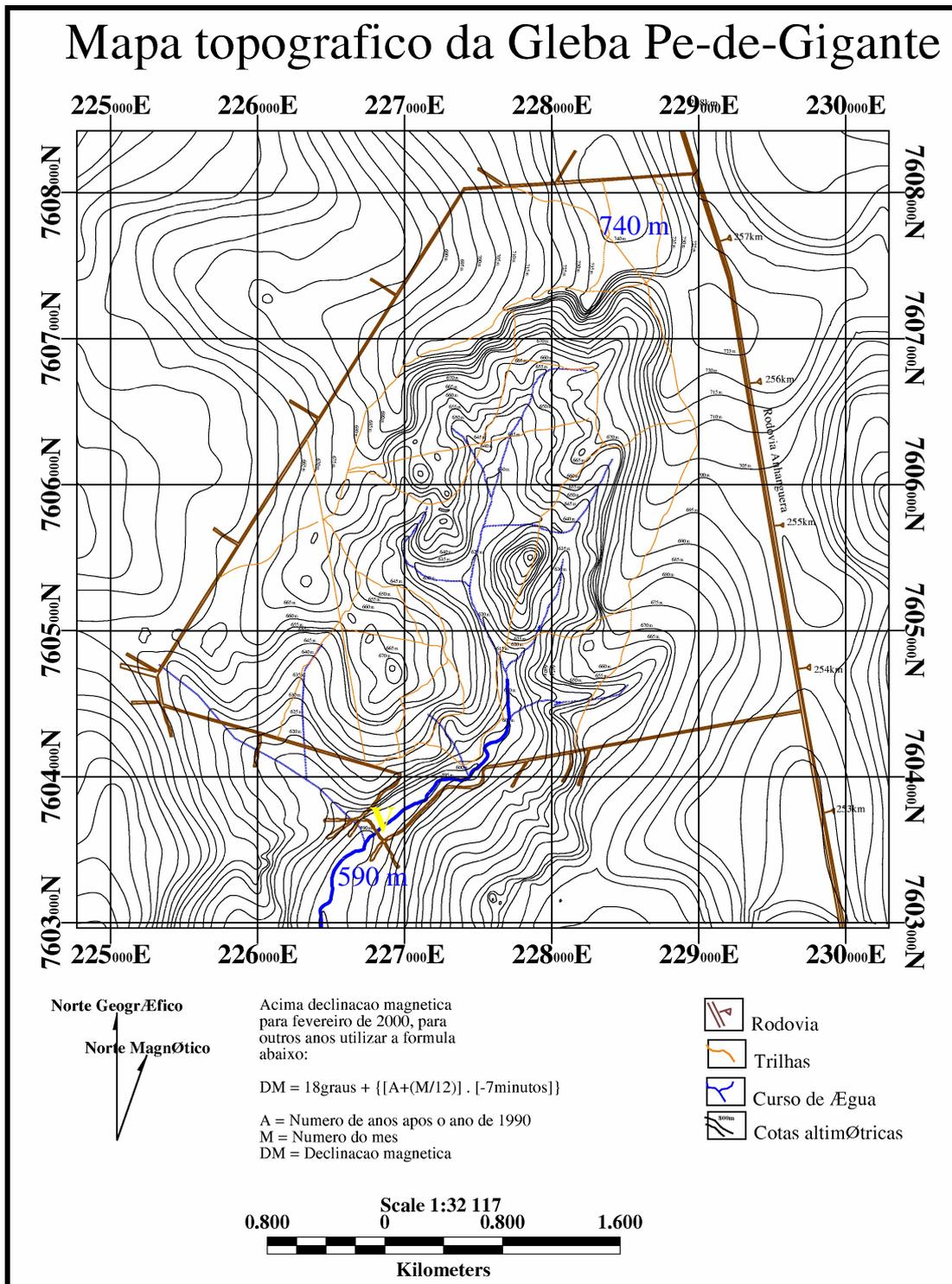


Figura B1. Mapa topográfico da microbacia da Gleba Pé-de-Gigante, com as cotas altimétricas de 5 m em 5 m. Destaque para as cotas de 590 m e 740 m em letras azuis e para a localização do vertedor no córrego Paulicéia (V em verde).

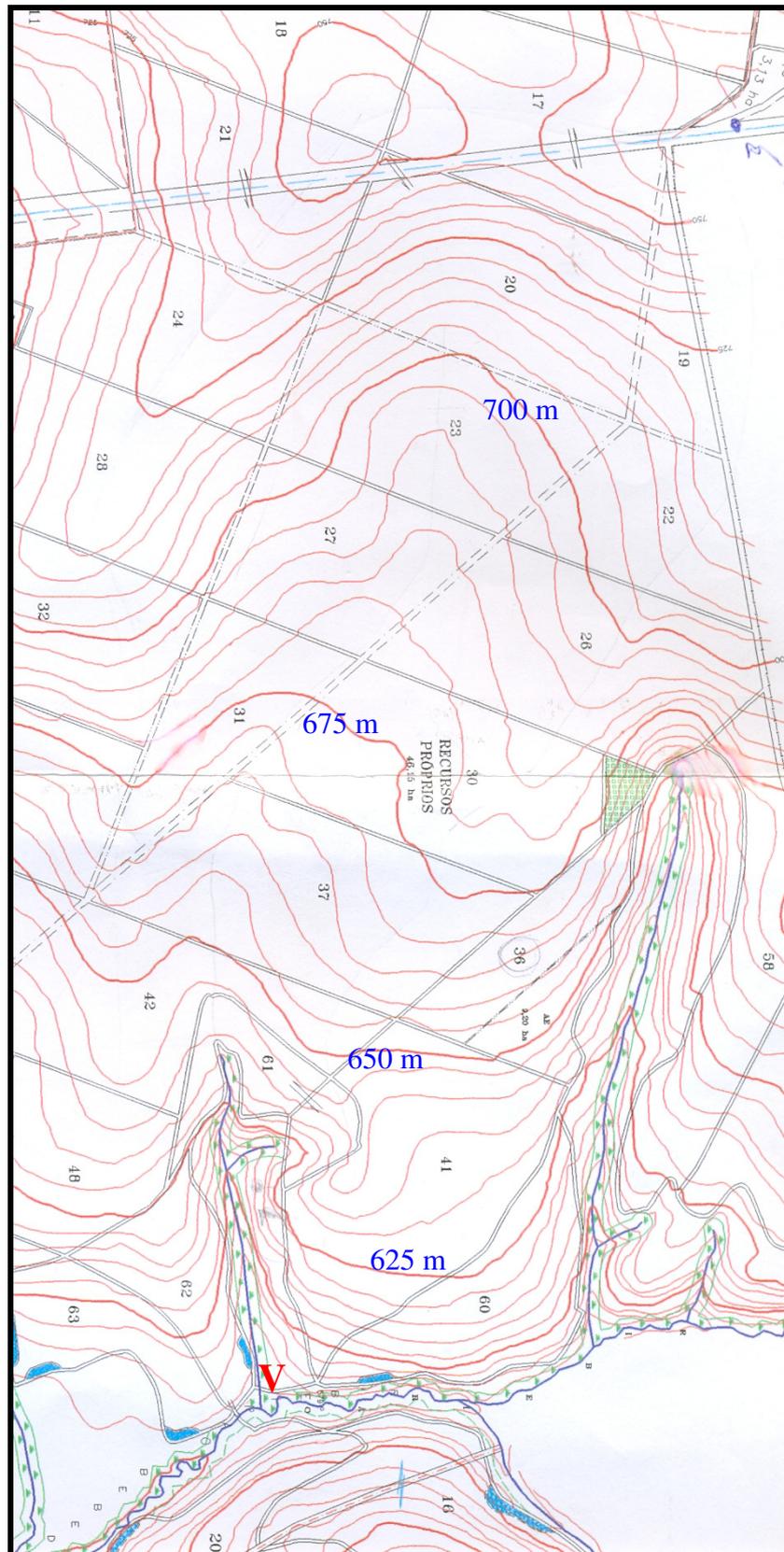
ANEXO C - Mapa Topográfico da Fazenda Cara Preta.

Figura C1. Mapa topográfico da microbacia do córrego da Fazenda Cara Preta, com as cotas altimétricas de 5 m em 5 m. Destaque para as cotas de 590 m e 740 m em letras azuis e para a localização do vertedor no córrego Paulicéia (V em vermelho).

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)