

LÍVIA CRISTINA PINTO DIAS

**EFEITO DA MUDANÇA NA COBERTURA VEGETAL NA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO E VAZÃO DE MICROBACIAS NA REGIÃO DO  
ALTO XINGU**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA

MINAS GERAIS – BRASIL

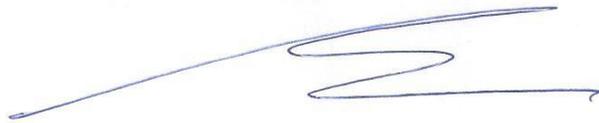
2013

LÍVIA CRISTINA PINTO DIAS

**EFEITO DA MUDANÇA NA COBERTURA VEGETAL NA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO E VAZÃO DE MICROBACIAS NA REGIÃO DO  
ALTO XINGU**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de julho de 2013



Santiago Vianna Cuadra



Fernando Falco Pruski



Marcos Heil Costa  
(Orientador)

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV

T

D541e  
2013

Dias, Livia Cristina Pinto, 1988-

Efeito da mudança na cobertura vegetal na  
evapotranspiração e vazão de microbacias na região do Alto  
Xingu / Livia Cristina Pinto Dias. – Viçosa, MG, 2013.

xxi, 80f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Marcos Heil Costa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.63-77.

1. Climatologia agrícola - Modelos matemáticos. 2. Xingu,  
Rio, Bacia (PA e MT). 3. Solo - Uso. 4. Evapotranspiração.  
5. Modelos matemáticos. 6. Mudanças climáticas. 7. Cobertura  
morta (Agricultura). I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 630.2515

Aos meus pais João Antônio Dias e  
Maria Aparecida Pinto Dias.  
A minha irmã Luísa Raquel Pinto Dias.

*“A fé não entra em conflito com a ciência, mas coopera com ela, oferecendo critérios básicos para que ela promova o bem de todos (...): Se a ciência é uma aliada valiosa para a compreensão do plano de Deus no universo, a fé permite que o progresso científico aconteça sempre em prol do bem e da verdade do homem, permanecendo fiel a esse mesmo plano.”*

*Papa Bento XVI*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que me orienta sempre e me ama incondicionalmente.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de me desenvolver como profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Marcos Heil Costa, por toda paciência em me conduzir durante esse trabalho, pela confiança em mim depositada e por ser meu exemplo de dedicação à docência e à pesquisa.

Aos colegas – Carla, Patrícia, Gabrielle, Francisca, Leydimere, Fabiana, Ana Beatriz, Emily, Victor e Matheus – que sempre torceram pelo sucesso do meu trabalho e com quem nesse período tomei muitos cafés na sala 331B enquanto trocávamos experiências.

A querida amiga Letícia Braidá, pela amizade, pelo carinho e por todos os momentos de partilha.

A Professora Hewlley, por me transmitir sua experiência com os modelos de superfície e por sempre se preocupar com o andamento da minha pesquisa.

Ao Raphael Pousa de Souza, pela disponibilidade em me auxiliar nos momentos de dúvida com o modelo agrícola.

Ao Aníbal da Fonseca Santiago, meu amigo e companheiro, por todas as sugestões e revisões de texto, por todos os debates científicos sempre muito produtivos e por me dar força e coragem nos momentos de dificuldade.

A Mônica Weber Tavares, Gláucio Araújo e demais colegas pós-graduandos, por todos os momentos de estudo e confraternização.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho.

## **BIOGRAFIA**

LÍVIA CRISTINA PINTO DIAS, filha de João Antônio Dias e Maria Aparecida Pinto Dias, nasceu em 11 de junho de 1988, na cidade de Santo Antônio do Monte – MG.

Iniciou a graduação em Engenharia Ambiental em maio de 2006, obtendo o título de Engenheira Ambiental em julho de 2011 pela Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em agosto de 2011 iniciou o curso de pós-graduação, nível mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

## SUMÁRIO

|  |       |
|--|-------|
| LISTA DE FIGURAS .....   | ix    |
| LISTA DE TABELAS .....   | xi    |
| LISTA DE SIMBOLOS .....  | xiii  |
| LISTA DE ABREVIATURAS .....  | xvi   |
| RESUMO .....   | xviii |
| ABSTRACT .....   | xx    |
| 1. INTRODUÇÃO .....  | 1     |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                       | 4     |
| 2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS BIOMAS FLORESTA AMAZÔNICA E<br>CERRADO ..... | 4     |
| 2.1.1. Floresta Amazônica .....                                      | 4     |
| 2.1.2. Cerrado .....   | 6     |
| 2.2. HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO DA AMAZÔNIA E DO CERRADO.....             | 8     |
| 2.3. MUDANÇAS NA COBERTURA VEGETAL E OS RECURSOS HÍDRICOS<br>11      |       |
| 2.4. UTILIZAÇÃO DE MODELOS NOS ESTUDOS DO CICLO<br>HIDROLÓGICO ..... | 14    |
| 3. METODOLOGIA .....   | 17    |
| 3.1. DESCRIÇÃO DA FAZENDA TANGURO .....                              | 17    |
| 3.2. DESCRIÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS .....                        | 18    |
| 3.2.1. Preenchimento de falhas dos dados.....                        | 19    |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.3.   | DESCRIÇÃO DAS MICROBACIAS E DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS   | 22 |
| 3.4.   | DESCRIÇÃO DOS MODELOS .....  | 24 |
| 3.5.   | DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO NUMÉRICO .....  | 27 |
| 3.5.1. | Condições de contorno .....  | 28 |
| 3.5.2. | Características hidráulicas do solo .....  | 30 |
| 3.6.   | VALIDAÇÃO DOS MODELOS .....  | 33 |
| 3.6.1. | Análise da influência do dia de inicialização .....  | 33 |
| 3.7.   | ANÁLISE DO EFEITO DA MUDANÇA NO USO DO SOLO NA<br>EVAPOTRANSPIRAÇÃO E VAZÃO.....                       | 34 |
| 3.8.   | ANÁLISE ESTATÍSTICA.....   | 35 |
| 3.9.   | INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO NO EFEITO DA MUDANÇA NA<br>COBERTURA VEGETAL .....                       | 36 |
| 4.     | RESULTADOS E DISCUSSÃO.....  | 37 |
| 4.1.   | ANÁLISE DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS .....   | 37 |
| 4.2.   | ESCOLHA DO MELHOR CONJUNTO DE PARÂMETROS<br>HIDRÁULICOS DO SOLO .....                                  | 39 |
| 4.3.   | VALIDAÇÃO DOS MODELOS .....  | 43 |
| 4.3.1. | Influência do dia de inicialização.....  | 44 |
| 4.4.   | EFEITOS DA MUDANÇA NO USO DO SOLO NA VAZÃO E<br>EVAPOTRANSPIRAÇÃO .....                                | 46 |
| 4.5.   | ANÁLISE ESTATÍSTICA E INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO NO<br>EFEITO DA MUDANÇA NA COBERTURA VEGETAL ..... | 54 |
| 5.     | RESUMO E CONCLUSÕES .....  | 60 |
| 6.     | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 63 |
|        | ANEXO A.....   | 78 |

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Localização dos estudos revisados nos biomas Amazônia e Cerrado. **1.** *Elsenbeer e Vertessy (2000)*; **2.** *Waterloo et al. (2006)*; **3.** *Tomassela et al. (2008)*; **4.** *Bruno et al. (2006)*; **5.** *Chaves et al. (2008)*, *Germer et al. (2009)*; **6.** *Johnson et al. (2006)*; **7.** *Pongratz et al. (2006)*; **8.** *Hayhoe et al. (2011)*; **9.** *Wickel et al. (2008)*; **10.** *Moraes et al. (2006)*; **11.** *Costa et al. (2003)*; **12.** *Coe et al.(2011)*; **13.** *Oliveira et al. (2005)*. ..... 12
- Figura 2: Localização Fazenda Tanguro e da estação meteorológica automática (EMA). ..... 18
- Figura 3 Disponibilidade de dados da EMA da Fazenda Tanguro para os períodos de 01 de janeiro de 2007 a 31 de dezembro de 2010, sendo RH, umidade relativa do ar;  $S_{in}$ , radiação solar incidente; P, precipitação;  $T_{med}$ , temperatura média do ar; e V, velocidade média do vento. Para melhor visualização, os dados foram agrupados em dados diários e caso houvesse uma hora ou mais de dados faltantes todo o dia é mostrado na figura como faltante. .... 19
- Figura 4: Exemplo de período preenchido com a metodologia de Senna (2004). Entre 7 e 13 de fevereiro 2009 houve preenchimento das falhas (vermelho).....21
- Figura 5: Localização das estações meteorológicas automáticas (triângulos) na Fazenda Tanguro e nas cidades de Gaúcha do Norte, Querência e Água Boa.....22
- Figura 6: Localização das microbacias na Fazenda Tanguro com coberturas de floresta tropical e soja. Soja 1 define as microbacias de primeira ordem e Soja 2 define a bacia de segunda ordem.....24

|   |    |
|---|----|
| Figura 7: Triângulo de grupamento textural de solos (Lemos e Santos, 1984) .....  | 35 |
| Figura 8: Balanço hídrico simulado com diferentes características hidráulicas dos solos. Simulações utilizando A) todos os parâmetros de solo calculados utilizando as equações de CCH B) a $K_s$ medida em campo por Scheffler et al. (2011) e demais parâmetros calculados utilizando as equações de CCH; C) todos os parâmetros de acordo com o banco de dados de Campbell e Norman (1998); e D) a $K_s$ medida em campo por Scheffler et al. (2011) e demais parâmetros de acordo com Campbell e Norman (1998). ..... | 40 |
| Figura 9: Escoamentos totais médios observados nas diferentes microbacias ( $R_{obs}$ ), média de $R_{obs}$ ( $\mathbf{R}$ ) e escoamentos totais médios simulados para cada cobertura ( $R_s$ ) com as quatro diferentes condições de características hidráulicas do solo argilo-arenoso. Os índices minúsculos ao lado dos símbolos são referências às microbacias com cobertura de Floresta e Soja (Figura 6) e os índices maiúsculos, as simulações com diferentes conjuntos de parâmetros hidráulicos. ....          | 42 |
| Figura 10: Escoamentos totais médios entre setembro de 2008 e agosto de 2010. A parte superior do retângulo representa o valor da microbacia com maior escoamento total observado, a parte inferior, o valor da microbacia com menor escoamento total observado e o traço representa a média de todos os valores observados nas microbacias. Os escoamentos totais foram simulados (círculos) nos modelos InLand e AgroIBIS para Floresta, Cerrado, Soja e Pastagem. ....   | 43 |
| Figura 11: Particionamento da precipitação em evapotranspiração, escoamento total (vazão) e mudança no armazenamento de água do solo ( $ds/dt$ ). Valores negativos de $ds/dt$ indicam que a umidade do solo diminuiu no período analisado em relação a umidade inicial do solo. ....   | 47 |
| Figura 12: Particionamento da precipitação em evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e mudança no armazenamento de água no solo ( $ds/dt$ ). Valores negativos de $ds/dt$ significam que a umidade do solo diminuiu no período analisado. ....   | 48 |
| Figura 13: Particionamento da vazão medida em escoamento superficial direto e escoamento subterrâneo utilizando o SepHidro, em $mm\ mês^{-1}$ , no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2010, sendo a) Soja 1a; b) Soja 1b; c) Soja 1c; d) Soja 1d; e) Soja 2; f) Floresta a; g) Floresta b; e h) Floresta c. ....  | 52 |
| Figura 14: Variabilidade do escoamento total médio em onze diferentes classes texturais de solos. O losango representa a média de todas as simulações. ....   | 57 |
| Figura 15: Análise de sensibilidade do escoamento total médio ( $mm\ ano^{-1}$ ) à $K_s$ ( $m\ s^{-1}$ ) nas coberturas de floresta e cerrado. O eixo de $K_s$ está em unidades logarítmicas. ....  | 59 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Localização das estações fluviométricas (coordenadas em graus, minutos e segundos), tipo de vegetação atual e área (em km <sup>2</sup> ) das microbacias em análise. Soja 1 define as microbacias de primeira ordem e Soja 2 define a bacia de segunda ordem ....                             | 24 |
| Tabela 2: Parâmetros de vegetação e dossel utilizados nas simulações com cobertura vegetal de floresta, cerrado e pastagem, no modelo InLand, e soja, no modelo AgroIBIS .....  | 28 |
| Tabela 3: Parâmetros hidráulicas do solo argilo-arenoso utilizadas nas simulações A, B, C e D .....   | 32 |
| Tabela 4: Escoamento total médio observado ( $R_{obs}$ ) em mm ano <sup>-1</sup> , coeficiente de escoamento (C) e área de cinco bacias com cobertura de soja e três com cobertura de floresta na Fazenda Tanguro. Soja 1 são as microbacias de primeira ordem; Soja 2 é a bacia de segunda ordem ..... | 37 |
| Tabela 5: Resultados do escoamento total médio (mm ano <sup>-1</sup> ) das simulações iniciando em 1º de janeiro de 2007 ( $R_1$ ) e em 22 de fevereiro de 2008 ( $R_2$ ).....  | 44 |
| Tabela 6: Médias dos resultados das simulações entre setembro de 2008 e agosto de 2010 para evapotranspiração e escoamento total, em mm ano <sup>-1</sup> .....   | 47 |
| Tabela 7: Escoamento superficial e escoamento subterrâneo médios para o período de janeiro de 2009 a dezembro de 2010 obtido pelo método dos mínimos locais no SepHidro, em mm ano <sup>-1</sup> .....  | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Tabela 8: Classes de solo e suas propriedades. Todas as propriedades apresentadas foram calculadas com as equações de Cosby et al. (1984) e Clapp e Hornberger (1978) .....        | 55 |
| Tabela 9: Escoamentos totais médios simulados ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) com 11 diferentes classes texturais de solos para as coberturas de floresta, cerrado, pastagem e soja ..... | 55 |
| Tabela 10: Análise de variância (ANOVA) do escoamento total médio simulado tendo as coberturas como tratamentos e 11 diferentes classes texturais de solos como repetições.....    | 56 |
| Tabela 11: Contrastes entre médias por meio do teste de Tukey .....  | 56 |

## LISTA DE SIMBOLOS

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| $b$                         | Expoente “b” de Campbell                  |
| $c_{hs}$                    | Capacidade térmica dos galhos             |
| $c_{hu}$                    | Capacidade térmica das folhas             |
| $cm$                        | Centímetro                                |
| $ds/dt$                     | Varição do armazenamento de água no solo  |
| $dz$                        | Distância entre dois pontos               |
| $d\Psi$                     | Diferença de potencial entre dois pontos  |
| $f$                         | Número de dias com falhas                 |
| $F_{areia}$                 | Fração de areia                           |
| $F_{argila}$                | Fração de argila                          |
| $i$                         | Hora da falha                             |
| $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$ | Joule por quilograma por grau Celsius     |
| $J\ m^{-2}$                 | Joule por metro quadrado                  |
| $J\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}$  | Joule por metro quadrado por grau Celsius |
| $J_w$                       | Densidade de fluxo                        |

|                  |   |
|------------------|---|
| $K(\Psi_m)$      | Condutividade hidráulica num dado potencial matricial |
| $K_{fc}$         | Condutividade hidráulica de 0,1 mm dia <sup>-1</sup>  |
| $kg\ m^{-2}$     | Quilograma por metro quadrado                         |
| $km^2$           | Quilômetro quadrado                                   |
| $K_S$            | Condutividade hidráulica saturada                     |
| $m$              | Metro   |
| $m\ s^{-1}$      | Metro por segundo                                     |
| $m^3\ m^{-3}$    | Metro cúbico por metro cúbico                         |
| $mm$             | Milímetro   |
| $mm\ ano^{-1}$   | Milímetro por ano                                     |
| $^{\circ}C$      | Grau Celsius  |
| $p$              | Hora anterior à falha                                 |
| $ppm$            | Partes por milhão                                     |
| $X_{(p+f+1)-24}$ | Valor 24 horas antes do sucessor da falha             |
| $X_i$            | Valor a ser preenchido                                |
| $X_{i-24}$       | Valor 24 horas antes do horário da falha              |
| $X_p$            | Antecessor da falha                                   |
| $X_{p+f+1}$      | Sucessor da falha                                     |
| $X_{p-24}$       | Valor 24 horas antes do antecessor da falha           |
| $Z_{bot}$        | Altura da vegetação do dossel superior                |
| $Z_{top}$        | Altura da vegetação do dossel inferior                |
| $\beta_1$        | Padrão de distribuição das raízes do dossel inferior  |
| $\beta_2$        | Padrão de distribuição das raízes do dossel superior  |
| $\Theta_{ad}$    | Teor de umidade no potencial de entrada de ar         |
| $\Theta_{fc}$    | Teor de umidade na capacidade de campo                |
| $\Theta_s$       | Porosidade  |

|               |   |
|---------------|---|
| $\Theta_{wp}$ | Teor de umidade no ponto de murcha                |
| $\Psi$        | Potência total do solo                            |
| $\Psi_{ad}$   | Potencial matricial no potencial de entrada de ar |
| $\Psi_s$      | Potencial matricial na saturação                  |
| $\Psi_{wp}$   | Potencial matricial no ponto de murcha            |

## LISTA DE ABREVIATURAS

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\bar{R}$       | Média dos escoamentos totais médios observados  |
| AgroIBIS        | Modelo Dinâmico de Agrossistemas                |
| ANOVA           | Análise de variância                            |
| C               | Coefficiente de escoamento                      |
| CCH             | Cosby et al. (1984) e Clapp e Hornberger (1978) |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de carbono                              |
| DIC             | Delineamento Inteiramente casualizado           |
| EMA             | Estação meteorológica automática                |
| ET              | Evapotranspiração                               |
| F               | Valor calculado de F                            |
| GL              | Graus de liberdade                              |
| IBIS            | Integrated Biosphere Simulator                  |
| InLand          | Modelo Integrado de Processos Superficiais      |
| INMET           | Instituto Nacional de Meteorologia              |
| IPAM            | Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia     |

|           |   |
|-----------|---|
| $K_s$     | Condutividade hidráulica saturada   |
| LAI       | Índice de área foliar   |
| $L_{in}$  | Radiação de onda longa incidente  |
| P         | Precipitação  |
| PERSIANN  | Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information<br>using Artificial Neural Networks |
| QM        | Quadrados médios  |
| R         | Escoamento total  |
| $R_1$     | Escoamento total médio resultante das simulações iniciando dia<br>1º de janeiro de 2007       |
| $R_2$     | Escoamento total médio resultante das simulações iniciando dia<br>22 de fevereiro de 2008     |
| RH        | Umidade relativa do ar  |
| $R_{obs}$ | Escoamento total médio observado  |
| $R_s$     | Escoamento total médio simulado   |
| SiB2      | Simple Biosphere Model  |
| $S_{in}$  | Radiação solar incidente  |
| SQ        | Soma dos quadrados  |
| THMB      | Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry  |
| $T_{med}$ | Temperatura média   |
| V         | Velocidade média do vento   |

## RESUMO

DIAS, Livia Cristina Pinto, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2013. **Efeito da mudança na cobertura vegetal na evapotranspiração e vazão de microbacias na região do Alto Xingu.** Orientador: Marcos Heil Costa

Uma das formas tradicionais de expansão da fronteira agrícola é por meio da conversão de ecossistemas naturais em áreas de cultivo, geralmente por meio de desmatamento. A região do Alto Xingu, no Estado do Mato Grosso - Brasil, tem sido indicada como uma das regiões de mais intensa conversão de ecossistemas naturais em pastagens ou culturas agrícolas (principalmente a soja) no país e há preocupação em se compreender como e quanto essa alteração da cobertura vegetal modifica a hidroclimatologia da região. Assim, o objetivo deste trabalho é examinar o quanto a mudança na cobertura vegetal influencia a evapotranspiração e a vazão de microbacias do Alto Xingu, na região sudeste da bacia Amazônica. Foram feitas medições de vazão em microbacias com uso uniforme do solo na região de estudo e foram conduzidas simulações pontuais com as coberturas de floresta, cerrado e pastagem no modelo InLand e com cobertura de soja, no AgroIBIS. Os dados meteorológicos e parâmetros como a condutividade hidráulica saturada do solo utilizados nos modelos foram medidos na Fazenda Tanguro – MT. As vazões médias simuladas nos modelos InLand e

AgroIBIS foram semelhantes aos valores observados em campo no período de setembro de 2008 a agosto de 2010. Comparando-se as vazões simuladas para as quatro coberturas no Alto Xingu, estima-se que a conversão da precipitação em vazão nos ecossistemas naturais (floresta e cerrado) foi 53,5% menor que nos ecossistemas agrícolas (pastagem e soja). Quando comparado aos ecossistemas naturais, a evapotranspiração dos ecossistemas agrícolas foi 38,3% menor durante o período de estudo. Também se buscou avaliar a influência de 11 diferentes classes texturais no particionamento da precipitação em escoamento total e evapotranspiração nas coberturas estudadas. Independente da textura do solo considerada, o escoamento total com cobertura de floresta tropical foi sempre inferior à simulada para as demais coberturas e a diferença entre o escoamento total simulado para as coberturas de floresta e cerrado é maior quanto menores são os valores de condutividade hidráulica saturada.

## **ABSTRACT**

DIAS, Livia Cristina Pinto, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2013. **Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in Upper Xingu.** Adviser: Marcos Heil Costa

One of the traditional forms of agricultural expansion is the conversion of natural ecosystems into cultivated areas, usually through deforestation. The Upper Xingu, located in the state of Mato Grosso – Brazil, has been referred to as one of the regions of most intense conversion of natural ecosystems to pasture or cropland (specially soybean) in the country, and there is a concern with respect to how and how much these changes in vegetation modify the hydroclimatology of the region. Thus, this study aims to assess the influence of land cover changes on evapotranspiration and streamflow in small catchments of the Upper Xingu, in the southeastern Amazon basin. Streamflow was measured in small catchments with uniform land use in the region of study, and single point simulations were performed considering Tropical Rainforest, Cerrado and Pasture as land use in the InLand model and Soybean cropland as land use in the AgroIBIS model. Meteorological data and model input parameters such as the soil saturated hydraulic conductivity were measured at the Tanguro Ranch - MT. The simulation results provided by the InLand and AgroIBIS for the mean stream discharge

were similar to the values observed between September 2008 and August 2010. Comparing the simulated streamflows for the four land uses in the Upper Xingu, it is possible to observe that the water yield in natural ecosystems (tropical rainforest and cerrado) was 53,5% lower than in agricultural ecosystems (pasture and soybean cropland). During the period of study, evapotranspiration was 38,3% lower in agricultural ecosystems compared with natural ecosystems. We also assessed the influence of 11 different soil textures on the partitioning of precipitation into evapotranspiration and mean annual streamflow for the four vegetation cover types studied. Regardless of soil texture, the simulated runoff in areas covered with tropical rainforest was always lower than that simulated for the other vegetation covers, and the difference between the simulated runoff for tropical rainforest and cerrado was greater for lower hydraulic conductivity saturated values.

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2011 a população humana atingiu a marca dos 7 bilhões de habitantes, um considerável aumento quando comparado aos 2 bilhões na década de 50 e 3,7 bilhões na década de 70. Concomitantemente a esse aumento rápido da população humana, observou-se o aumento no consumo per capita e mudanças nas dietas, que levam ao consumo de mais produtos, especialmente de origem animal (ALEXANDRATOS e BRUINSMA, 2012). Para suportar a crescente demanda por alimentos, extensas áreas de ecossistemas naturais foram convertidas em áreas de cultivo, especialmente nos últimos três séculos (RAMANKUTTY e FOLEY, 1999).

Nos seus 903.366 km<sup>2</sup> (BRASIL, 2002) o Estado do Mato Grosso abriga três diferentes biomas – Floresta tropical, Cerrado e Pantanal – e tem atraído a atenção mundial por causa do intenso desmatamento, principalmente para o cultivo de soja e para a pecuária bovina. Morton et al. (2006) identificaram a bacia do Rio Xingu como uma das áreas com maior índice de desmatamento no Mato Grosso. Dos três biomas encontrados no Mato Grosso, dois deles – a Floresta Amazônica e o Cerrado

– são encontrados no Alto Xingu, porção do Rio Xingu localizado nesse Estado. Os efeitos da substituição dessas coberturas vegetais nativas por pastagens ou culturas agrícolas nessa região ainda necessitam de estudos.

Desde o clássico estudo de Bosch e Hewlett (1982) já é sabido que a redução da cobertura vegetal implica em aumento da produção de água (vazão média anual), o que foi confirmado para diversos ecossistemas nos trabalhos de Bruijnzeel (1990), Sahin e Hall (1996), Andréassian (2004) e Brown et al. (2005). À luz desses trabalhos, atualmente é possível inferir a magnitude dos efeitos devido à conversão da vegetação natural por culturas agrícolas no ciclo hidrológico e, de maneira geral, espera-se que a conversão da vegetação natural em pastagem ou agricultura aumente a vazão média nas redes fluviais. Porém se faz necessário quantificar o efeito da substituição da floresta tropical e do cerrado por soja ou pastagem na sazonalidade de ocorrência das vazões e em outros componentes do sistema hidrológico, além de buscar compreender os mecanismos aos quais as alterações são mais sensíveis nos diferentes ecossistemas.

Desde o início do século XX pesquisadores têm utilizado experimentos com bacias pareadas para estudar o impacto da mudança no uso e cobertura do solo na vazão (ANDRÉASSIAN, 2004). Outra forma de obter a resposta da substituição da cobertura vegetal na vazão e outros componentes do balanço hídrico é por meio da utilização de modelos numéricos. Devido ao interesse em se compreender o papel da mudança na cobertura vegetal no sistema hidrológico, foram desenvolvidos modelos capazes de descrever os fluxos de água entre solo-planta-atmosfera. Dentre as vantagens em se utilizar modelos estão a possibilidade de se examinar separadamente os processos de superfície (evapotranspiração, escoamento superficial e drenagem profunda) e simular as consequências, não somente históricas, mas também futuras,

do desmatamento sobre o balanço regional de água. Por isso, modelos numéricos de superfície têm sido utilizados para simular o comportamento do sistema hidrológico em várias escalas, incluindo regiões no Brasil central (PONGRATZ et al., 2006; COE et al., 2011) e Amazônia (COSTA e FOLEY, 1997; COE et al., 2009).

Considerando a possibilidade de se utilizar modelos numéricos para se compreender como as alterações na cobertura vegetal influenciam na hidroclimatologia de uma região, o objetivo deste trabalho é examinar como e o quanto as mudanças na cobertura vegetal influenciam a evapotranspiração e a vazão nas microbacias do Alto Xingu, região sudeste da bacia Amazônica. Neste trabalho também estão definidos como objetivos específicos: avaliar o desempenho dos modelos de superfície em simular a vazão média em diferentes coberturas vegetais por meio da comparação entre os dados de vazão simulados com dados observados em campo; analisar o efeito da mudança na cobertura vegetal na evapotranspiração e vazão média de microbacias no Alto Xingu por meio de comparação entre os dados simulados médios para coberturas de floresta tropical, cerrado, pastagem ou soja; e verificar a influência da cobertura vegetal sobre o particionamento da precipitação em evapotranspiração e vazão em diferentes classes texturais de solo por meio de análises dos dados simulados.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS BIOMAS FLORESTA AMAZÔNICA E CERRADO**

#### **2.1.1. Floresta Amazônica**

Com uma área de cerca de 4.000.000 km<sup>2</sup> a floresta Amazônica brasileira se estende por sete estados: Acre, Amazonas, Rondônia, Roraima, Pará, Mato Grosso e Maranhão. Essa é a maior floresta tropical contínua do mundo, que abriga a maior biodiversidade do planeta e desempenha um papel importante na regulação do clima regional e global.

A floresta está posicionada entre os trópicos, que é uma região caracterizada por grande disponibilidade de energia solar. A maior parte dessa energia que é absorvida pela superfície terrestre é devolvida para a atmosfera na forma de evapotranspiração e o restante destina-se ao aquecimento direto da atmosfera (DA

ROCHA et al., 2009). Devido a intensa evapotranspiração, a região da floresta Amazônica é uma das principais fontes continentais de vapor d'água no planeta. Parte desse vapor d'água é advectado para as zonas temperadas e parte libera calor sensível ao ser levada para a atmosfera superior (VIANELLO e ALVES, 2012), podendo formar precipitação. Regionalmente estima-se que entre 25 e 30% da precipitação na bacia amazônica origina-se da evapotranspiração da própria floresta (ELTAHIR e BRAS, 1994; COSTA e FOLEY, 1999).

A precipitação sobre a floresta foi estudada por diversos autores incluindo Figueroa e Nobre (1990), Costa e Foley (1997), Sombroek (2001), Nobre et al. (2009) e Vilar et al. (2009). O volume precipitado varia em quantidade e distribuição sazonal nas diferentes regiões da floresta. Observa-se que na região noroeste da Amazônia há uma abundância de chuvas e há pouca diferença nos volumes precipitados entre as épocas mais e menos chuvosas. Já o sudeste amazônico é uma região com menores índices pluviométricos e há períodos de estiagem. A região Amazônica tem como característica as altas temperaturas e, assim como a precipitação, a amplitude térmica sazonal varia de acordo com a região. Na região nordeste e central da floresta a amplitude está entre 1 e 2°C enquanto no sul-sudeste, a amplitude é maior (FISCH et al., 1998).

Os latossolos representam aproximadamente 50% dos solos na Amazônia (DEMATTÊ e DEMATTÊ, 1993). Esses solos caracterizam-se por serem bem drenados, ter mais de 2 m de profundidade, o que os caracteriza como profundos, e apresentar baixa fertilidade. São solos em avançado estágio de intemperização e, por isso, caracterizam-se por baixa concentração de cátions trocáveis, alta concentração em óxidos de ferro e silicatos de alumínio e são fortemente ácidos (SANTOS et al., 2006).

As características da vegetação variam espacialmente dentro da Amazônia por serem controladas por fatores ambientais como a temperatura, disponibilidade hídrica, incidência de radiação solar e características de solo (BRADLEY et al., 2011). Apesar da grande importância do sistema radicular para permitir que a vegetação mantenha a evapotranspiração mesmo durante a estação seca da Amazônia, como ressaltam Nepstad et al. (1994), ainda não está bem determinado como os parâmetros do sistema radicular variam ao longo da floresta. Próximo a Manaus, Hodnett et al. (1995) estimaram que o sistema radicular penetrava pelo menos 3,6 m e no Pará, Nepstad et al. (1994) estimaram mais de 8 m. Já por meio de modelagem Nepstad et al. (2004) estimaram a profundidade de raiz de até 15 m e Jipp et al. (1998) estimaram a profundidade de até 18 m. Em relação às folhas, Malhado et al. (2009) estudaram a distribuição geográfica do tamanho das folhas na Amazônia e concluíram que folhas maiores foram encontradas mais frequentemente na região noroeste. Folhas menores foram associadas a regiões mais secas, que são as porções da floresta mais próximas às fronteiras com o cerrado.

### **2.1.2. Cerrado**

O cerrado é um tipo de savana que abrange uma área de aproximadamente 2.000.000 km<sup>2</sup>, cerca de 23% do território brasileiro. O bioma cerrado pode ser subdividido em diferentes fisionomias denominadas cerradão, cerrado *sensu stricto*, campo cerrado, campo sujo e campo limpo a depender do tamanho da vegetação e espaçamento entre árvores (COUTINHO, 1978).

A distribuição sazonal da precipitação é o fator ambiental mais importante para a ocorrência de savana (COLE et al., 1986; HIROTA et al., 2011; LEHMANN

et al., 2011). No geral a savana é uma vegetação típica de regiões com verões úmidos e invernos secos que se estendem por entre quatro e sete meses. As savanas ocorrem ao redor do mundo nos dois hemisférios entre as latitudes 30°N e 30°S, regiões com grande incidência de radiação solar (COLE, 1986).

Os latossolos são os solos mais comuns nas regiões de savana (COLE, 1986; CASTRO E KAUFFMAN, 1998; WERNECK, 2011) e representam cerca de 85% dos solos no Cerrado brasileiro (DEMATTE e DEMATTE, 1993). Embora os solos predominantes na Amazônia e no cerrado estejam na mesma classificação, eles tem diferenças químicas importantes: os latossolos do cerrado são menos ácidos, mais intemperizados e contém mais matéria orgânica que os da Amazônia (DEMATTE e DEMATTE, 1993). Além das características químicas há ainda outras diferenças, como a das características edáficas dos dois biomas (COLE, 1986; WERNECK, 2011).

A vegetação do cerrado é bem adaptada às condições climáticas, do solo e do regime de fogo. Nesse bioma predominam as gramíneas e árvores ou arbustos bem adaptados estrutura e funcionalmente para suportar períodos de seca. As árvores do cerrado normalmente medem entre 3 e 12 m de altura (COLE, 1986; COUTINHO, 1978; COUTINHO, 2002; OLIVEIRA et al., 2005) e a extensão e profundidade do sistema radicular e presença de estruturas como o xilopódio, que tem por finalidade o estoque de água e nutrientes, são muito importantes. Os resultados encontrados por Castro e Kauffman (1998) para um sítio experimental em Brasília com cerrado *sensu stricto* demonstram que cerca de 80% das raízes se concentram até 30 centímetros de profundidade, o que é explicado devido à predominância de gramíneas nesse bioma. As raízes das árvores e arbustos, que nesse estudo representaram entre 3 e 4% das

raízes, chegaram a cerca de 2 m. Oliveira et al. (2005) chegaram a um resultado parecido, medindo que 92% das raízes concentravam-se no primeiro metro de solo.

Para se proteger da alta intensidade luminosa essa vegetação é capaz de sintetizar grossas camadas de cera sobre as folhas e essas folhas são geralmente hipoestomáticas, isto é, com presença de estômatos apenas na parte inferior da folha. Além de proteger contra o excesso de radiação esses também são mecanismos para reduzir a perda de água por transpiração (BIERAS e SAJO, 2009). Com essas características de raiz e folhas, a vegetação do cerrado é capaz de transpirar durante todo o ano, inclusive no período seco.

## **2.2. HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO DA AMAZÔNIA E DO CERRADO**

Apesar da riqueza dos biomas da Amazônia e Cerrado, o Brasil presenciou um acelerado processo de conversão da vegetação natural em espaço agropecuário nos últimos 30 anos do século XX, sobretudo na Região Centro-Oeste e na Amazônia (ROSS, 2006).

Na Amazônia até 1960, as margens do rio Amazonas e seus afluentes eram as principais áreas habitadas devido à facilidade de acesso por meio dos rios navegáveis (SALATI et al., 1983). Porém entre 1960 e 1970, por incentivo governamental, uma rede de estradas foi aberta cortando a vegetação natural a fim de promover a ocupação do Brasil Central e da Amazônia. Nessa época muitas pequenas e médias propriedades na Amazônia foram doadas à população imigrante, porém quase todos os proprietários de terras da região, após retirarem as madeiras de valor econômico, converteram a vegetação nativa em campos de cultivo e, em seguida, pastagens (SALATI et al., 1983; ROSS, 2006).

Assim, já os primeiros incentivos de desenvolvimento regional resultaram em grandes áreas desmatadas principalmente no leste do Estado do Pará, no norte e nordeste do Mato Grosso e no eixo central de Rondônia. Até hoje as consequências das primeiras políticas de desenvolvimento da Amazônia são detectadas nessas regiões, conhecidas conjuntamente como “Arco do desmatamento”. Recentemente, a atividade agrícola voltou a crescer na região, especialmente com a cultura de soja, e estudos focados na Amazônia demonstram que a expansão agrícola ocorre principalmente nas regiões de ocupação pioneira e próximo às principais estradas (LEITE et al., 2011).

A ideia de se ocupar o cerrado iniciou com a chegada dos portugueses que buscavam minerais preciosos nessa região. Com o esgotamento das minas a pecuária passou a ser praticada como atividade econômica e a agricultura teve menor importância econômica até o início do século XIX quando se iniciou o cultivo de café em São Paulo. A ocupação das terras cobertas por cerrado nos Estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Tocantins foi diferente das terras com floresta Amazônica. Inicialmente por haver grandes extensões de pastagens naturais, as terras foram utilizadas para pecuária que abastecia outras áreas do país. Com o passar dos anos essas terras acabaram sendo adquiridas por grandes agricultores acostumados às tecnologias agrícolas e hoje a agricultura é uma atividade consolidada no cerrado (KLINK e MOREIRA, 2002; ROSS, 2006).

A cultura da soja tem participação ativa no fortalecimento da atividade agropecuária na Amazônia e cerrado. Foi o desenvolvimento de variedades tolerantes às condições de solos com altas concentrações de alumínio do cerrado e ao clima úmido e quente da Amazônia, combinado com uma grande demanda por esse grão, que impulsionaram o preço da soja e o interesse dos agricultores em promover

a expansão agroindustrial do sul para o centro do país, em direção ao sudeste da Amazônia (FEARNSIDE, 2001; NEPSTAD et al., 2006). Hoje as atividades econômicas mais importantes do Centro-Oeste brasileiro são o cultivo da soja e a pecuária bovina, e outras culturas como o milho, o trigo e o algodão são usados como cultivos complementares de rotação ou de substituição temporária. Somente no Mato Grosso, entre os anos de 2001 e 2004, mais de 540.000 ha de floresta tropical amazônica foram diretamente substituídas por culturas agrícolas, especialmente a soja (MORTON et al., 2006; MACEDO et al., 2012).

Diversos trabalhos como os de Morton et al. (2006), Leite et al. (2011), Lathuillière et al. (2012) e Macedo et al. (2012) destacam o Estado do Mato Grosso pela alta intensidade da transformação de vegetação nativa em área para agropecuária. Os resultados de Morton et al. (2006) e Macedo et al. (2012) apontam que recentemente no Mato Grosso mais áreas desmatadas tem sido destinadas à expansão do cultivo de soja que para a conversão em pastagens. Esse fato é motivação para estudos que identifiquem as alterações ambientais causadas pela substituição da vegetação nativa por culturas agrícolas, em especial na região de cabeceira do Rio Xingu, que se destaca pelo intenso processo de alteração da cobertura vegetal.

No Alto Xingu, que é a parte da bacia desse rio localizada no Mato Grosso, a vegetação nativa é o cerrado (cerradão e cerrado *sensu stricto*) na porção mais ao sul e a floresta Amazônica ao norte. Próximo à divisa com o estado do Pará encontra-se o Parque Nacional Indígena do Xingu, uma área de floresta totalmente preservada, porém, devido à pecuária e à expansão agrícola, a vegetação de cabeceira da bacia do Rio Xingu fora do parque sofreu grandes modificações e hoje toda a região é um mosaico entre floresta, cerrado, pastagem e soja.

Devido à diversidade de coberturas e ao interesse dos indígenas, agropecuaristas, pesquisadores e outros membros da sociedade em buscar produção com responsabilidade socioambiental, essa região tem sido laboratório para diversas pesquisas que possam direcionar políticas de preservação e que promovam melhor entendimento sobre a função hidrológica dos ecossistemas. Dentre essas pesquisas, nessa região são desenvolvidos estudos que buscam analisar as consequências da conversão de vegetação nativa em pasto e culturas agrícolas nos recursos hídricos, tema que já foi abordado nos trabalhos de Hayhoe et al. (2011), Scheffler et al. (2011), Bäse et al. (2012), Neill et al. (2013) e também é o objetivo do presente estudo.

### **2.3. MUDANÇAS NA COBERTURA VEGETAL E OS RECURSOS HÍDRICOS**

O balanço hídrico é a representação do equilíbrio entre o volume de água que entra e sai de uma porção de solo obedecendo a conservação de massa. O balanço hídrico pode ser escrito matematicamente como:

$$\frac{ds}{dt} = P - ET - R \quad (1)$$

Sendo  $ds/dt$  a variação no armazenamento de água no solo;  $P$  é a precipitação;  $ET$  é a evapotranspiração; e,  $R$  é o escoamento total. O escoamento total é definido como a soma do escoamento superficial com o escoamento subterrâneo. É comum que o balanço hídrico seja calculado para o ano hidrológico, que se inicia no início do período chuvoso e termina no fim do período seco.

Diversos trabalhos já foram desenvolvidos para floresta Amazônica buscando compreender como as mudanças na cobertura vegetal influenciam o balanço hídrico

(JIPP et al. 1998; PONGRATZ et al., 2006; MORAES et al., 2006; CHAVES et al., 2008; GERMER et al., 2009; HAYHOE et al., 2011; NEILL et al., 2013), o processo de formação dos escoamentos (ELSENBEER e VERTESSY, 2000; JOHNSON et al., 2006; WATERLOO et al., 2006; TOMASELA et al., 2008; WICKEL et al., 2008; HAYHOE et al., 2011, NEILL et al., 2013), interceptação da precipitação pela vegetação (MORAES et al., 2006; TOMASELA et al., 2008; BÄSE et al., 2012), a variação no armazenamento de água no solo (BRUNO et al., 2006; TOMASELA et al., 2008) e na evapotranspiração das diferentes coberturas (JIPP et al. 1998; TOMASELA et al., 2008). Os estudos citados são alguns exemplos dos inúmeros estudos para a Amazônia e as localizações desses estudos e mais três estudos sobre o bioma de cerrado estão apresentadas na Figura 1.

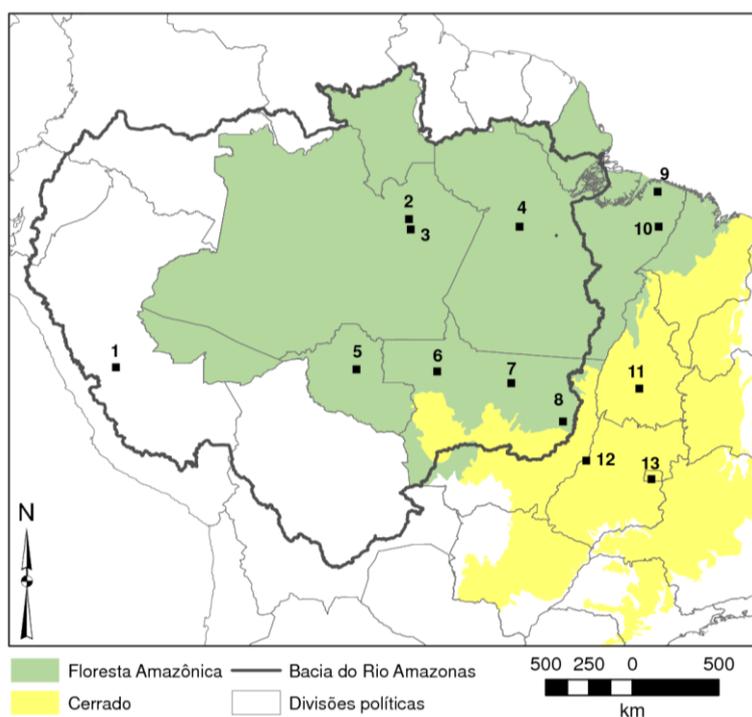


Figura 1: Localização dos estudos revisados nos biomas Amazônia e Cerrado. **1.** *Elsenbeer e Vertessy (2000)*; **2.** *Waterloo et al. (2006)*; **3.** *Tomassela et al. (2008)*; **4.** *Bruno et al. (2006)*; **5.** *Chaves et al. (2008)*, *Germer et al. (2009)*; **6.** *Johnson et al. (2006)*; **7.** *Pongratz et al. (2006)*; **8.** *Hayhoe et al. (2011)*; **9.** *Wickel et al. (2008)*; **10.** *Moraes et al. (2006)*; **11.** *Costa et al. (2003)*; **12.** *Coe et al.(2011)*; **13.** *Oliveira et al. (2005)*.

A substituição do ecossistema de floresta tropical por um ecossistema agrícola implica em alteração do índice de área foliar, da profundidade do sistema radicular, da rugosidade da superfície e do albedo (BONAN et al. 1992; COSTA e FOLEY, 2000; PONGRATZ et al., 2006; COSTA et al., 2007; SAMPAIO, 2007). Todas essas alterações concorrem para que a evapotranspiração em regiões com pastagem e soja seja menor que em região de floresta. Utilizando modelos para simular a conversão de floresta para culturas agrícolas ou pastagem, Pongratz et al. (2006) concluíram que com a conversão houve redução de 21% na evapotranspiração. Da mesma forma, Lathuillière et al. (2012) concluíram que houve redução de 20% da evapotranspiração total do Estado do Mato Grosso entre 2000 e 2009 devido ao desmatamento.

Se há redução na evapotranspiração, um maior volume da precipitação é destinado ao escoamento total. Para analisar esse particionamento da precipitação é comum utilizar a razão entre o escoamento total e a precipitação, que é conhecida como coeficiente de escoamento e que pode ser dada em porcentagem. No Estado do Pará, Moraes et al. (2006) observaram que o coeficiente de escoamento foi 3,2% para microbacias com floresta e 17,3% para microbacias com pastagem. Uma produção de água próxima a de Moraes et al. (2006) foi encontrada na cobertura de pastagem nos experimentos de Chaves et al. (2008) e Germer et al. (2009). Nesses experimentos o coeficiente de escoamento para microbacias de pastagem foram aproximadamente 17,5% e para microbacias de floresta, aproximadamente 0,9%. Por sua vez, Neill et al. (2013) concluíram que microbacias com soja tem 4 vezes mais escoamento total que microbacias com floresta.

O particionamento do escoamento total em escoamento superficial direto e escoamento subterrâneo é definido pela vegetação e as características do solo.

Moraes et al. (2006) estimaram que a conversão de floresta tropical para pastagem aumentou em 14% o escoamento superficial direto de uma microbacia no Pará.

Enquanto diversos trabalhos esclarecem o comportamento da água no bioma de floresta amazônica, nota-se grande escassez de informações para se compreender o efeito do desmatamento no balanço hídrico e a função hidrológica do cerrado. Sabe-se que o aumento no escoamento total não ocorre somente para a cobertura de floresta, a conversão da cobertura de cerrado para pastagem ou culturas aumentou em aproximadamente 25% a produção de água em bacias no Brasil central (Costa et al., 2003; Coe et al., 2011). Oliveira et al. (2005) investigaram o armazenamento de água do solo e o papel das raízes no balanço hídrico do cerrado. Ainda assim são necessárias pesquisas no cerrado sobre, por exemplo, a interceptação da precipitação pela vegetação, o particionamento do escoamento total em superficial e subterrâneo e experimentos em campo para compreender o particionamento da precipitação em vazão e evapotranspiração.

#### **2.4. UTILIZAÇÃO DE MODELOS NOS ESTUDOS DO CICLO HIDROLÓGICO**

A partir do levantamento e interpretação de dados observados é possível construir modelos, que são representações simplificadas da realidade. Os modelos são grandes aliados das ciências por ajudar a melhorar a compreensão dos fenômenos, sistemas, processos e estruturas tanto nas condições passadas como nas atuais. Os modelos também possibilitam a previsão de acontecimentos futuros e facilitam os estudos em diferentes condições e situações, especialmente quando os diversos testes seriam inviáveis no mundo real. Tucci (2005) classifica os modelos

em três tipos: físicos, analógicos e matemáticos. De acordo com esse autor, os modelos físicos são protótipos em escala reduzida. Já os modelos analógicos valem-se de analogias, das semelhanças entre diferentes processos ou estruturas. Por sua vez, os modelos matemáticos – que também podem ser chamados de modelos numéricos – representam a natureza através de equações matemáticas.

Os modelos numéricos utilizados para estudar os componentes do ciclo da água são conhecidos como modelos hidrológicos. Nesses modelos há representação do fluxo vertical entre solo-planta-atmosfera, sendo que as variáveis meteorológicas são fornecidas ao modelo e o particionamento da precipitação em evapotranspiração e escoamento superficial e escoamento subterrâneo depende das características da vegetação e do solo. Costa e Foley (1997) e Pongratz et al. (2006) utilizaram, respectivamente os modelos *Integrated Biosphere Simulator* (IBIS; FOLEY et al., 1996) e o *Simple Biosphere Model* (SiB2; SELLERS et al., 1996a, 1996b) que são exemplos de modelos que possuem a representação do fluxo vertical da água. Costa e Foley (1997) analisaram os efeitos da mudança na cobertura vegetal (de floresta para pastagem) na evapotranspiração e vazão da bacia Amazônica e para cada uma das sub-bacias. Já Pongratz et al. (2006) analisaram o efeito da conversão de Floresta para pastagem e culturas agrícolas no balanço de água do norte do Mato Grosso.

Além da representação do fluxo entre solo-planta-atmosfera, os modelos hidrológicos também podem efetivamente calcular a vazão dos cursos d'água ao acumular o escoamento total produzido por cada célula da grade de simulação, como faz o modelo *Terrestrial Hydrology Model with Biogeochemistry* (THMB; COE, 2007). A fim de analisar a vazão na bacia do rio Araguaia, Coe et al. (2011) utilizaram o modelo IBIS acoplado ao modelo THMB. Nesse estudo foi observado que a vazão aumentou em 25% nos 20 anos analisados. Quando os resultados

simulados foram confrontados com os dados observados foi possível verificar que cerca de 67% desse aumento foi devido ao desmatamento e o restante deve-se à variabilidade climática.

Os modelos hidrológicos ainda podem estar acoplados a modelos atmosféricos, que fornecem os dados meteorológicos ao modelo hidrológico. Ao utilizar esses dois modelos em conjunto é possível analisar os mecanismos de retroalimentação envolvidos no sistema biosfera-atmosfera. Na Amazônia, Costa et al. (2007) identificaram alteração na precipitação quando 25, 50 ou 75% da área original de floresta tropical é convertida em pastagem ou soja. O aumento da temperatura da superfície e redução da evapotranspiração e precipitação também foram conclusões de Sampaio et al. (2007), que ainda concluíram que há redução da precipitação com aumento progressivo do desmatamento. Esses dois estudos foram conduzidos utilizando modelos numéricos de superfície acoplados a modelos climáticos.

Dentre os inúmeros modelos, a escolha do modelo ou modelos a serem utilizados depende do objetivo da pesquisa e da preferência do pesquisador. É importante lembrar que a realização de experimentos utilizando modelos não exclui a necessidade de experimentos em campo, dados medidos são importantes e necessários para a construção, calibração e validação dos modelos. Os resultados dos modelos complementam as informações obtidas em campo, possibilitando análises mais detalhadas dos diferentes processos e componentes do ambiente.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. DESCRIÇÃO DA FAZENDA TANGURO**

A Fazenda Tanguro, que possui uma área de 800km<sup>2</sup>, é de propriedade do grupo André Maggi e está localizada na cabeceira da bacia do Rio Xingu, região conhecida como Alto Xingu (Figura 2).

O clima da região dessa fazenda é caracterizado por duas estações bem definidas sendo que o período seco vai de maio a agosto e o período chuvoso de setembro a abril. A precipitação anual média varia entre 1500 e 2500 mm ano<sup>-1</sup> e a temperatura média mensal é de 27°C (HAYHOE et al., 2011). Os solos da Fazenda Tanguro são bem drenados, classificados como Latossolo vermelho-amarelo distrófico (PROJETO RADAMBRASIL, 1981), com textura média de 55% de areia, 2% de silte e 43% de argila (Oliveira et al., 1992). Quanto ao relevo, a Fazenda Tanguro está em uma região altimétrica marcada por superfícies rebaixadas com formas predominantemente tabulares.

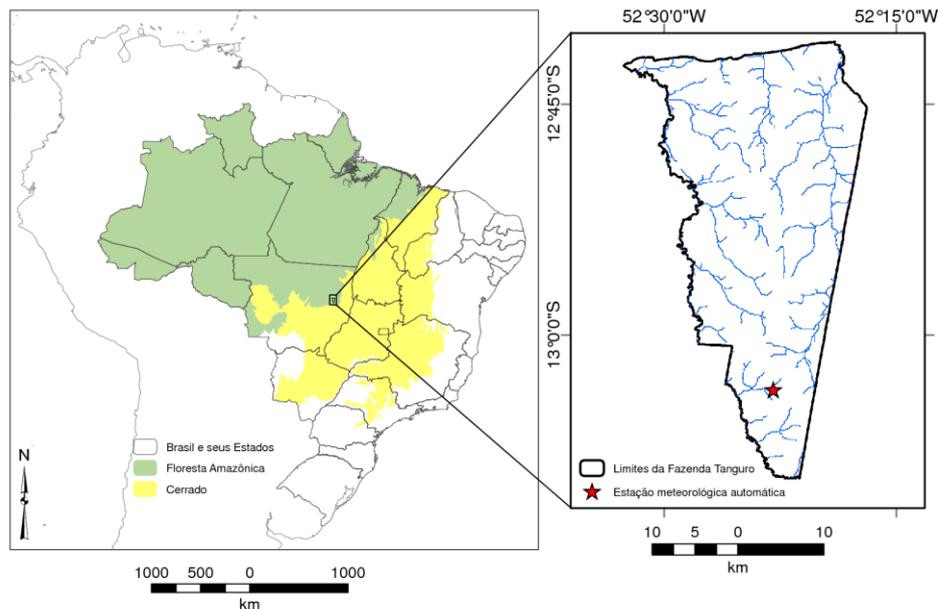


Figura 2: Localização Fazenda Tanguro e da estação meteorológica automática (EMA).

### 3.2. DESCRIÇÃO DOS DADOS METEOROLÓGICOS

Medidas horárias da umidade relativa (RH), radiação solar incidente ( $S_{in}$ ), precipitação (P), temperatura média do ar ( $T_{med}$ ) e velocidade média do vento (V) foram coletadas por uma estação meteorológica automática (EMA, Figura 2) que é de responsabilidade do Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM). A EMA está situada na Fazenda Tanguro - Mato Grosso (Latitude:  $13^{\circ}3'37,16''S$ ; Longitude:  $52^{\circ}22'55,68''W$ ; Altitude: 358 m) e foram utilizados os dados medidos no período de 01 de janeiro de 2007 a 31 de dezembro de 2010.

É frequente o fato de estações meteorológicas apresentarem falhas nos seus bancos de dados e isso também ocorreu na série de dados coletados pela EMA de Tanguro (Figura 3). O período no qual houve coleta de dados meteorológicos pela EMA de Tanguro para este trabalho pode ser dividido em duas fases distintas: entre 1º de janeiro de 2007 e 21 de fevereiro de 2008, período que houve funcionamento inadequado dos equipamentos que resultaram em grande quantidade de falhas; e

entre 22 de fevereiro de 2008 e 31 de dezembro de 2010, período que a EMA funcionou corretamente, com poucas falhas. Esses dois períodos foram tratados de formas distintas quanto ao preenchimento das falhas.

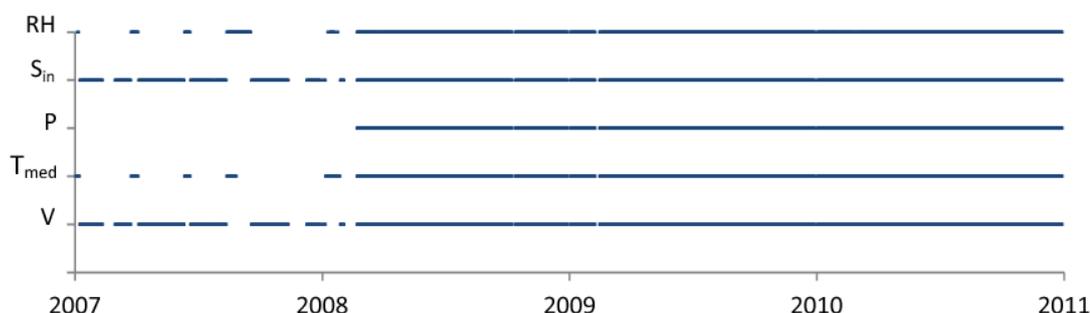


Figura 3 Disponibilidade de dados da EMA da Fazenda Tanguro para os períodos de 01 de janeiro de 2007 a 31 de dezembro de 2010, sendo RH, umidade relativa do ar;  $S_{in}$ , radiação solar incidente; P, precipitação;  $T_{med}$ , temperatura média do ar; e V, velocidade média do vento. Para melhor visualização, os dados foram agrupados em dados diários e caso houvesse uma hora ou mais de dados faltantes todo o dia é mostrado na figura como faltante.

### 3.2.1. Preenchimento de falhas dos dados

Como foram identificadas falhas na série de dados meteorológicos (Figura 3), foi necessário preencher as falhas antes de utilizar os dados medidos.

No período com menor quantidade de falhas, entre 22 de fevereiro de 2008 e 31 de dezembro de 2010, os dados de umidade relativa (RH), radiação solar incidente ( $S_{in}$ ), temperatura média do ar ( $T_{med}$ ) e velocidade média do vento (V) foram preenchidos de acordo com Senna (2004), em que:

- Se a falha (f) for menor ou igual a 3 horas:

$$X_i = X_p + \frac{(X_{p+f+1} - X_p)}{f+1} \times (i - p) \quad (2)$$

onde  $X_i$  é o valor a ser preenchido,  $X_p$  é o antecessor da falha,  $X_{p+f+1}$  é o sucessor da falha,  $i$  é a hora da falha e  $p$  é a hora anterior à falha.

- Se a falha (f) for maior que 3 horas e menor que 24 horas:

$$X_i = X_{i-24} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1} \times (X_p - X_{p-24}) + \frac{(i-p)}{f+1} \times (X_{p+f+1} - X_{(p+f+1)-24}) \quad (3)$$

Onde  $X_{i-24}$  é o valor 24 horas antes do horário da falha,  $X_{p-24}$  é o valor 24 horas antes do antecessor da falha,  $X_{p+f+1}$  é o valor sucessor da falha e  $X_{(p+f+1)-24}$  é o valor 24 horas antes do sucessor da falha.

- Se a falha for maior ou igual a 24 horas:

$$X_i = X_{i-24y} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1} \times (X_p - X_{p-24y}) + \frac{(i-p)}{f+1} \times (X_{p+f+1} - X_{(p+f+1)-24y}) \quad (4)$$

Onde y é a parte inteira de  $\left(\frac{f}{24} + 1\right)$ .

As equações utilizadas no trabalho de Senna (2004) são capazes de fazer com que o período sem dados siga o comportamento do período com dados. Na Figura 4 é mostrado o exemplo de uma parte da série de dados onde foi empregada a metodologia de Senna (2004). Na figura estão mostrados os gráficos de RH,  $S_{in}$ ,  $T_{med}$  e V entre 30 de janeiro de 2009 e 20 de fevereiro de 2009. O período de 7 a 13 de fevereiro de 2009, que foi preenchido com a Equação 4, está marcado com a linha vermelha. O que se observa é que as falhas horárias foram preenchidas de forma mais realística que uma interpolação linear.

No período com maior quantidade de falhas, entre 1 de janeiro de 2007 e 21 de fevereiro de 2008, além da metodologia de Senna (2004) também foi feita correlação dos dados medidos em Tanguro e as estações automáticas localizadas nos municípios de Querência, Gaúcha do Norte e Água Boa (Figura 5) a fim de completar os dados. Os dados das estações próximas a Fazenda Tanguro foram obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Já os dados faltantes da variável precipitação foram obtidos no banco de dados do algoritmo PERSIANN (HSU, et al., 1997; SOROOSHIAN et al., 2000). O PERSIANN (*Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using*

*Artificial Neural Networks*) é um algoritmo que utiliza dados de satélite para estimar a precipitação global numa resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  e escala temporal de 30 min, mas os produtos disponíveis são dados acumulados a cada 3 h (disponibilizados em <http://chrs.web.uci.edu/persiann/data.html>). A interpolação para dado horário foi feita dividindo-se o valor do acumulado de 3 h por 3.

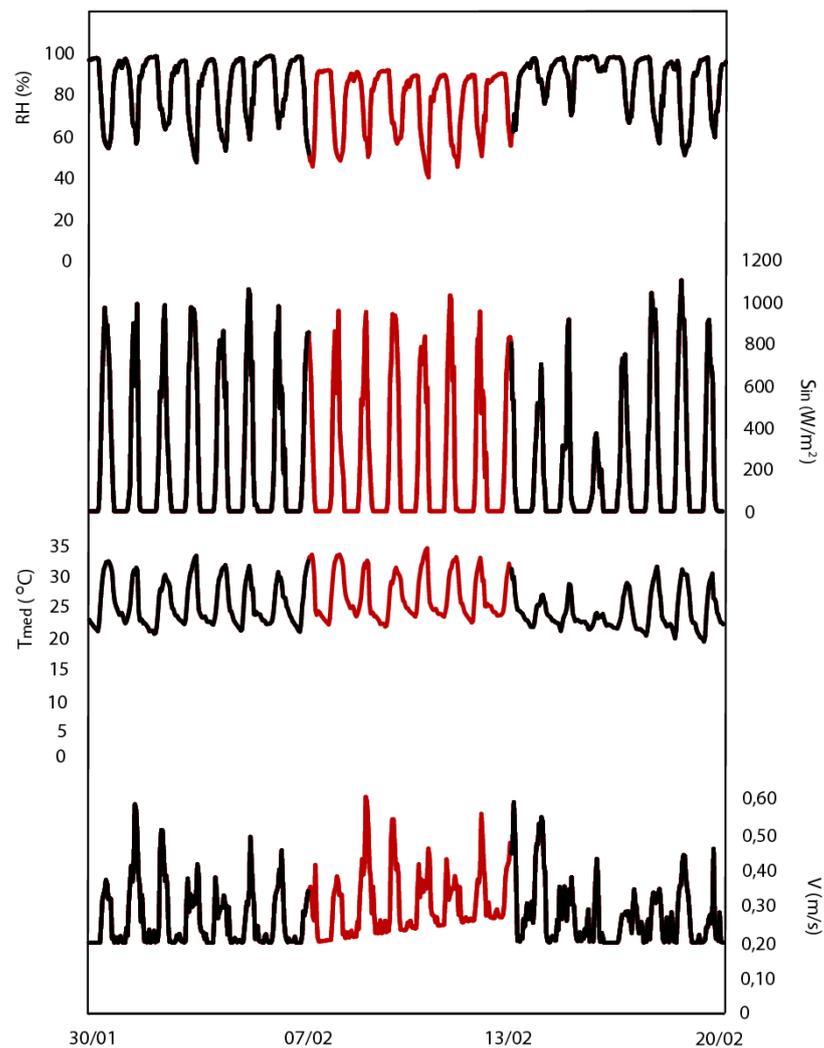


Figura 4: Exemplo de período preenchido com a metodologia de Senna (2004). Entre 7 e 13 de fevereiro 2009 houve preenchimento das falhas (vermelho).

Além dos dados medidos pela EMA de Tanguro, a radiação de onda longa incidente ( $L_{in}$ ) também é uma variável de entrada dos modelos que foram utilizados. Como os dados de  $L_{in}$  não foram medidos pela EMA, esses dados foram estimados

de acordo com a equação empírica proposta por Idso (1981), que utiliza a temperatura do ar e a pressão de vapor d'água no cálculo. De acordo com Aguiar et al. (2011) essa equação é uma das que apresentou maior índice de concordância com os dados de radiação de onda longa incidente medidos em campo para sítios de floresta e pastagem no sudoeste da Amazônia.

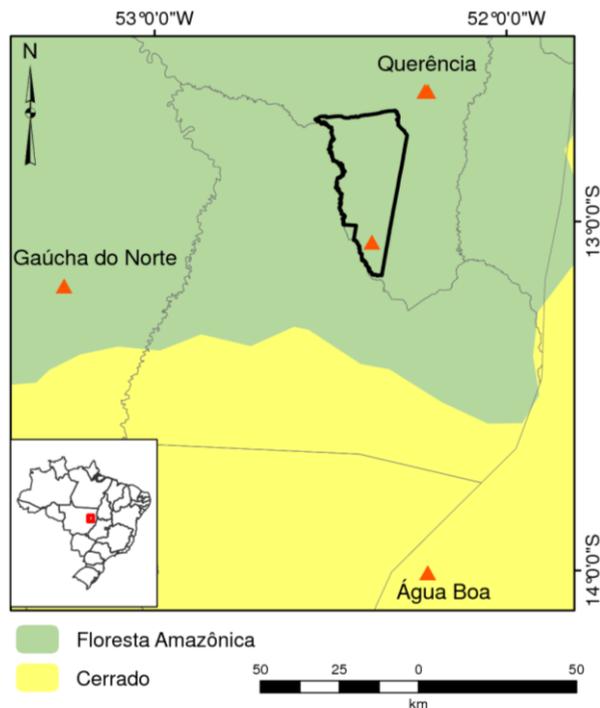


Figura 5: Localização das estações meteorológicas automáticas (triângulos) na Fazenda Tanguro e nas cidades de Gaúcha do Norte, Querência e Água Boa.

### 3.3. DESCRIÇÃO DAS MICROBACIAS E DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS

Os dados fluviométricos foram coletados por outra equipe vinculada ao projeto “*MSM Collaborative Research: Agricultural Expansion in the Brazilian Amazon and its Influence on the Water, Energy, and Climate Cycles*”. Estações fluviométricas foram instaladas para medição da vazão dos córregos de sete

microbacias de primeira ordem, sendo três na região com vegetação nativa de floresta, e quatro em região com cultivo de soja. Dados de uma microbacia de segunda ordem com cultivo de soja também foram coletados, como indicado na Figura 6. Nos pontos selecionados de cada microbacia (Tabela 1) foram instalados linígrafos com *data logger* da marca Onset Hobo (U20-001-04) que registram dados desde setembro de 2007. Esses aparelhos são compostos de medidores e registradores de pressão barométrica e temperatura média da água em intervalos de 15 min e durante o pré-processamento os dados de lâmina de água foram acumulados diária e mensalmente. Durante todo o período de coleta de dados as microbacias permaneceram com uma mesma cobertura vegetal.

Originalmente a região da fazenda era coberta por floresta tropical com características típicas da transição entre floresta e cerrado, como baixa diversidade de espécies, árvores menores e dossel mais baixo que no interior da floresta (BALCH et al., 2008; SCHEFFLER et al., 2011). No início da década de 80, houve a conversão de áreas nativas em áreas de pastagem. A pastagem plantada na fazenda é constituída principalmente de *Brachiaria brizantha* e *Brachiaria humidicola*. A conversão de algumas áreas de pastagem para soja ocorreu em 2004 (nas microbacias Soja 1b, Soja 1c, Soja 1d e Soja 2) e 2007 (na microbacia Soja 1a).

Desde o ano da conversão para soja até o ano de 2010, foi utilizado o plantio convencional como método de manejo e apenas a soja é cultivada na área. A cultura é plantada nos meses de Outubro ou Novembro e é colhida geralmente no final do mês de Janeiro. Durante o cultivo, a soja não recebe irrigação e o solo permanece exposto nos períodos entre a colheita e o próximo plantio. Antes de se tornarem microbacias com cobertura de soja, essas microbacias possuíam densidade de animais de uma cabeça de gado por hectare.

Tabela 1: Localização das estações fluviométricas (coordenadas em graus, minutos e segundos), tipo de vegetação atual e área (em km<sup>2</sup>) das microbacias em análise. Soja 1 define as microbacias de primeira ordem e Soja 2 define a bacia de segunda ordem

| Código     | Vegetação atual | Coordenadas |            | Área (km <sup>2</sup> ) |
|------------|-----------------|-------------|------------|-------------------------|
|            |                 | Latitude    | Longitude  |                         |
| Soja 1a    | Soja            | 13°03'00"S  | 52°22'37"W | 3,30                    |
| Soja 1b    | Soja            | 12°56'13"S  | 52°26'10"W | 2,51                    |
| Soja 1c    | Soja            | 12°56'56"S  | 52°25'48"W | 2,51                    |
| Soja 1d    | Soja            | 12°58'44"S  | 52°23'34"W | 3,93                    |
| Soja 2     | Soja            | 12°56'42"S  | 52°26'16"W | 27,5                    |
| Floresta a | Floresta        | 13°15'32"S  | 52°24'10"W | 6,73                    |
| Floresta b | Floresta        | 12°52'55"S  | 52°21'46"W | 13,5                    |
| Floresta c | Floresta        | 12°50'09"S  | 52°20'02"W | 4,89                    |

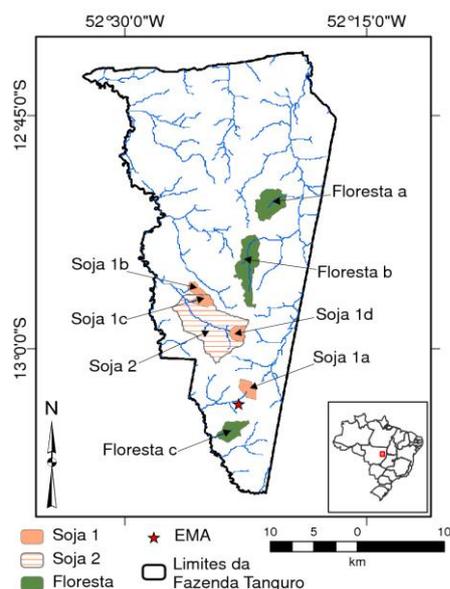


Figura 6: Localização das microbacias na Fazenda Tanguro com coberturas de floresta tropical e soja. Soja 1 define as microbacias de primeira ordem e Soja 2 define a bacia de segunda ordem.

### 3.4. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

O Modelo Integrado de Processos Superficiais (InLand) está sendo desenvolvido por pesquisadores brasileiros baseado no modelo *Integrated Biosphere Simulator* (IBIS), desenvolvido na Universidade de Wisconsin-Madison. A criação de um modelo brasileiro de superfície permitirá melhor representação dos biomas

nacionais, como o cerrado e a floresta Amazônica, e a inclusão de processos importantes no território brasileiro como queimadas, inundações e agricultura. Para incluir este último processo, o Modelo Dinâmico de Agrossistemas (AgroIBIS) está sendo incorporado ao InLand. Devido ao fato do processo de incorporação estar em andamento, neste trabalho foram utilizados separadamente o InLand versão 1.0 e o AgroIBIS no modo de operação pontual (*single point*).

Assim como no IBIS, o módulo da superfície terrestre do InLand simula as trocas de energia, água, carbono e momentum no sistema solo-vegetação-atmosfera. O modelo representa duas camadas de vegetação com um total de 12 tipos funcionais de plantas. Há seis camadas de solo e o volume de água no solo é simulado para cada camada. Os processos hidrológicos do InLand são os mesmos do IBIS. A infiltração de água no solo é baseada na equação de Darcy. Já a umidade do solo é baseada na equação de fluxo de Richards, em que a umidade do solo varia no tempo e no espaço em função da condutividade hidráulica do solo, da curva de retenção de água, da captação de água pelas plantas e da drenagem de água ao longo do perfil do solo. A transpiração das plantas é governada pela condutância estomatal acoplada à fotossíntese (BALL et al., 1986). A captação de água pelas plantas é uma função da demanda atmosférica, propriedades físicas do solo, distribuição das raízes e perfil de água no solo (KUCHARIK et al., 2000). Por fim, o escoamento superficial e o subterrâneo são simulados como uma função de características do solo, vegetação e clima.

O AgroIBIS é uma versão modificada do IBIS capaz de simular características fenológicas e fisiológicas de culturas agrícolas. Nesse modelo as culturas utilizam as mesmas equações físicas e biofísicas para simular os balanços de energia, água, carbono e momentum usados pelos sistemas naturais. As culturas

anuais representadas no AgroIBIS são o milho, a soja e o trigo (KUCHARIK, 2003; KUCHARIK e TWINE, 2007). A soja foi testada para sítios experimentais no Brasil e esse modelo foi capaz de representar bem o crescimento da cultura e os fluxos de superfície nas condições de Cruz Alta - RS quando foram utilizados os parâmetros calibrados para condições americanas (WEBLER et al., 2012).

### **3.5. OBTENÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO E SUBTERRÂNEO A PARTIR DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS**

O Sistema Computacional para Auxílio à Separação dos Hidrogramas em escoamento Superficial e escoamento Subterrâneo (SepHidro, MIRANDA et al., 2012) é uma ferramenta com interface simples e objetiva que permite que a vazão ou a precipitação sejam particionados em escoamentos superficiais diretos e subterrâneos.

Para utilizar o SepHidro é necessário conhecer a área de drenagem da estação fluviométrica e que os dados diários de vazão ou precipitação estejam no formato padrão dos bancos de dados do sistema *HidroWeb* (ANA, 2011). Sobre os dados de entrada, essa ferramenta de separação dos hidrogramas é capaz de identificar e remover anos com excesso de falhas nas séries de vazões. Há três opções de métodos de separação no SepHidro – método do Intervalo Fixo, método do Intervalo Móvel e método do Mínimo Local – que podem ser utilizados na obtenção dos valores de vazão correspondente ao escoamento subterrâneo individualizado ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ), do volume de escoamento total ( $\text{m}^3 \text{dia}^{-1}$ ), do volume de escoamento superficial direto ( $\text{m}^3 \text{dia}^{-1}$ ), do volume de escoamento superficial direto anual ( $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$ ), do coeficiente de escoamento total, do índice de escoamento superficial direto (%) e do coeficiente de escoamento superficial direto, a partir dos dados das estações

fluviométricas e pluviométricas. A apresentação dos resultados é feita pela ferramenta por meio de tabelas e gráficos.

### **3.6. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO NUMÉRICO**

Foram executadas simulações pontuais no período de 1º de janeiro de 2007 a 31 de dezembro de 2010 sendo que cada simulação possuía cobertura única de floresta, cerrado ou pastagem no InLand e a cultura da soja, no AgroIBIS. As médias mensais da evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, escoamento total e variação da umidade do solo dos dois anos hidrológicos compreendidos entre 1º de setembro de 2008 e 31 de agosto de 2010 foram analisados.

Também foram obtidos nesse trabalho, utilizando o SepHidro, o particionamento do escoamento total em escoamento superficial direto e subterrâneo a partir dos dados fluviométricos diários de vazão ( $m^3 s^{-1}$ ) medidas em cada uma das 8 microbacias na Fazenda Tanguro. Os dados de entrada correspondiam ao período de 1º de janeiro de 2007 a 31 de dezembro de 2010. O método de separação escolhido foi o método do Mínimo Local já que esse foi o método que melhor representou o particionamento do escoamento total em escoamento superficial e subterrâneo no trabalho de Miranda (2012).

Desenvolvido por Pettyjohn e Henning (1979), o método dos mínimos locais consiste em selecionar a menor vazão dentro de um intervalo de dias definido, que será adotada como um mínimo local. Feito isso, segue-se para o próximo intervalo de dias e esse procedimento é repetido até o fim da série de vazões. Por fim, os valores mínimos locais são ligados entre si por linhas que representam o comportamento do

escoamento subterrâneo. Foram analisados os dados do período entre 1° de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2010, que foi o período de saída da ferramenta SepHidro.

### 3.6.1. Condições de contorno

Em todas as simulações foram utilizadas as concentrações fixas de CO<sub>2</sub> em 390 ppm. Os dados meteorológicos horários da EMA na Fazenda Tanguro foram utilizados como dados de entrada e considerados como representativos para todas as microbacias em estudo. No modelo InLand foi utilizado o modo de vegetação fixa. No modelo AgroIBIS foram especificados que a data de plantio da soja ocorreria no dia 1° de novembro e também que não haveria rotação de culturas, com o solo permanecendo exposto nos períodos entre plantios. Os valores dos parâmetros de vegetação e dossel utilizados nas simulações estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros de vegetação e dossel utilizados nas simulações com cobertura vegetal de floresta, cerrado e pastagem, no modelo InLand, e soja, no modelo AgroIBIS

| Parâmetro                                      | Floresta  | Cerrado   | Soja      | Pastagem  |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>Vegetação</i>                               |           |           |           |           |
| $z_{top}$ (m)                                  | 20,0      | 7,0       | 0,0       | 0,0       |
| $z_{bot}$ (m)                                  | 8,0       | 1,0       | 0,75      | 0,6       |
| $\beta_1$                                      | 0,950     | 0,950     | 0,975     | 0,950     |
| $\beta_2$                                      | 0,997     | 0,970     | 0,930     | 0,997     |
| <i>Dossel</i>                                  |           |           |           |           |
| $c_{hs}$ (J m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ) | 2,63e+04  | 2,109e+05 | 1,250e+04 | 1,250e+04 |
| $c_{hu}$ (J m <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ) | 2,109e+03 | 8,436e+03 | 2,109e+03 | 2,109e+03 |

$z_{top}$ : altura da vegetação do dossel superior.  $z_{bot}$ : altura da vegetação do dossel inferior.  $\beta_1$ : define o padrão de distribuição das raízes do dossel inferior.  $\beta_2$ : define o padrão de distribuição das raízes do dossel superior.  $c_{hs}$ : capacidade térmica dos galhos.  $c_{hu}$ : capacidade térmica das folhas.

A altura do dossel superior ( $z_{top}$ ) da floresta na região de Tanguro foi medida no experimento de Balch et al. (2008). De acordo com Balch et al. (2008) a floresta nessa região é típica de transição com altura de  $20 \pm 1$  m. A altura do dossel inferior

( $z_{bot}$ ) foi estimada como 40% da altura do dossel superior, mantendo a proporção utilizada para essas alturas nos valores padrão do modelo. Já para se definir as alturas para o cerrado foi necessário consultar a literatura. De acordo com Coutinho (1978) e Oliveira et al. (2005) a média da altura da vegetação de cerradão e cerrado *sensu stricto* é de aproximadamente 7 m de altura. Para a região estudada o dossel inferior possui cerca de 1 m. Nesse trabalho a altura máxima do dossel inferior para a soja permaneceu com o valor padrão do modelo, de 0,75 m. Na Fazenda Tanguro a pastagem é formada pela gramínea *Brachiaria Brizantha* (SCHEFFLER et al., 2011) e, embora essa forrageira possa atingir mais de 1 metro de altura, para alimentação animal é recomendado que a entrada do gado na área ocorra quando a gramínea atinge altura entre 50 - 60 cm. Por se considerar que a pastagem é plantada na região do Alto Xingu para alimentação animal, foi definida a altura de 0,6 metros para altura do dossel inferior dessa cobertura.

Quanto mais próximo da unidade forem os parâmetros  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , mais uniforme é a distribuição das raízes no perfil do solo. Para floresta, pastagem e soja foram mantidos os valores padrões dos modelos para a distribuição das raízes do dossel superior ( $\beta_2$ ) e inferior ( $\beta_1$ ). Para a cobertura de cerrado  $\beta_1$  e  $\beta_2$  foram definidos de acordo com a literatura, que indica que a maior parte do sistema radicular nesse bioma está no primeiro metro de solo.

Nas simulações foram mantidos os valores originais da capacidade térmica dos galhos ( $c_{hs}$ ) e folhas ( $c_{hu}$ ) para floresta que foram medidos por Michiles (2005). De acordo com esse estudo a massa e o calor específico representativos das características médias dos galhos e folhas de uma floresta em Manaus foram, respectivamente, 11,88 kg m<sup>-2</sup> e 2400,4 J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>. Assim a capacidade térmica de folhas e galhos é próxima de 28,5 x 10<sup>3</sup> J m<sup>-2</sup> °C<sup>-1</sup>. É possível supor que a capacidade

térmica das folhas e galhos devem ser maiores no cerrado que na floresta devido à sua fisiologia e fenologia. Os valores de  $c_{hu}$  e  $c_{hs}$  calibrados pela equipe de desenvolvimento do modelo para uma floresta próximo ao km 67 da rodovia Cuiabá-Santarém e que estão contidos na documentação do modelo InLand, foram utilizados para o cerrado por serem os valores mais altos desses parâmetros já documentados. Para soja foram mantidos os valores originais do modelo, que também foram utilizados para pastagem.

Nos dois modelos a temperatura do solo foi inicializada como a média da temperatura do ar no período de simulação. A profundidade do solo nos modelos InLand e AgroIBIS foram de 8 m, divididas em 6 camadas. Nos dois modelos, a condição de contorno  $b_{perm}$  foi definida como 0,01. Os solos da Fazenda Tanguro são classificados como Latossolo vermelho-amarelo distrófico (PROJETO RADAMBRASIL, 1981), com textura média de 55% de areia, 2% de silte e 43% de argila, texturalmente classificados como argilo-arenosos (OLIVEIRA et al., 1992).

### **3.6.2. Características hidráulicas do solo**

Os modelos necessitam dos parâmetros porosidade, capacidade de campo, ponto de murcha, expoente “b” de Campbell, potencial de entrada de ar e condutividade hidráulica saturada como dados de entrada.

A condutividade hidráulica saturada ( $K_S$ ) na profundidade de 12,5 cm foram medidas por Scheffler et al. (2011) com um permeâmetro de carga constante conhecido como *Amoozometer*. De acordo com os autores, era esperado que na profundidade de 12,5 cm pudessem ser identificadas mudanças na característica dos solos devido ao pisoteio animal e gradagem.

De acordo com esse estudo, os valores de  $K_S$  medidos foram  $1,565 \times 10^{-4}$ ,  $2,781 \times 10^{-5}$  e  $3,189 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  para, respectivamente, floresta, pastagem e soja. Para as simulações de cerrado foi utilizada a mesma  $K_S$  medida em ambiente de floresta, o que é uma boa aproximação da realidade já que o cerrado também é um ecossistema natural.

Como somente a  $K_S$  foi medida em campo houve a necessidade de se empregar métodos empíricos para determinação das outras características hidráulicas a partir da textura do solo. Neste trabalho comparou-se como três diferentes metodologias para estimativa das propriedades hidráulicas podem influenciar as respostas de vazão e evapotranspiração para as coberturas de floresta, cerrado, pastagem e soja em solo classificado como argilo-arenoso, que são os solos encontrados na Fazenda Tanguro.

As metodologias analisadas foram: o banco de dados que hoje compõe os modelos InLand e AgroIBIS baseado no trabalho de Campbell e Norman (1998), as equações de Cosby et al. (1984) e de Clapp e Hornberger (1978). No Anexo A estão apresentadas as equações de Cosby et al. (1984) e de Clapp e Hornberger (1978), daqui para frente referenciadas como CCH. Com essas três metodologias foram realizadas quatro simulações empregando:

- (A) Todos os parâmetros calculados utilizando as equações de CCH para o solo argilo-arenoso;
- (B) A  $K_S$  medida em campo por Scheffler et al. (2011) e demais parâmetros calculados utilizando as equações de CCH para o solo argilo-arenoso;
- (C) Todos os parâmetros de acordo com o banco de dados de Campbell e Norman (1998) para o solo argilo-arenoso;

(D) A  $K_s$  medida em campo por Scheffler et al. (2011) e demais parâmetros de acordo com Campbell e Norman (1998) para o solo argilo-arenoso.

Essas simulações são citadas neste texto como A, B, C e D na ordem que foram apresentadas anteriormente e os valores das características hidráulicas dos solos utilizados em cada uma das quatro simulações estão descritos na Tabela 3. Ao se comparar com os dados de campo, a metodologia que melhor representou o particionamento da precipitação em evapotranspiração e vazão, foi a escolhida para ser utilizada nas simulações que analisaram a influência da cobertura vegetal nesses componentes do ciclo hidrológico.

Tabela 3: Parâmetros hidráulicas do solo argilo-arenoso utilizadas nas simulações A, B, C e D

| Simulação | Cobertura            | $\Theta_s$ | $\Theta_{fc}$ | $\Theta_{wp}$ | b   | $\Psi_e$ | $K_s$                  |
|-----------|----------------------|------------|---------------|---------------|-----|----------|------------------------|
| A         | Todas as coberturas  | 0,411      | 0,284         | 0,194         | 9,7 | 0,18     | $4,638 \times 10^{-6}$ |
| B         | Floresta/<br>Cerrado | 0,411      | 0,242         | 0,194         | 9,7 | 0,18     | $1,565 \times 10^{-4}$ |
|           | Pastagem             | 0,411      | 0,262         | 0,194         | 9,7 | 0,18     | $2,781 \times 10^{-5}$ |
|           | Soja                 | 0,411      | 0,260         | 0,194         | 9,7 | 0,18     | $3,189 \times 10^{-5}$ |
| C         | Todas as coberturas  | 0,430      | 0,339         | 0,239         | 6,0 | 0,29     | $3,333 \times 10^{-7}$ |
| D         | Floresta/<br>Cerrado | 0,430      | 0,339         | 0,239         | 6,0 | 0,29     | $1,565 \times 10^{-4}$ |
|           | Pastagem             | 0,430      | 0,339         | 0,239         | 6,0 | 0,29     | $2,781 \times 10^{-5}$ |
|           | Soja                 | 0,430      | 0,339         | 0,239         | 6,0 | 0,29     | $3,189 \times 10^{-5}$ |

Onde  $\Theta_s$ , porosidade ( $m^3 m^{-3}$ );  $\Theta_{fc}$ , teor de umidade à capacidade de campo ( $m^3 m^{-3}$ );  $\Theta_{wp}$ , teor de umidade no ponto de murcha permanente ( $m^3 m^{-3}$ ); b, o expoente “b” de Campbell;  $\Psi_e$ , o potencial de entrada de ar ( $m H_2O$ ); e  $K_s$ , condutividade hidráulica do solo ( $m s^{-1}$ ).

### **3.7. VALIDAÇÃO DOS MODELOS**

Para avaliar a capacidade do modelo em simular a vazão média da rede fluvial, que é a soma do escoamento superficial e escoamento subterrâneo, para os sítios de floresta e soja, os valores médios de vazão simulados com textura de solo argilo-arenoso foram comparados aos dados fluviométricos medidos em campo para o período entre 01 de setembro de 2008 e 31 de agosto de 2010. Cada microbacia possui uma vazão média observada para o período analisado, então foram considerados como respostas satisfatórias do modelo quando os valores simulados que se situavam dentro do intervalo de variação da vazão média observadas nas microbacias para um dado uso do solo.

#### **3.7.1. Análise da influência do dia de inicialização**

As inúmeras falhas existentes nos dados de entrada entre 1º de janeiro de 2007 e 22 de fevereiro de 2008 foram preenchidas utilizando a precipitação estimada pelo produto PERSIANN e a metodologia de Senna (2004) orientada pelas correlações entre os dados das EMAs de Gaúcha do Norte, Querência e Água Boa e os dados meteorológicos da EMA de Tanguro.

Nas simulações feitas durante a condução deste trabalho, o período entre o 1º de janeiro de 2007 e 1º de setembro de 2008 foi utilizado para inicialização do modelo e, portanto, foi descartado das análises. Porém a fim de se avaliar o erro cometido ao utilizar a metodologia de Senna (2004) e o produto PERSIANN no primeiro ano de simulação no período que os dados foram analisados (entre 1º de

setembro de 2008 e 31 de dezembro de 2010), foram feitas duas simulações para as coberturas de floresta, cerrado, pastagem e soja em solo argilo-arenoso.

A primeira simulação foi iniciada em 1º de janeiro de 2007. Na segunda, a simulação foi iniciada no dia 22 de fevereiro de 2008. Ambas as simulações foram executadas até o dia 31 de dezembro de 2010 e as médias para escoamento total simulado de cada cobertura foram calculadas para o período de 1º de setembro de 2008 a 31 de agosto de 2010. Utilizando as coberturas como repetições e as duas simulações com diferentes datas de inicialização como tratamentos, foi feito um teste t de Student a 5% de significância a fim de avaliar se a utilização das estimativas no ano utilizado para inicialização do modelo alterou significativamente a resposta do modelo nos anos analisados.

### **3.8. ANÁLISE DO EFEITO DA MUDANÇA NO USO DO SOLO NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E VAZÃO**

Os dados simulados nos modelos InLand e AgroIBIS entre o 1º de janeiro de 2007 e 1º de setembro de 2008 foram descartados por abranger o período necessário para que as variáveis do modelo atinjam o equilíbrio (“*spin-up*”). Para os demais anos hidrológicos, de 1º de setembro de 2008 a 31 de agosto de 2010, os valores médios de vazão e evapotranspiração de cada uso de solo foram comparados a fim de se compreender como a substituição de ecossistemas naturais por ecossistemas agrícolas afetam os componentes do balanço hídrico.

Também foram analisadas as influências da conversão dos ecossistemas naturais em ecossistemas agrícolas na separação do escoamento total em escoamento superficial direto e subterrâneo. Para isso foram analisadas tanto a separação obtida

por meio das simulações nos modelos de superfície quanto a obtida a partir dos dados fluviométricos diários no SepHidro.

### 3.9. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de se produzir repetições para que uma análise estatística fosse conduzida com um número relevante de dados, foram realizadas simulações utilizando 11 solos do triângulo de grupamento textural (Figura 7). Todas as propriedades de todos os solos foram calculadas segundo a metodologia que melhor representou os dados observados de vazão média entre as simulações A e C – que não empregaram  $K_S$  medida em campo porque não há  $K_S$  medido para todos os tipos de solo e todas as coberturas.

A análise de variância (ANOVA) foi conduzida com Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) sendo que as coberturas do solo foram os tratamentos e as classes texturais de solo, as repetições. Ao fim da ANOVA foi feito o teste de Tukey para comparar os grupos de tratamentos entre si.

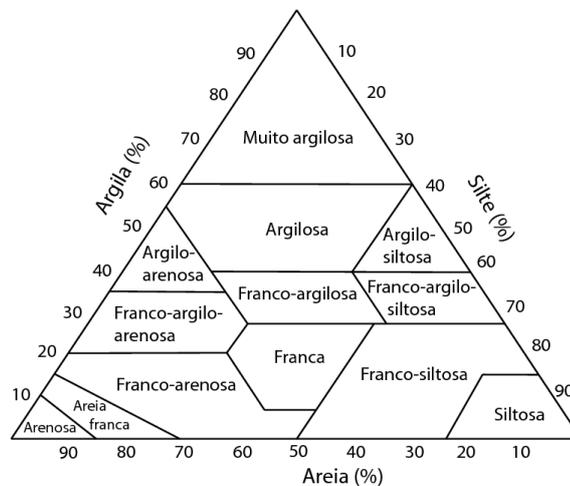


Figura 7: Triângulo de grupamento textural de solos (Lemos e Santos, 1984)

### **3.10. INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO NO EFEITO DA MUDANÇA NA COBERTURA VEGETAL**

Em uma mesma bacia pode haver diferentes tipos de solos e solos com diferentes características hidráulicas. Com as simulações utilizando diferentes classes texturais de solos, além de testar estatisticamente o escoamento total médio das diferentes coberturas, foi possível também comparar os valores de vazão das coberturas vegetais também em diferentes classes texturais de solos. Também foi conduzida uma análise de sensibilidade do modelo InLand a diferentes valores de  $K_S$  nas cobertura de floresta e cerrado. Variou-se apenas a  $K_S$  entre de  $3,33 \times 10^{-7}$  (valor estimado por Campbell e Norman (1998) para solo argilo-arenoso) a  $1,6 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  (valor medido em campo na Fazenda Tanguro para cobertura de floresta por Scheffler et al.(2011)) e observou-se a resposta do escoamento total médio a essa variação.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ANÁLISE DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS

Na Tabela 4 estão apresentados os escoamentos totais médios observados ( $R_{obs}$ ) para dois anos hidrológicos, no período de setembro de 2008 a agosto de 2010, para as microbacias de floresta e soja na Fazenda Tanguro. Nesse período a precipitação foi de 1300,6 mm ano<sup>-1</sup>.

Tabela 4: Escoamento total médio observado ( $R_{obs}$ ) em mm ano<sup>-1</sup>, coeficiente de escoamento (C) e área de cinco bacias com cobertura de soja e três com cobertura de floresta na Fazenda Tanguro. Soja 1 são as microbacias de primeira ordem; Soja 2 é a bacia de segunda ordem

| <b>Cobertura</b>  | <b><math>R_{obs}</math></b> | <b>C</b> | <b>Área (km<sup>2</sup>)</b> |
|-------------------|-----------------------------|----------|------------------------------|
| <b>Soja 1a</b>    | 611,37                      | 0,47     | 3,30                         |
| <b>Soja 1b</b>    | 731,22                      | 0,56     | 2,51                         |
| <b>Soja 1c</b>    | 533,48                      | 0,41     | 2,51                         |
| <b>Soja 1d</b>    | 488,22                      | 0,37     | 3,93                         |
| <b>Soja 2</b>     | 796,39                      | 0,61     | 27,5                         |
| <b>Floresta a</b> | 326,20                      | 0,25     | 6,73                         |
| <b>Floresta b</b> | 40,89                       | 0,03     | 1,35                         |
| <b>Floresta c</b> | 55,58                       | 0,04     | 4,89                         |

O volume de água que passou pelas seções monitoradas com cobertura de Floresta chama a atenção pela grande variabilidade entre as bacias. Nessas microbacias o escoamento total médio anual variou de 40,89 a 326,20 mm ano<sup>-1</sup> e o coeficiente de escoamento, de 0,03 a 0,25.

Duas possíveis explicações para essa variabilidade são a fuga de água e o fluxo entre bacias. As águas transportadas no curso d'água provem de duas bacias distintas. O divisor topográfico define a área da bacia hidrográfica responsável pelo escoamento superficial, já o divisor freático, determinado pela estrutura geológica, direciona o escoamento subterrâneo. Em geral esses dois divisores são aproximadamente coincidentes. Porém quando esses dois divisores não coincidem diz-se que há fuga de água da bacia, sendo que o volume de água que não foi medido em determinada seção transversal do rio poderá ser detectada a jusante ou, no caso de fluxo entre bacias, nas vazões das microbacias vizinhas. Hayhoe et al. (2011) discutem a possibilidade de haver fuga de água ou fluxo entre bacias em Tanguro ao observar que na microbacia com soja de segunda ordem (Soja 2) a vazão média anual é 1,7 vezes maior que a média da vazão média anual das microbacias de primeira ordem no ano hidrológico de setembro de 2007 a agosto de 2008.

Por outro lado, microbacias com áreas maiores tem pontos de amostragem mais à jusante e deveriam representar melhor a vazão em caso de fuga ou fluxo de água entre bacias (HAYHOE et al., 2011). Por isso, existe também a possibilidade das medições em campo representarem realmente a água produzida nas microbacias uma vez que a área média das microbacias de floresta é maior que a área média das microbacias de 1ª ordem com soja. Além disso, baixos coeficientes de escoamento já foram encontrados em outros estudos na região Amazônica, em especial na região do arco do desmatamento. Na área experimental de Moraes et al. (2006), no nordeste do

Pará, o coeficiente de escoamento foi 0,032. Já em Rondônia foram encontrados coeficientes de escoamento de 0,008 e 0,013 por, respectivamente, Chaves et al. (2008) e Germer et al. (2009).

A ocorrência ou não de fuga de água ou fluxo entre bacias é uma das incertezas nos trabalhos realizados na Fazenda Tanguro, no Alto Xingu. Se existe fuga ou fluxo de água entre bacias, o efeito da mudança na cobertura vegetal na vazão está sendo subestimada nas medições em campo. Porém, a fim de se validar os modelos, nesse trabalho considerou-se que toda a água produzida na bacia pôde ser monitorada na parte experimental.

#### **4.2. ESCOLHA DO MELHOR CONJUNTO DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO**

Utilizando as equações de CCH observa-se que maior porcentagem da precipitação é destinada à evapotranspiração do que quando a metodologia de Campbell e Norman (1998) é utilizada (Figura 8). Comparando-se as simulações A e C nota-se que, além da simulação A apresentar maior evapotranspiração, a simulação A também possui menor escoamento total e menor armazenamento de água no solo ( $ds/dt$ ).

Quanto às diferenças no particionamento do escoamento total, enquanto nas simulações com as características dos solos segundo Campbell e Norman (1998) prevalecem o escoamento superficial, utilizando as equações de CCH o escoamento subterrâneo é favorecido na simulação. Isso porque os valores estimados de  $K_s$  e expoente “b” por meio das equações de CCH são maiores que os sugeridos por Campbell e Norman (1998).

Quando se inclui nas simulações A e C os valores de  $K_s$  medidos em campo – configuração das simulações B e D – observa-se aumento da evapotranspiração, redução no escoamento total e redução no  $ds/dt$ , tanto na simulação B como na simulação D em relação às simulações A e C, respectivamente. Quanto ao particionamento do escoamento total em escoamento superficial e subterrâneo o que se observa é que há redução no escoamento superficial em concordância com as afirmações de Neill et al. (2013), em que os autores explicam que, em solos com boa capacidade de infiltração e alta condutividade hidráulica como os da Fazenda Tanguro o escoamento subterrâneo, corresponde a até 95% do escoamento total.

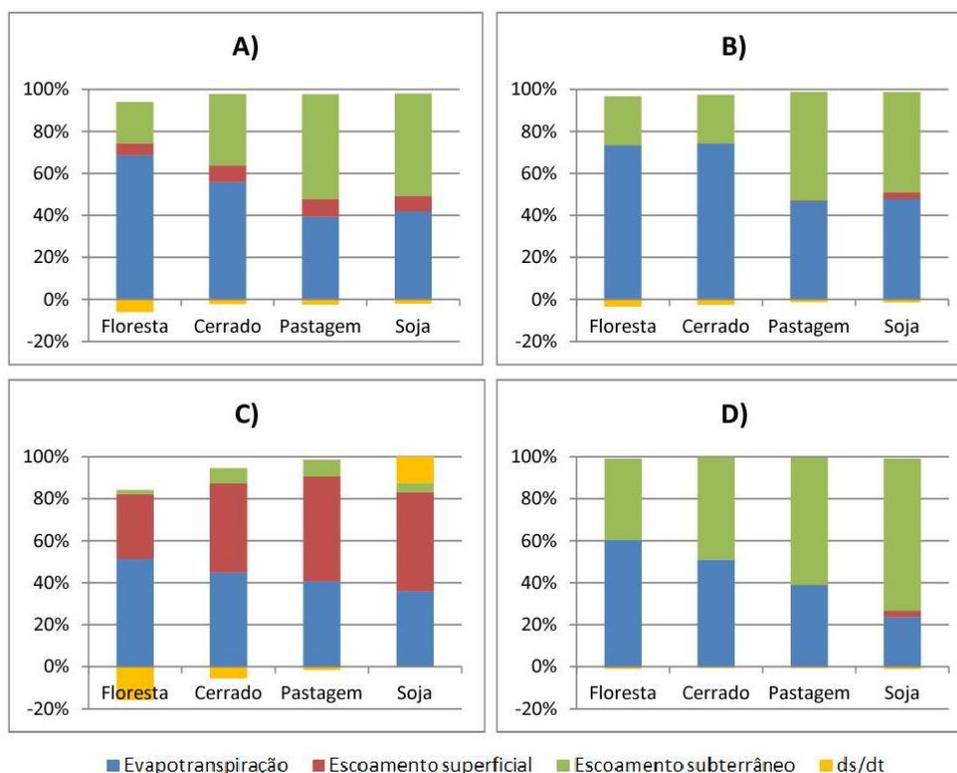


Figura 8: Balanço hídrico simulado com diferentes características hidráulicas dos solos. Simulações utilizando A) todos os parâmetros de solo calculados utilizando as equações de CCH B) a  $K_s$  medida em campo por Scheffler et al. (2011) e demais parâmetros calculados utilizando as equações de CCH; C) todos os parâmetros de acordo com o banco de dados de Campbell e Norman (1998); e D) a  $K_s$  medida em campo por Scheffler et al. (2011) e demais parâmetros de acordo com Campbell e Norman (1998).

Dentre as características hidráulicas que influenciam o movimento de água no solo a condutividade hidráulica saturada ( $K_S$ ) se destaca por caracterizar a facilidade com que a água se movimenta no solo em condições de saturação. Pode-se afirmar que maiores valores de  $K_S$  em geral são encontrados juntamente com os maiores valores de porosidade  $e$ , por isso, modelos foram propostos para estimar características hidráulicas em meio poroso homogêneo (MESQUITA e MORAES, 2004). Embora exista correlação entre a textura e as características hidráulicas, diversos fatores podem influenciar na estrutura do solo como o processo de gênese, os minerais que formam o solo e o teor de matéria orgânica. No meio agropecuário, as práticas de manejo do solo também alteram a estrutura do solo aumentando ou reduzindo as macro e microporosidades.

Brandão et al. (2003) explicam que para solos formados sob condições de clima tropicais, a estrutura pode exercer influência muito maior nas características hidráulicas do solo do que a textura. Isso ocorre porque os solos tropicais são altamente lixiviados apresentam altas concentrações de Fe e Al, que funcionam como agentes cimentantes e mantêm estável a estrutura dos agregados. Por isso, na Fazenda Tanguro embora o solo seja de textura argilosa as características hidráulicas do solo são mais semelhantes ao que nos modelos e experimentos conduzidos em clima temperado são tratados como solos com textura arenosa.

Por esses motivos as simulações utilizando apenas as equações empíricas para se estimar as características do solo não apresentaram resultados de escoamento total médio próximos aos observados. A simulação em que o resultado de escoamento total médio foi mais próximo ao observado foi a que utilizava a  $K_S$  medida em campo e as equações de CCH para estimar as demais características do solo.

Na Figura 9 estão apresentados os escoamentos totais médios resultantes das simulações ( $R_s$ ) A, B, C e D bem como os  $R_{obs}$  das microbacias monitoradas. Os menores escoamentos totais médios foram obtidos nas condições da simulação B para todas as coberturas vegetais. Observa-se que os menores escoamentos totais médios simulados nas condições B são os valores que mais se aproximam da média dos escoamentos totais médios observados ( $\bar{R}$ ) nas microbacias. Por esse motivo, todas as simulações de validação e análise do efeito da mudança na cobertura vegetal na vazão e evapotranspiração foram realizadas utilizando as condições da simulação B.

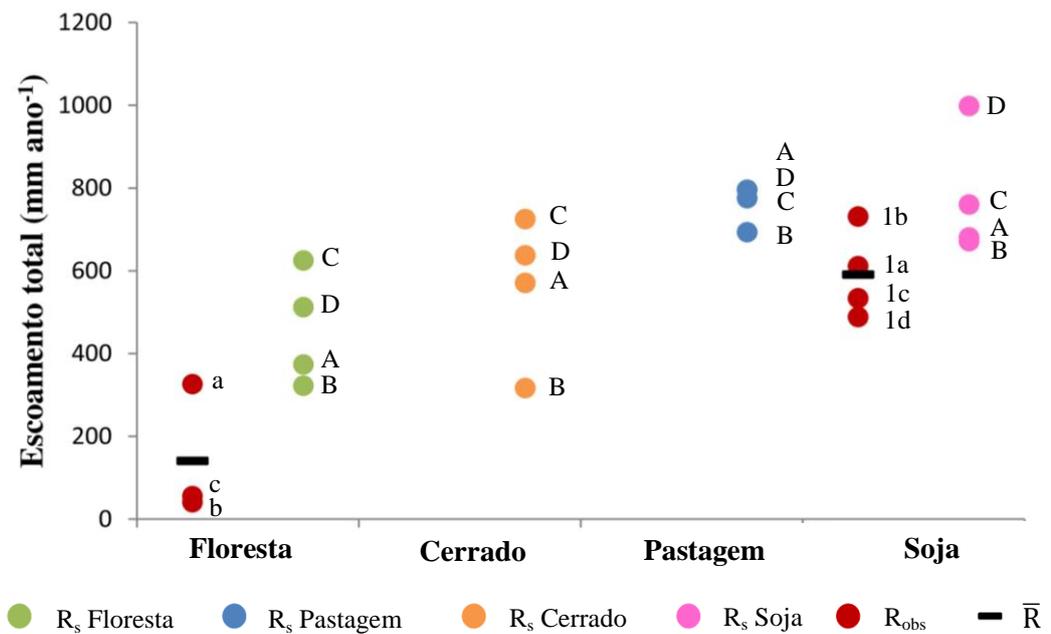


Figura 9: Escoamentos totais médios observados nas diferentes microbacias ( $R_{obs}$ ), média de  $R_{obs}$  ( $\bar{R}$ ) e escoamentos totais médios simulados para cada cobertura ( $R_s$ ) com as quatro diferentes condições de características hidráulicas do solo argilo-arenoso. Os índices minúsculos ao lado dos símbolos são referências às microbacias com cobertura de Floresta e Soja (Figura 6) e os índices maiúsculos, as simulações com diferentes conjuntos de parâmetros hidráulicos.

### 4.3. VALIDAÇÃO DOS MODELOS

O  $\bar{R}$  para a cobertura de floresta foi de 140,89 mm ano<sup>-1</sup>, e para a cobertura de soja, 591,07 mm ano<sup>-1</sup>. Os valores dos escoamentos totais médios simulados para floresta e soja foram, respectivamente, 322,49 e 680,79 mm ano<sup>-1</sup>, que são a média para os dois anos hidrológicos entre setembro de 2008 e agosto de 2010. Quando se compara os escoamentos totais médios simulados com a  $\bar{R}$ , observa-se que os valores simulados superestimam a  $\bar{R}$  das coberturas de floresta e soja. Porém os modelos InLand e AgroIBIS foram capazes de gerar respostas que estão dentro do intervalo de variação dos valores de  $R_{obs}$  (Figura 10), o que para este trabalho será considerado como satisfatório.

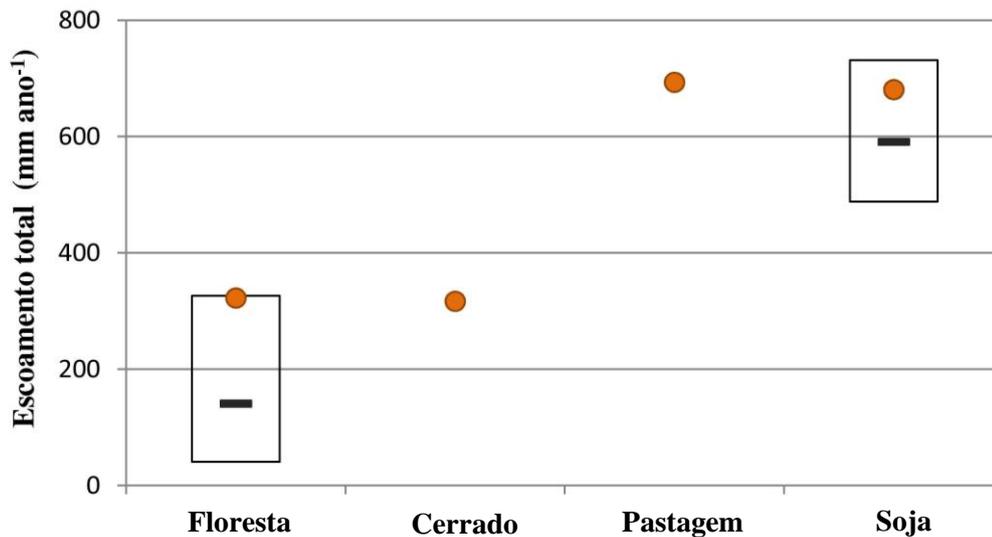


Figura 10: Escoamentos totais médios entre setembro de 2008 e agosto de 2010. A parte superior do retângulo representa o valor da microbacia com maior escoamento total observado, a parte inferior, o valor da microbacia com menor escoamento total observado e o traço representa a média de todos os valores observados nas microbacias. Os escoamentos totais foram simulados (círculos) nos modelos InLand e AgroIBIS para Floresta, Cerrado, Soja e Pastagem.

Em razão das respostas consideradas satisfatórias dos modelos para as coberturas de floresta e soja é possível que o modelo InLand seja capaz também de simular valores próximos à realidade de escoamento total médio para coberturas de cerrado e pastagem. Por isso, mesmo não possuindo dados de campo para validar as simulações, as respostas dos modelos para coberturas de Cerrado e pastagem foram analisadas.

#### 4.3.1. Influência do dia de inicialização

No teste estatístico utilizando as coberturas vegetais como repetições e as duas simulações com diferentes datas de início como tratamentos, o p-valor do teste t de Student foi igual a 0,180, o que a 5% de significância revela que utilizar o método de Senna (2004) e o produto PERSIANN no período utilizado para inicialização do modelo não alterou significativamente a resposta do modelo nos anos analisados. Portanto, não há impedimento na utilização dos dados meteorológicos iniciando em 1º de janeiro de 2007. Na Tabela 5 estão apresentados os resultados das simulações para escoamento total médio em solo argilo-arenoso.

Tabela 5: Resultados do escoamento total médio ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) das simulações iniciando em 1º de janeiro de 2007 ( $R_1$ ) e em 22 de fevereiro de 2008 ( $R_2$ )

|                 | <b>R<sub>1</sub></b><br><i>Início em</i><br><i>1/1/2007</i> | <b>R<sub>2</sub></b><br><i>Início em</i><br><i>22/02/2008</i> | <b>R<sub>2</sub> - R<sub>1</sub></b> |
|-----------------|---|---|--------------------------------------|
| <b>Floresta</b> | 322,49  | 325,12  | 2,63                                 |
| <b>Cerrado</b>  | 316,81  | 319,06  | 2,25                                 |
| <b>Pastagem</b> | 693,40  | 693,27  | -0,13                                |
| <b>Soja</b>     | 680,78  | 680,95  | 0,17                                 |

É importante que um trabalho sobre os componentes do ciclo hidrológico analise vários anos hidrológicos para que com a ocorrência de anos mais chuvosos e

de anos menos chuvosos a variação do armazenamento de água no solo seja próximo a zero. Para que fosse possível a análise de dois anos hidrológicos sem a influência dos valores iniciais de umidade do solo foram utilizados os dados do produto PERSIANN, sobretudo no ano que foi utilizado para inicialização do modelo. No entanto a utilização do produto PERSIANN no período de inicialização não influenciou na resposta dos modelos.

O modelo é inicializado com valores médios de umidade do solo. Aparentemente o escoamento superficial na bacia amazônica se dá quando a capacidade de acumulação de água no solo é ultrapassada devido à redução da taxa de infiltração a medida que se aumenta a profundidade das camadas de solo, como foi mostrado nos estudos de Elsenbeer e Vertessy (2000), Moraes et al. (2006) e Wickel et al. (2008). Dessa forma, uma vez que o modelo é inicializado no período chuvoso rapidamente a capacidade máxima de armazenamento de água é atingida e a umidade do solo passa a ser calculada a partir do balanço hídrico. Em geral, a cada final de ano hidrológico a razão entre as entradas e saídas de água do solo é próxima à igualdade e, caso haja déficit de água no solo, já nas primeiras ocorrências de precipitação do próximo ano hidrológico esse déficit é compensado. Assim, a diferença da água armazenada no solo pode afetar o particionamento nos primeiros eventos de precipitação, mas não afeta de forma significativa no balanço hídrico de todo o próximo ano hidrológico.

Por outro lado a estimativa da radiação de onda longa pode influenciar nos resultados por ser uma componente do saldo de radiação que é importante para o cálculo da evapotranspiração. Uma inconveniência das equações que podem estimar  $L_{in}$  a partir das variáveis meteorológicas que foram medidas na EMA em Tanguro, como Brunt (1932), Swinbank (1963), Idso e Jackson (1969), Brutsaert (1975),

Satterlund (1979), Idso (1981) e Prata (1996), é que elas são válidas apenas para condições de céu claro. Porém, nesse trabalho a equação de Idso (1981) foi utilizada para todos os dias do período de simulação sem distinção das condições de tempo. No entanto não há o que impeça que os dados sejam analisados qualitativamente quanto à diferença no comportamento do balanço hídrico devido às modificações na cobertura vegetal de uma bacia hidrográfica, já que todas as simulações feitas nesse trabalho estão influenciadas da mesma forma pelos erros que essa estimativa possa causar.

#### **4.4. EFEITOS DA MUDANÇA NO USO DO SOLO NA VAZÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO**

Os valores simulados no período de setembro de 2008 a agosto de 2010 para vazão média nas coberturas de floresta e cerrado foram, respectivamente, 322,49 e 316,81 mm ano<sup>-1</sup> (Tabela 6). Já para pastagem e soja os valores simulados foram, respectivamente, 693,48 e 680,78 mm ano<sup>-1</sup>. A precipitação média do período analisado foi de 1300,6 mm ano<sup>-1</sup> e as porcentagens da precipitação destinadas ao escoamento total, a evapotranspiração e a mudança no armazenamento de água (ds/dt) no solo estão apresentados na Figura 11.

Os coeficientes de escoamento, considerando o escoamento total simulado e a precipitação do período analisado, para cobertura de floresta, cerrado, pastagem e soja foram respectivamente 0,25, 0,24, 0,53 e 0,52. Nota-se que nas coberturas de floresta e cerrado os coeficientes de escoamentos totais foram menores que nas coberturas de pastagem e soja.

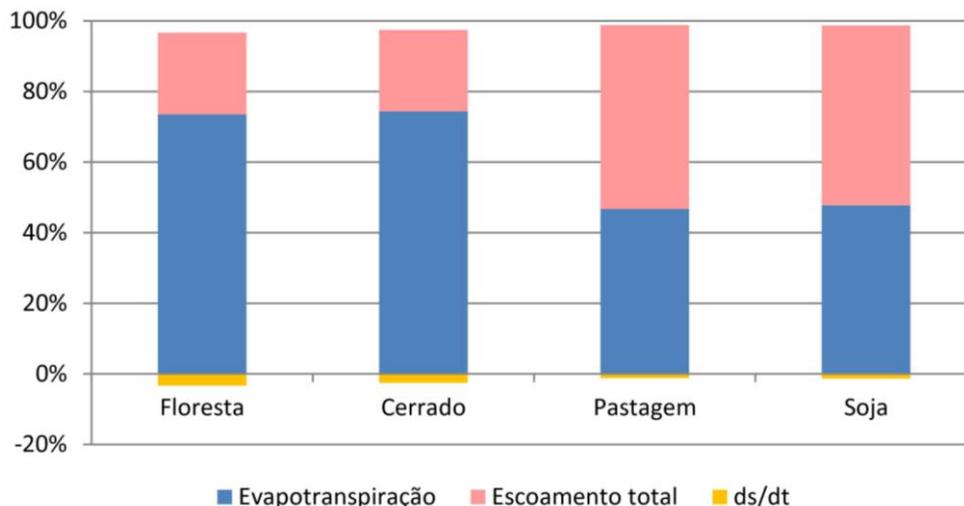


Figura 11: Particionamento da precipitação em evapotranspiração, escoamento total (vazão) e mudança no armazenamento de água do solo (ds/dt). Valores negativos de ds/dt indicam que a umidade do solo diminuiu no período analisado em relação a umidade inicial do solo.

Tabela 6: Médias dos resultados das simulações entre setembro de 2008 e agosto de 2010 para evapotranspiração e escoamento total, em mm ano<sup>-1</sup>

|                 | <b>Evapotranspiração</b> | <b>Escoamento total</b> |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Floresta</b> | 1024,73                  | 322,49                  |
| <b>Cerrado</b>  | 1018,67                  | 316,81                  |
| <b>Pastagem</b> | 623,21                   | 693,40                  |
| <b>Soja</b>     | 637,24                   | 680,78                  |

Os resultados das simulações realizadas para floresta, cerrado, pastagem e soja concordam que as mudanças na cobertura vegetal levam a alterações na quantidade de água produzida por uma bacia hidrográfica, que é a soma do escoamento superficial com o escoamento subterrâneo, por perturbar o particionamento da precipitação em evapotranspiração, escoamento superficial e escoamento subterrâneo (COSTA e FOLEY, 1997; FOLEY et al., 2005; D'ALMEIDA et al., 2007; COE et al., 2009; DAVIDSON et al., 2012). O escoamento total médio nos ecossistemas naturais foi 53,5% menor que os simulados para os ecossistemas agrícolas. Isso é o mesmo que dizer que a substituição da

vegetação natural por agricultura aumenta em aproximadamente 115% a vazão média anual na região do Alto Xingu.

Regionalmente a conclusão de que há aumento de 115% no escoamento total pela substituição do ecossistema natural pelo agrícola é importante porque provavelmente quando diversas microbacias passam por alteração na cobertura vegetal, as consequências do aumento na produção de água podem ser detectados na forma de alterações no regime de fluxo e na disponibilidade hídrica da macrobacia que compreende essas microbacias, como foi detectado por Costa et al. (2003) e Coe et al. (2009). A disponibilidade hídrica é essencial para a manutenção da vegetação natural remanescente, para o abastecimento humano e na produtividade agrícola e, por isso, estudos que possam auxiliar na gestão dos recursos hídricos são sempre muito importantes.

Quanto ao particionamento do escoamento total em escoamento superficial e subterrâneo (Figura 12), observa-se que o escoamento superficial foi maior nos

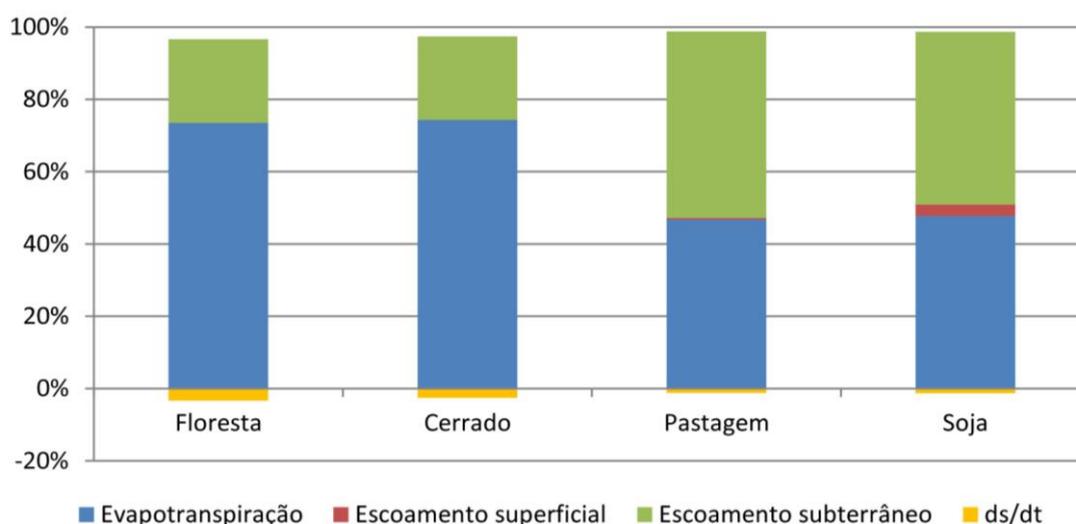


Figura 12: Particionamento da precipitação em evapotranspiração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo e mudança no armazenamento de água no solo (ds/dt). Valores negativos de ds/dt significam que a umidade do solo diminuiu no período analisado.

ecossistemas agrícolas – respectivamente 5,53 e 43,17 mm ano<sup>-1</sup> para pastagem e soja – que nos ecossistemas naturais – respectivamente 0,15 e 0,18 mm ano<sup>-1</sup> para floresta e cerrado. Na simulação com cobertura de floresta o escoamento subterrâneo representa 99,95% do escoamento total. Já para a cobertura de soja o escoamento subterrâneo representa 93,6% do escoamento total, o que é uma percentagem próxima aos 95% que foi estimado por Neill et al. (2013) para a região da Fazenda Tanguro.

A retirada da cobertura vegetal influencia diretamente na infiltração de água no solo e no particionamento do escoamento total em escoamento superficial e subterrâneo. Uma vegetação mais densa, como a da floresta tropical e do cerrado, é capaz interceptar parte da precipitação (MORAES et al., 2006; TOMASELA et al., 2008; BÄSE et al., 2012) e de atenuar a velocidade com que as gotas de chuva caem sobre o solo. Quando as gotas caem sobre o solo em grande velocidade pode ocorrer o selamento superficial, reduzindo a infiltração e aumentando o escoamento superficial. Além disso, a maneira como essa vegetação é retirada e o manejo do solo são importantes. A utilização de máquinas e abertura de estradas para desmatamento são causas de compactação do solo. Na agropecuária o adensamento do solo ocorre principalmente pelo pisoteio do gado e pela utilização de maquinário agrícola (MESQUITA e MORAES, 2004). Assim, em geral, a conversão de ecossistemas naturais para ecossistemas agrícolas implica em aumento no escoamento superficial, o que é preocupante por acarretar grandes problemas ambientais como a erosão e perda de nutrientes do solo.

O que se observa pelos resultados apresentados na Figura 12, no entanto, é um aumento no escoamento total na vegetação de pastagem e soja em relação à

vegetação de floresta e cerrado com grande aumento no escoamento subterrâneo e pouco aumento no escoamento superficial.

De acordo com os resultados da separação do escoamento total em escoamento superficial direto e escoamento subterrâneo obtidos com o SepHidro os escoamentos superficiais médios foram 8,42 mm ano<sup>-1</sup> e 37,441 mm ano<sup>-1</sup> para, respectivamente, as coberturas de floresta e soja no período entre 1º de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2010 (Tabela 7). Esses valores foram obtidos por média de todas as microbacias de primeira ordem monitoradas para cada cobertura e confirmam os valores obtidos nas simulações com os modelos de superfície, porém o volume de escoamento superficial variou entre as microbacias.

Tabela 7: Escoamento superficial e escoamento subterrâneo médios para o período de janeiro de 2009 a dezembro de 2010 obtido pelo método dos mínimos locais no SepHidro, em mm ano<sup>-1</sup>.

|                   | <b>Escoamento Total</b> | <b>Escoamento Superficial</b> | <b>Escoamento Subterrâneo</b> |
|-------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <b>Soja 1a</b>    | 621,45                  | 11,77                         | 609,68                        |
| <b>Soja 1b</b>    | 633,60                  | 118,91                        | 514,69                        |
| <b>Soja 1c</b>    | 817,04                  | 15,54                         | 804,77                        |
| <b>Soja 1d</b>    | 496,52                  | 3,38                          | 493,14                        |
| <b>Soja 2</b>     | 777,94                  | 62,47                         | 715,46                        |
| <b>Floresta a</b> | 318,88                  | 18,54                         | 300,34                        |
| <b>Floresta b</b> | 36,89                   | 1,59                          | 35,30                         |
| <b>Floresta c</b> | 45,96                   | 4,60                          | 41,27                         |

A microbacia Soja 1b foi a que apresentou maior volume de escoamento superficial entre as áreas analisadas (Tabela 7 e Figura 13). Scheffler et al. (2011) obteve o valor de  $1,389 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  (ou  $50 \text{ mm h}^{-1}$ ) para  $K_S$  em um ponto próximo a Soja 1b. Esse valor de  $K_S$  é muito menor, por exemplo, que o valor de  $5,55 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  (ou  $200 \text{ mm h}^{-1}$ ) medido próximo na microbacia Soja 1d, que apresentou o menor volume escoamento superficial. Assim, uma possível explicação para o grande volume de escoamento superficial na microbacia Soja 1b é a baixa condutividade hidráulica saturada dessa área. Como a microbacia Soja 1b está

localizada dentro da microbacia de segunda ordem, Soja 2, essa bacia também apresentou um escoamento superficial mais elevado que as demais, provavelmente por influência do volume de escoamento da Soja 1b.

Assim, embora para a média das microbacias o aumento no escoamento superficial possa não ser relevante, esse aumento pode ser importante quando são analisados os escoamentos de cada microbacia. Nas microbacias Soja 1d e Soja 2 o efeito da substituição da floresta por soja pode representar um aumento importante no escoamento superficial, inclusive com chances de prejuízos ambientais. Além desses resultados, os dados obtidos com o SepHidro demonstram que, além de aumentar no volume médio de escoamento total de todas as microbacias analisadas, a substituição de floresta por soja pode provocar o aumento no volume das vazões máximas (Figura 13).

Para o período de 1º de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2010, nas microbacias com cobertura de floresta, o escoamento subterrâneo representou em média a 93,22% do escoamento total, variando entre 89,78 (para a microbacia Floresta 1c) e 95,69% (para a microbacia Floresta 1b). Na cobertura de soja, para esse mesmo período, o escoamento subterrâneo correspondeu entre 81,23 (para a microbacia Soja 1b) a 99,32% (para a microbacia Soja 1d) do escoamento total e, em média, o escoamento subterrâneo correspondeu a 93,83% do escoamento total.

Entre os componentes do escoamento total, o escoamento superficial é o que atinge o curso d'água com maior rapidez e por isso é o escoamento subterrâneo que mantém o fluxo dos rios durante os períodos secos. Embora os resultados possam sugerir que os ecossistemas agrícolas possam beneficiar essa região pelo grande aumento no escoamento subterrâneo e, portanto, reduzir o risco de escassez hídrica por quantidade de água produzida na bacia durante o período seco, deve-se recordar

que o aumento no escoamento subterrâneo ocorreu à custa de redução na evapotranspiração.

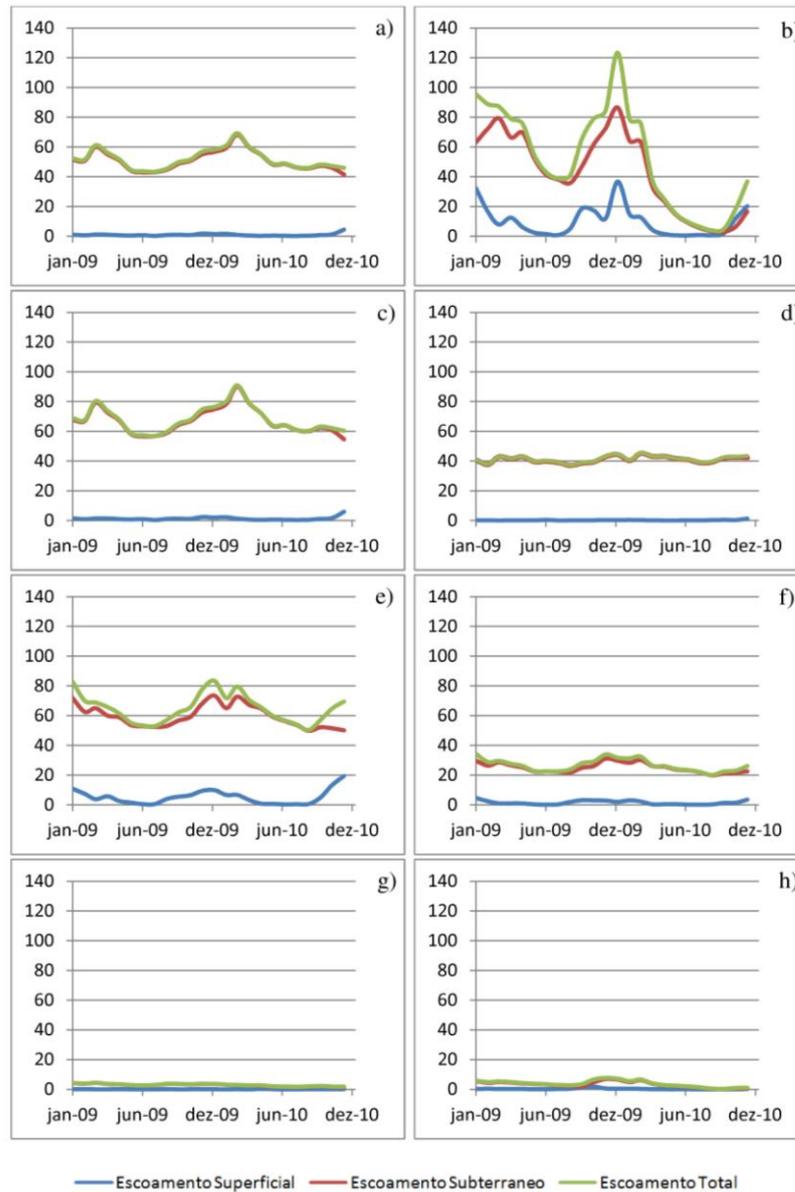


Figura 13: Particionamento da vazão medida em escoamento superficial direto e escoamento subterrâneo utilizando o SepHidro, em  $\text{mm mês}^{-1}$ , no período de janeiro de 2009 a dezembro de 2010, sendo a) Soja 1a; b) Soja 1b; c) Soja 1c; d) Soja 1d; e) Soja 2; f) Floresta a; g) Floresta b; e h) Floresta c.

A evapotranspiração é um importante fluxo através do qual uma grande porção de água do solo retorna para a atmosfera e alterações desse fluxo implicam em alterações no balanço de água e energia. Em geral, a evapotranspiração dos

ecossistemas naturais é maior que dos ecossistemas agrícolas devidos principalmente a três mecanismos. Primeiro, por alteração do albedo que afeta a quantidade de radiação de onda curta absorvida pela vegetação. Segundo, por alteração na rugosidade da superfície e na transferência de energia e momentum. Por fim, na substituição da vegetação ocorre alteração de características dos organismos vegetais que fazem transpiração como a redução do índice de área foliar (LAI) e redução da profundidade do sistema radicular (BONAN et al. 1992; COSTA e FOLEY, 2000; PONGRATZ et al., 2006; COSTA et al., 2007; SAMPAIO, 2007). Nas simulações a evapotranspiração nas coberturas de floresta e cerrado foram 38,3% maiores que nas coberturas de pastagem e soja.

Diferentes valores de evapotranspiração da floresta tropical podem ser encontrados na literatura, em geral variando de 1100 a 1500 mm ano<sup>-1</sup> (FEARNSIDE et al., 2005; DA ROCHA et al., 2009; FISHER et al., 2009) e o valor simulado para a cobertura de floresta está bem próximo aos valores já reportados na literatura. Porém poucos estudos têm sido conduzidos a fim de se compreender os balaços de água e energia do cerrado quando comparado com o número de estudos sobre a Amazônia. A evapotranspiração para o cerrado foi estimada em média em 1315 mm ano<sup>-1</sup> nos trabalhos de Costa et al. (2003) e Coe et al. (2009). Oliveira et al. (2005) estimaram que a evapotranspiração em uma reserva de cerrado seria aproximadamente 1442 mm ano<sup>-1</sup>. A semelhança entre os valores de evapotranspiração para floresta e cerrado em regiões próximas, como foram encontrados nos resultados das simulações do presente trabalho, concordam com os resultados obtidos em campo por San José et al. (2008). O experimento destes autores foi conduzido numa região de savana densa na Venezuela, semelhante ao cerradão, e revelou valores de evapotranspiração da savana (732 mm ano<sup>-1</sup>) semelhantes aos observados na floresta tropical de

transição na mesma região do estudo (770 mm ano<sup>-1</sup>). Baseando-se no estudo de San José et al. (2008) é possível que na região do Alto Xingu a evapotranspiração da floresta e do cerrado sejam semelhantes, como foi simulado pelos modelos utilizados nesse trabalho.

Estudos demonstram que para cada estágio fenológico da cultura da soja o balanço de água e energia são afetados de forma diferente (BERBET e COSTA, 2003; SOUZA et al., 2011; SOUZA et al., 2013). Além disso, resultados observacionais de Souza et al. (2011) e Souza et al. (2013) indicam que o período de entressafra da soja é o período responsável pela maior parte dos impactos na evapotranspiração devido à ausência de cobertura vegetal, chegando à diminuição de 78% na evapotranspiração em relação ao ecossistema de floresta tropical. Para que o modelo seja capaz de reproduzir todas as mudanças na arquitetura da cultura e a ausência da cobertura vegetal na pós-colheita, existem diversos parâmetros específicos para a cultura de soja no modelo AgroIBIS. Nesse trabalho foram alterados apenas os parâmetros relacionados às características hidráulicas do solo e, a exemplo de Webler et al. (2012), a cobertura de soja foi muito bem representada pelo AgroIBIS sem a necessidade de alteração nos parâmetros padrões do modelo para vegetação e dossel, que foram calibrados para condições norte-americanas.

#### **4.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA E INFLUÊNCIA DA TEXTURA DO SOLO NO EFEITO DA MUDANÇA NA COBERTURA VEGETAL**

Para a análise estatística e a análise da influência do solo no efeito da mudança na cobertura vegetal foram utilizadas as equações de CCH para estimar todas as características do solo (Tabela 8). Essas equações (Anexo A), empregadas nas

simulações A, foram as que melhor representaram as características do solo da Fazenda Tanguro sem a utilização do  $K_s$  medido em campo e por isso foram escolhidas para calcular as características dos solos nessa análise. As médias do escoamento total simuladas entre 1º de setembro de 2008 e 31 de agosto de 2010 (dois anos hidrológicos) para cada uma das 11 classes texturais estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 8: Classes de solo e suas propriedades. Todas as propriedades apresentadas foram calculadas com as equações de Cosby et al. (1984) e Clapp e Hornberger (1978)

|                              | Areia | Argila | $\Theta_s$ | $\Theta_{fc}$ | $\Theta_{wp}$ | b    | $\Psi_e$ | $K_s$                  |
|------------------------------|-------|--------|------------|---------------|---------------|------|----------|------------------------|
| <b>Arenoso</b>               | 92    | 3      | 0,373      | 0,132         | 0,033         | 3,3  | 0,03     | $2,446 \times 10^{-5}$ |
| <b>Areia-franca</b>          | 81    | 7      | 0,387      | 0,161         | 0,055         | 4,0  | 0,05     | $1,676 \times 10^{-5}$ |
| <b>Franco-arenoso</b>        | 65    | 10     | 0,409      | 0,191         | 0,083         | 4,5  | 0,07     | $1,009 \times 10^{-5}$ |
| <b>Franca</b>                | 42    | 18     | 0,439      | 0,249         | 0,145         | 5,8  | 0,13     | $4,598 \times 10^{-6}$ |
| <b>Franco-siltoso</b>        | 20    | 15     | 0,471      | 0,270         | 0,167         | 5,4  | 0,15     | $2,538 \times 10^{-6}$ |
| <b>Franco-argilo-arenoso</b> | 60    | 27     | 0,410      | 0,248         | 0,150         | 7,2  | 0,14     | $6,788 \times 10^{-6}$ |
| <b>Franco-argiloso</b>       | 32    | 34     | 0,447      | 0,301         | 0,210         | 8,3  | 0,19     | $2,717 \times 10^{-6}$ |
| <b>Franco-argilo-siltoso</b> | 9     | 33     | 0,480      | 0,333         | 0,248         | 8,3  | 0,23     | $1,415 \times 10^{-6}$ |
| <b>Argilo-arenoso</b>        | 53    | 40     | 0,415      | 0,282         | 0,191         | 9,2  | 0,18     | $4,574 \times 10^{-6}$ |
| <b>Argilo-siltoso</b>        | 10    | 45     | 0,474      | 0,352         | 0,271         | 10,1 | 0,25     | $1,220 \times 10^{-6}$ |
| <b>Muito Argiloso</b>        | 20    | 60     | 0,454      | 0,353         | 0,275         | 12,5 | 0,26     | $1,308 \times 10^{-6}$ |

Os campos descritos como areia e argila estão em porcentagem da composição de cada classe de solo; Onde  $\Theta_s$ , porosidade ( $m^3 m^{-3}$ );  $\Theta_{fc}$ , teor de umidade à capacidade de campo ( $m^3 m^{-3}$ );  $\Theta_{wp}$ , teor de umidade no ponto de murcha permanente ( $m^3 m^{-3}$ ); b, o expoente “b” de Campbell;  $\Psi_e$ , o potencial de entrada de ar ( $m H_2O$ ); e  $K_s$ , condutividade hidráulica do solo ( $m s^{-1}$ ).

Tabela 9: Escoamentos totais médios simulados ( $mm\ ano^{-1}$ ) com 11 diferentes classes texturais de solos para as coberturas de floresta, cerrado, pastagem e soja

|                              | Floresta | Cerrado | Pastagem | Soja    |
|------------------------------|----------|---------|----------|---------|
| <b>Arenoso</b>               | 356,99   | 594,87  | 800,37   | 901,91  |
| <b>Areia-franca</b>          | 373,74   | 570,76  | 795,62   | 760,32  |
| <b>Franco-arenoso</b>        | 418,89   | 610,09  | 754,65   | 711,64  |
| <b>Franca</b>                | 577,91   | 789,12  | 996,29   | 1004,09 |
| <b>Franco-siltoso</b>        | 335,68   | 569,06  | 777,53   | 811,16  |
| <b>Franco-argilo-arenoso</b> | 330,47   | 550,34  | 783,22   | 785,14  |
| <b>Franco-argiloso</b>       | 436,18   | 643,85  | 882,03   | 711,64  |
| <b>Franco-argilo-siltoso</b> | 361,21   | 577,29  | 800,48   | 811,16  |
| <b>Argilo-arenoso</b>        | 443,56   | 646,53  | 864,61   | 839,96  |
| <b>Argilo-siltoso</b>        | 495,46   | 692,29  | 797,04   | 774,57  |
| <b>Muito Argiloso</b>        | 459,77   | 656,33  | 764,49   | 732,81  |

A ANOVA (Tabela 10) executada em DIC utilizando as quatro coberturas vegetais como tratamentos e as simulações com diferentes classes texturais de solos como repetições, confirmam que há ao menos um contraste entre as médias dos escoamentos totais médios diferente entre os ecossistemas naturais e agrícolas. Por meio do teste Tukey (Tabela 11) foi possível contrastar as médias e concluir que a média do escoamento total para as coberturas de floresta e cerrado são diferentes entre si e em comparação com a vazão média das coberturas de pastagem e soja. Já para as coberturas de pastagem e soja o teste não mostrou diferenças estatísticas significativas entre as médias de escoamento total a 5% de significância.

Tabela 10: Análise de variância (ANOVA) do escoamento total médio simulado tendo as coberturas como tratamentos e 11 diferentes classes texturais de solos como repetições

|                                   | <b>SQ</b> | <b>GL</b> | <b>QM</b> | <b>F</b> | <b>p-valor</b>         |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|------------------------|
| <b>Coberturas vegetais</b>        | 1163790,2 | 3         | 387930,1  | 66,71    | $1,27 \times 10^{-15}$ |
| <b>Classes texturais de solos</b> | 232592,3  | 40        | 5814,8    |          |                        |
| <b>Total</b>                      | 1396382,5 | 43        |           |          |                        |

SQ, são as somas dos quadrados; GL, são os graus de liberdade; QM, são os quadrados médios; e F, é o valor de F calculado.

Tabela 11: Contrastes entre médias por meio do teste de Tukey

| <b>Contrastes</b> | <b>Média</b> | <b>Contraste</b> |
|-------------------|--------------|------------------|
| <b>Floresta</b>   | 392,31       | C                |
| <b>Cerrado</b>    | 634,43       | B                |
| <b>Pastagem</b>   | 820,29       | A                |
| <b>Soja</b>       | 733,85       | A                |

Nas simulações feitas somente para o solo argilo-arenoso diferentes  $K_s$  foram medidas em campo e utilizadas nas simulações para cada uma das coberturas vegetais. Já nessas análises partiu-se do pressuposto que as características hidráulicas

dos solos não se alteram com o uso. A análise estatística revela que, mesmo que ecossistemas agrícolas possuíssem solos com as mesmas características dos solos dos ecossistemas florestais, a produção de água dos dois ecossistemas seria diferente. O fato de o uso do solo alterar as características hidráulicas, com compactação e redução na infiltração da água não é a única causa do aumento da vazão média em consequência da mudança no uso e cobertura do solo, mas sim um agravante dessa situação quando combinado à alteração da estrutura da vegetação.

A Figura 14 apresenta a variabilidade do escoamento total médio do período entre setembro de 2008 e agosto de 2010 para 11 texturas de solos nos diferentes ecossistemas estudados. As características dos solos utilizados nessa análise foram apresentadas na Tabela 7.

A variabilidade do escoamento total médio na cobertura de soja foi superior à simulada para as demais coberturas. A média dessas simulações foi  $804,0 \text{ mm ano}^{-1}$  e desvio-padrão de  $87,3 \text{ mm ano}^{-1}$ . A variabilidade da vazão na cobertura de floresta tropical foi a segunda maior entre as coberturas testadas e observa-se a partir da

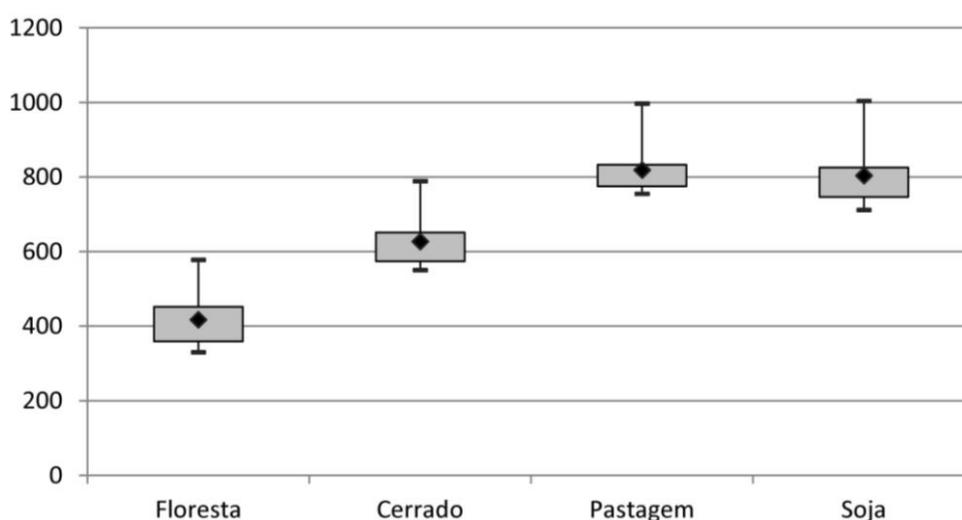


Figura 14: Variabilidade do escoamento total médio em onze diferentes classes texturais de solos. O losango representa a média de todas as simulações.

Figura 14 que o escoamento total médio na cobertura de floresta tropical foi sempre inferior à simulada para as demais coberturas, independente do solo utilizado. Em média, o escoamento total médio da floresta nos diferentes solos foi  $417,3 \text{ mm ano}^{-1}$  e o desvio-padrão  $75,9 \text{ mm ano}^{-1}$ . As coberturas de cerrado e pastagem responderam às diferentes texturas de solo com uma variabilidade pequena, com desvios padrão de respectivamente  $69,5$  e  $71,0 \text{ mm ano}^{-1}$ . Na cobertura de cerrado a média do escoamento total médio nos diferentes solos foi de  $627,3 \text{ mm ano}^{-1}$  e para a pastagem,  $818,9 \text{ mm ano}^{-1}$ .

De acordo com Mesquita e Moraes (2004) a variabilidade espacial do diâmetro dos poros é tão grande que mesmo sítios muito próximos podem possuir solos com estruturas completamente diferentes. Como mostrado na Figura 14, o escoamento total médio da floresta é sensível à textura do solo, assim, a heterogeneidade do solo também poderia ser uma possível causa da grande variabilidade do escoamento total médio das microbacias com cobertura de floresta da Fazenda Tanguro. No entanto, quando a análise de sensibilidade do modelo à  $K_S$  é conduzida, variando a  $K_S$  de  $3,33 \times 10^{-7}$  a  $1,6 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ , após o valor de  $K_S$  próximo a  $1,03 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ , o escoamento total médio simulado permanece praticamente constante. Sabendo que a condutividade hidráulica saturada das microbacias de floresta varia entre  $1,39 \times 10^{-4}$  e  $1,81 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  (SCHEFFLER et al., 2011), pode-se supor que não é a heterogeneidade dos solos a responsável pela variabilidade dos vazões médias observadas.

A análise de sensibilidade também explica porque os resultados de escoamento total médio para floresta e cerrado são semelhantes nas simulações utilizando a  $K_S$  medida em campo por Scheffler et al. (2011) e demais parâmetros calculados utilizando as equações de CCH – como pode ser visto na Figura 12 – e

porque há grande diferença entre os escoamentos totais médios simulados para floresta e cerrado em qualquer textura de solo – o que pode ser constatado na Figura 15 quando se utiliza apenas as equações de CCH para estimar todas as propriedades hidráulicas dos solos. Ocorre que para solos com baixas  $K_s$ , que normalmente são solos argilosos, acentua-se a diferença entre as coberturas de floresta e cerrado quanto ao particionamento da precipitação. Como as equações de CCH estimam  $K_s$  entre  $1,220 \times 10^{-6}$  e  $2,446 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$  (Tabela 8) nesse intervalo a diferença entre o maior escoamento total médio simulado para Floresta e o menor escoamento total médio simulado para cerrado é de aproximadamente  $50 \text{ mm ano}^{-1}$ , diferença que pode ser notada na Figura 15.

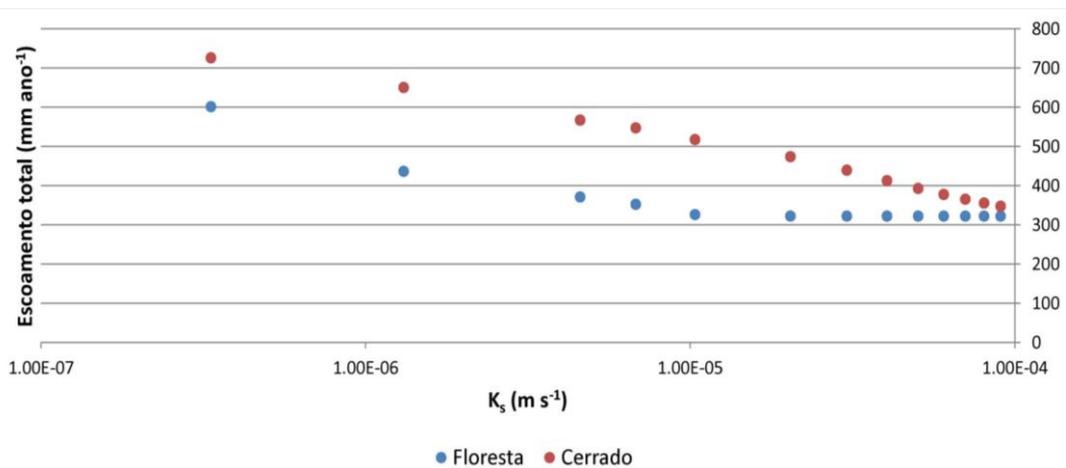


Figura 15: Análise de sensibilidade do escoamento total médio ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) à  $K_s \text{ (m s}^{-1}\text{)}$  nas coberturas de floresta e cerrado. O eixo de  $K_s$  está em unidades logarítmicas.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Apesar de estudos oficiais apontarem para uma diminuição na taxa de desmatamento da Amazônia entre 2006 e 2010, conhecer a influência da mudança da cobertura vegetal no balanço hídrico dos ecossistemas ainda é uma questão importante. Apesar da taxa de desmatamento ter sido menor, o desmatamento ainda existe na Amazônia e segue em expansão no cerrado.

Nesse trabalho os modelos InLand e AgroIBIS foram capazes de simular os escoamentos totais médios anuais próximos aos valores observados em campo para coberturas de floresta tropical e soja. Nas simulações que utilizaram a condutividade hidráulica saturada medida em campo e as demais características hidráulicas do solo argilo-arenoso estimadas pelas equações de Cosby et al. (1984) e Clapp e Hornberger (1978), os valores de escoamento total médio simulados foram mais próximos à média dos escoamentos totais médios das microbacias observadas.

Os resultados deste trabalho sugerem que os ecossistemas naturais – floresta e cerrado – produzem anualmente 53,5% menos água que os ecossistemas agrícolas –

pastagem e soja – na região do Alto Xingu. Esse é um resultado importante por alertar para possíveis impactos locais e regionais na disponibilidade hídrica e regime de fluxo dos cursos d'água. A evapotranspiração também foi diferente entre os ecossistemas naturais e agrícolas. Os ecossistemas agrícolas destinaram em média 38,3% menos precipitação para a evapotranspiração que os ecossistemas naturais.

Apesar do aumento na produção de água devido a diferença na cobertura vegetal, quando foram analisados a separação do escoamento total em escoamento superficial e escoamento subterrâneo, tanto os resultados das simulações com modelos de superfície quanto o método de separação por mínimos locais – utilizado no SepHidro – revelaram um grande aumento no escoamento subterrâneo e pouco aumento no escoamento superficial.

Ao ser executada a análise estatística ANOVA utilizando diferentes tipos de solos como repetições o resultado reafirmou a diferença entre o particionamento da precipitação em evapotranspiração e vazão entre ecossistemas naturais e agrícolas. O teste de Tukey indicou que os ecossistemas de pastagem e de soja têm contrastes entre suas médias semelhantes a 5% de significância, indicando que há semelhanças no comportamento hidrológico dessas coberturas. A análise estatística revela que, mesmo que ecossistemas agrícolas possuíssem solos com as mesmas características dos solos dos ecossistemas florestais, a produção de água dos dois ecossistemas seria diferente. O fato de o uso do solo alterar as características hidráulicas, com compactação e redução na infiltração da água não é a única causa do aumento da vazão média em consequência da mudança no uso e cobertura do solo, mas sim um agravante dessa situação quando combinado à alteração da estrutura da vegetação.

Os resultados das simulações deste estudo também mostraram que a variabilidade do escoamento total médio anual em diferentes classes texturais de solo

são maiores para as coberturas de soja e floresta tropical. Além disso, a diferença entre as vazões simuladas no modelo InLand para os ecossistemas de floresta e cerrado é maior quanto menor é a condutividade hidráulica saturada.

Este trabalho contribui para o melhor conhecimento sobre a influência da cobertura vegetal no balanço hídrico para auxiliar políticas de conservação do cerrado e em caso de um novo crescimento do desmatamento amazônico devido à agropecuária. Mais comparações com dados observados, sobretudo para as coberturas de cerrado e pastagem, são necessárias para confirmar os resultados desse trabalho, mas este é um primeiro passo para compreender os efeitos que as mudanças na cobertura do solo causaram na hidroclimatologia na região do Alto Xingu.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb: ANA. *Dados Hidrológicos - Séries históricas*. Brasília, DF, 2011. Base de Dados em MDB do Microsoft Office Access.
- AGUIAR, L.J.G.; DA COSTA, J.M.N.; FISCHER, G.R.; AGUIAR, R.G.; DA COSTA, A.C.L.; FERREIRA, W.P.M. Estimativa da radiação de onda longa atmosférica em áreas de floresta e de pastagem no sudoeste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 2, p. 215-224, 2011.
- ALEXANDRATOS, N.; BRUINSMA, J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision ESA Working Paper No. 12-03. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012.
- ANDRÉASSIAN, V. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, v. 291, p. 1-27, 2004.
- BALCH, J.; NEPSTAD, D.; BRANDO, P.M.; CURRAN, L.M.; PORTELA, O.; CARVALHO JR., O.; LEFEBVRE, P. Negative fire feedback in a transitional forest of southeastern Amazonia. *Global Change Biology*, v. 14, p. 2276-2287, 2008. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01655.x

- BALL, J.T.; WOODROW, I.E.; BERRY, J.A. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different light conditions. In: Biggins, J. (Ed.), *Progress in Photosynthetic Research*. M. Nijhoff Publishers, Dordrecht, pp. 221-224, 1986.
- BÄSE, F.; ELSENBEER, H.; NEILL, C.; KRUSCH, A. V. Differences in throughfall and net precipitation between soybean and transitional tropical forest in the southern Amazon, Brazil, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 159, p. 19-28, 2012.
- BERBET, M. L. C.; COSTA, M. H. Climate change after tropical deforestation: seasonal variability of surface albedo and its effects on precipitation change. *Journal of Climate*, v. 16, n. 12, p. 2099-2104, 2003.
- BIERAS, A. C.; SAJO, M. G. Leaf structure of the cerrado (Brazilian savanna) woody plants. *Trees*, v. 23, p. 451-471, 2009.
- BONAN, G.B.; POLLARD, D.; THOPSOM, S.L. Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature*, v. 359, p.716-718, 1992.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, v. 55, p. 3-23, 1982.
- BRADLEY, A.; GERARDW, F.G.; BARBIER, N.; WEEDON, G. P.; ANDERSON, L. O.; HUNTINGFORD, C.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ZELAZOWSKI, P.; ARAI, E. Relationships between phenology, radiation and precipitation in the Amazon region. *Global Change Biology*, v.17,p. 2245-2260, DOI 10.1111/j.1365-2486.2011.02405.x, 2011.
- BRANDÃO, V. S.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. *Infiltração da Água no Solo*. 3 ed. Viçosa: Editora UFV, 98 p, 2003.

- BRASIL. Leis, Decretos, etc. Resolução nº 05 de 10/10/2002 do IBGE. Área Territorial Oficial. *Diário Oficial da União*, n. 198 – Seção 1, p. 48 - 65, 11 de outubro de 2002.
- BROWN, A.E.; ZHANG, L.; McMAHON, T.A.; WESTERN, A.W.; VERTESSY, R.A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, v. 310, p. 28-61, 2005.
- BRUIJNZEEL, L.A. Hydrology of Moist Forest and the Effects of Conversion: A State of Knowledge Review. UNESCO, Paris e Amsterdam, 224 pp., 1990.
- BRUNO, R.D.; da ROCHA, H.R.; FREITAS, H.C.; GOULDEN, M.L.; MILLER, S.D. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrological Processes*, v. 20, p. 2477-2489, 2006.
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. *Quarterly Journal the Royal Meteorological Society*, v. 58, p. 389-418, 1932.
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, v. 11, n. 5, p. 742-744, 1975.
- CAMPBELL, G.S.; NORMAN, J.M. An Introduction to Environmental Biophysics, 2<sup>a</sup> ed., Springer-Verlag : New York, p. 86, 1998.
- CASTRO, E. A.; KAUFFMAN J. B. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. *Journal of Tropical Ecology*, v.14, p. 263-283, 1998.
- CHAVES, J.; NEILL, C.; GERMER, S.; GOUVEIA NETO, S.; KRUSCHE, A.; ELSENBEER, H. Land management impacts on runoff sources in small Amazon watersheds. *Hydrological Processes*, v. 22, p. 1766-1775, 2008.

- CLAPP, R. B.; HORNBERGER, G. M. Empirical equations for some soil hydraulic properties, *Water Resources Research*, v. 14, n. 4, p. 601–604, 1978.
- COE, M.T.; COSTA, M.H.; HOWARD, E.A. Simulating the surface waters of the Amazon River Basin: impacts of new river geomorphic and dynamic flow parameterizations. *Hydrological Processes*, v.21, p. 2542-2553, 2007.
- COE, M.T.; COSTA, M.H.; SOARES-FILHO, B.S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. *Journal of Hydrology*, v. 369, p. 165-174, 2009.
- COE, M.T.; LATRUBESSE, E.M.; FERREIRA, M.E.; AMSLER, M.L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry*, v. 105, p. 119-131, 2011.
- COLE, M. The Savannas: Biogeography and Geobotany. Academic Press : Universidade de Michigan, 438 p., 1986 .
- COSBY, B. J.; HORNBERGER, G.M.; CLAPP, R. B.; GINN, T. R. A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils, *Water Resources Research*, v. 20, n. 6, p. 682–690, 1984.
- COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Water balance of the Amazon Basin: Dependence on vegetation cover and canopy conductance. *Journal of Geophysical Research*, v.102, n. D20, p. 23973-23989, 1997.
- COSTA, M. H.; FOLEY, J.A. Trends In The Hydrologic Cycle Of The Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, p. 14189-14196, 1999.
- COSTA, M. H.; FOLEY, J.A. Combined Effects of Deforestation and Doubled Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations on the Climate of Amazonia. *Journal of Climate*, v. 13, p. 18-34, 2000.

- COSTA, M.H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J.A. Effects of large-scale in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeast Amazonia. *Journal of Hydrology*, v. 283, p. 206-217, 2003.
- COSTA, M. H.; YANAGI, S. N. M.; SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. *Geophysical Research Letters*, v. 34, L07706, doi:10.1029/2007GL029271, 2007.
- COUTINHO, L. M. O conceito de Cerrado. *Revista Brasileira de Botânica*, v.1, p. 17-23, 1978.
- COUTINHO, L. M. O bioma do Cerrado. In: KLEIN, A. L. Eugen Warming e o cerrado brasileiro: um século depois. São Paulo : Editora da Unesp, p. 77-91, 2002.
- D'ALMEIDA, C.; VÖRÖSMARTY, C. J.; HURTT, G. C.; MARENGO, J. A.; DINGMAN, S. L.; KEIM, B.D. The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology*, n. 27, p633-647, 2007.
- DA ROCHA, H. R.; MANZI, A. O.; CABRAL, O. M.; MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; SALESKA, S. R.; COUPE, N. R.; WOFSEY, S.C.; BORMA, L. S.; ARTAXO, P.; VOURLITIS, G.; NOGUEIRA, J.S.; CARDOSO, F. L.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; FREITAS, H. C.; von RANDOW, C.; AGUIAR, R. G.; MAIA, J. F. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *Journal of Geophysical Research*, v. 114, n. G00B12, doi:10.1029/2007JG000640, 2009.
- DAVIDSON, E.A. ; DE ARAÚJO, A.C.; ARTAXO, P.; BALCH, J.K.; BROW, F.; BUSTAMANTE, M.M.C. ; COE, M.T.; DEFRIES, R.S.; KELLER, M.; LONGO,

- M.; MUNGER, J.W.; SCHROEDER, W.; SOARES-FILHO, B.S.; SOUZA, C.M.; WOFSY, S.C. The Amazon basin in transition. *Nature*, v. 481, p. 321- 328, 2012.
- DEMATTE, J.L.I.; DEMATTE, J.A.M. Comparações entre as propriedades químicas de solos das regiões da floresta Amazônica e do Cerrado do Brasil Central. *Scientia Agricola*. v. 50, p. 272–286, 1993.
- ELSENBEER, H.; VERTESSY, R. A. Stormflow generation and flowpath characteristics in an Amazonian rainforest catchment. *Hydrological Processes*, v. 14, p 2367-2381, 2000.
- ELTAHIR, E. A. B.; BRAS R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quaternary Journal of Royal Meteorology Society*, n. 120, p. 861-80, 1994.
- FEARNSIDE, P. M. Soybean cultivation as a threat to the environment in Brazil. *Environmental Conservation*, v. 28, n. 1, p. 23-38, 2001.
- FEARNSIDE, P. M. Deforestation in Brazilian Amazonia: history, rates, and consequences. *Conservation Biology*, v. 19, p. 680-688, 2005.
- FIGUEROA, S.N.; NOBRE, C.A. Precipitations distribution over Central and Western Tropical South America. *Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, v. 5, n.6, p. 36-45, 1990.
- FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia, *Acta Amazonica*, v. 28, p. 101-126, 1998.
- FISHER, J. B.; MALHI, Y.; BONAL D.; da ROCHA, H. R.; ARAÚJO, A. C.; GAMO, M.; GOULDEN, M. L.; HIRANO, T.; HUETE, A. R.; KONDO, H.; KUMAGAI, T.; LOESCHER, H. W.; MILLER, S.; NOBRE, A. D.; NOUVELLON, Y.; OBERAUER, S. F.; PANUTHAI, S.; ROUPSARD, O.; SALESKA, S.; TANAKA, K.; TANAKA, N.; TU, K. P.; VON RANDOW, C.

- The land-atmosphere water flux in the tropics. *Global Change Biology*, v. 15, p. 2694-2714, 2009.
- FOLEY, J.A.; PRENTICE, C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S. POLLARD, D; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, n. 4, p. 603-628, 1996.
- FOLEY, J. A.; DeFRIES, R.; ASNER, G.P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S.R.; CHAPIN, F.S.; COE, M.T.; DAILY, G.C.; GIBBS, H.K.; HELKOWSKI, J.H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD E.A.; KUCHARIK, C.J.; MONFREDA, C.; PATZ, J.A.; PRENTICE, C.; RAMANKUTTY, N. SNYDER, P.K. Global consequences of land use. *Science*, v. 309, p. 570-574, 2005.
- GERMER, S.; NEILL, C.; VETTER, T.; CHAVES, J.; KRUSCHE, A.V.; ELSENBEER, H. Implications of long-term land-use change for the hydrology and solute budgets in small catchments in Amazonia, *Journal of Hydrology*, v. 364, p. 349-363, 2009.
- HAYHOE, S.J.; NEILL C.; PORDER, S.; McHORNEY, R.; LEFEBVRE, P.; COE, M.T.; ELSENBEER, H.; KRUSCHE, A.V. Conversion to soy on the Amazonian agricultural frontier increases streamflow without affecting stormflow dynamics. *Global Change Biology*, n. 17, p. 1821-1833, 2011.
- HIROTA, M.; HOLMGREN, M.; VAN NES, E.H.; SCHEFFLER, M. Global resilience of tropical forest and savanna to critical transitions. *Science*, v. 334, p. 232– 235, 2011.
- HODNETT, M.G.; DA SILVA, L.P.; DA ROCHA, H.R.; SENNA, R.C. Seasonal soil water changes beneath central Amazonian rainforest and pasture *Journal of Hydrology*, v. 170, p. 233-254, 1995.

- HSU, K.; GAO, X.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, H.V. Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks. *Journal of Applied Meteorology*, v. 36, n. 9, p. 1176-1190, 1997.
- IDSO, S. B.; JACKSON R. D. Thermal radiation from the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, v. 74, n. 23, p. 5397-5403, 1969.
- IDSO, S.B. A set of equations for full spectrum and 8 to 14  $\mu\text{m}$  and 10.5 to 12.5  $\mu\text{m}$  thermal radiation from cloudless skies. *Water Resources Research*, v. 17, n. 2, p. 295-304, 1981.
- JIPP, P.H.; NEPSTAD, D.C.; CASSEL, D.K.; DE CARVALHO, C.R. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally dry Amazônia. *Climatic Change*, v. 39, p. 395-412, 1998.
- JOHNSON, M.S.; LEHMANN, J.; SELVA, E.C.; ABDO, M.; RIHA, S.; COUTO, E.G. Organic carbon fluxes within and streamwater exports from headwater catchments in the southern Amazon, *Hydrological Processes*, v. 20, p. 2599-2614, 2006.
- KLINK, C. A.; MOREIRA, A. G. Past and current human occupation, and land use. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. The Cerrado of Brazil: ecology and natural history of a neotropical Savanna. New York: Columbia University Press, p. 69-88, 2002.
- KUCHARIK, C.J.; FOLEY, J.A.; DELIRE, C.; FISHER, V.A; COE, M.T.; LENTERS, J.D.; YOUNG-MOLLING, C.; RAMANKUTTY, N.; NORMAN, J.M.; GOWER, S.T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 14, n. 3, p. 795-825, 2000.

- KUCHARIK, C. J. Evaluation of a process-based agro-ecosystem model (Agro IBIS) across the U.S. Corn Belt: Simulations of the interannual variability in maize yield. *Earth Interactions.*, v. 7, 2003.
- KUCHARIK, C. J.; TWINE, T. E. Residue, respiration, and residuals: Evaluation of a dynamic agroecosystem model using eddy flux measurements and biometric data. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 146, p. 134–158, 2007.
- LATHUILLIÈRE, M. J.; JOHNSON, M. S.; DONNER, S. D. Water use by terrestrial ecosystems: temporal variability in rainforest and agricultural contributions to evapotranspiration in Mato Grosso, Brazil. *Environmental Research Letters*, v. 7, doi:10.1088/1748-9326/7/2/024024, 2012.
- LEHMANN, C.E.R.; ARCHIBALD, S.A.; HOFFMANN, W.A.; BOND, W.J. Deciphering the distribution of the savanna biome. *New Phytologist*, 191, 197–209, 2011.
- LEITE, C.C.; COSTA, M.H.; DE LIMA, C.A.; RIBEIRO, C.A.; SEDIYAMA, G.C. HISTORICAL reconstruction of land use in the Brazilian Amazon (1940-1995) *Journal of Land Use Science*, v. 6, p. 33-52, 2011.
- LEMONS, R.C.; SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Campinas: SBCS/Embrapa-SNLCS, 45 p., 1984.
- MACEDO, M.; R. DEFRIES; MORTON, D.C.; STICKLER, C.M.; GALFORD, G.L.; SIMABUKURO, Y.E. Decoupling of deforestation and soy production in the southern Amazon during the late 2000s. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 4, p. 1341-1346, 2012.
- MALHADO, A. C. M.; MALHI, Y.; WHITTAKER, R. J.; LADLEL, R. J.; TER STEEGE, H.; ARAGÃO, L. E. O. C.; QUESADA, C. A.; ARAUJO-MURAKAMI, A.; PHILLIPS, O. L.; PEACOCK, J.; LOPEZ-GONZALES, G.;

- BAKER, T. R.; BUTT, N.; ANDERSON, L. O.; ARROYO, L.; ALMEIDA, S.; HIGUCHI, N.; KILLEN, T. J.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D.; PITMAN, N.; PRIETO, A.; SALOMÃO, R. P.; SILVA, N.; VASQUEZ-MARTÍNEZ, R.; LAURANCE, W. F. Spatial trends in leaf size of Amazonian rainforest trees. *Biogeosciences*, v. 6, p. 1563-1576, 2009.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, n. 34, p. 963-969, 2004.
- MICHILES, A. A. S. *Taxas de armazenamento de energia e fluxos de calor nos troncos em floresta de terra firme na Amazônia Central*. 2004. 215 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.
- MIRANDA, A.C.R. *Métodos de separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo: Estudo de caso para a bacia do Rio das Velhas*. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- MORAES, J. M., SCHULER, A. E.; DUNNE, T.; FIGUEIREDO, R. O.; VICTORIA, R. L. Water storage and runoff processes in plinthic soils under forest and pasture in Eastern Amazonia. *Hydrological Processes*, v. 20, p. 2509-2526, 2006.
- MORTON, D. C.; DeFRIES, R.S.; SHIMABUKURO, Y.E.; ANDERSON, L.O.; ARAI, E.; DEL BON ESPIRITO-SANTO, F.; FREITAS, R.; MORISETTE, J. Cropland expansion changes deforestation dynamics in the southern Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 103, n. 39, p. 14637-14641, 2006.

- NEILL, C.; COE, M. T.; RISKIN, S. H.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEER, H.; MACEDO, M. N.; McHORNEY, R.; LEFEBVRE, P.; DAVIDSON, E. A.; SCHEFFLER, R.; FIGUIRAS, A. M. S.; PORDER, S.; DEEGAN, L. Watershed responses to Amazon soya bean cropland expansion and intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 368, n. 1619, 2013. DOI: 10.1098/rstb.2012.0425.
- NEPSTAD, D. C.; CARVALHO, C. R.; DAVIDSON, E.A.; JIPP, P. H.; LEFEBVRE, P.A.; NEGREIROS, G. H.; SILVA, E.S.; STONE, T.A.; TRUMBORE, S.E.; VIEIRA, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pasture, *Nature*, V. 372, P. 666 - 669, 1994. DOI:10.1038/372666a0
- NEPSTAD, D.; LEFEBVRE, P.; SILVA, U.L.; TOMASELLA, J.; SCHLESINGER, P.; SOLORZANO, L.; MOUTINHO, P.; RAY, D.; BENITO, J.G. Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. *Global Change Biology*, v. 10, p. 704– 717, 2004.
- NEPSTAD, D.C.; STICKLER, C.M.; ALMEIDA, O. Globalization of the Amazon Soy and Beef Industries: Opportunities for Conservation. *Conservation Biology*, v. 20, n. 6, p. 1595-1603, 2006.
- NOBRE, C. A.; OBREGÓN, G. O.; MARENGO, J. A.; FU, R.; POVEDA, G. Characteristics of Amazonian climate: Main features, in *Amazonia and Global Change, Geophysical Monograph Series*, v. 186, editado por M. Keller et al. pp. 149-162, AGU, Washington, D.C., doi: 10.1029/2008GM000720, 2009.
- OLIVEIRA, J.B., JACOMINE, P.K.T. CAMARGO, M.N. Classes Gerais de Solos do Brasil. Jaboticabal : FUNEP, 1992.

- OLIVEIRA, R. S.; BEZERRA, L.; DAVIDSON, E. A.; PINTO, F.; KLINK, C. A.; NEPSTAD, D. C.; MOREIRA, A. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil, *Functional Ecology*, v. 19, n. 4, p. 574-581, 2005.
- PONGRATZ, J.; BOUNOUA, L.; DeFRIES, R.S.; ANDERSON, L.O.; MAUSE, W.; KLINK, C.A. The Impact of Land Cover Change on Surface Energy and Water Balance in Mato Grosso, Brazil. *Earth Interactions*, v.10, n. 19, p. 1-19, 2006.
- PRATA, A .J. A new long - wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 122, p. 1127-1151, 1996.
- PROJETO RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais. Ministério das Minas e Energia, Folha SD-22 Goiás: vol. 22, Rio de Janeiro, 1981. Escala 1:1.000.000.
- RAMANKUTTY, N.; FOLEY, J.A. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 13, n. 4, p. 997-1027, 1999
- ROSS, J. L. S. Ecogeografia do Brasil, Subsídios para Planejamento Ambiental. São Paulo : Oficina de textos, 208 p., 2006.
- SAHIN, V.; HALL, M. J. The effects of afforestation and deforestation on water yields. *Journal of Hydrology*, v. 178, p. 293-309, 1996.
- SALATI, E.; SHUBART, H. O. R.; JUNK, W.; OLIVEIRA, A. E. Amazônia, desenvolvimento, integração, ecologia. São Paulo : Editora brasiliense, CNPq, 327 p., 1983.

- SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SOARES-FILHO, B. S.; CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, v. 34, L17709, doi:10.1029/2007GL030612, 2007.
- SAN JOSÉ, J.; MONTES, R.; GRACE, J.; NIKONOVA, N.; OSÍO, A. Land-use changes alter radiative energy and water vapor fluxes of a tall-grass *Andropogon* field and a savanna–woodland continuum in the Orinoco lowlands. *Tree Physiology*, v. 28, p. 425–435, 2008.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; dos ANJOS, L.H.; de OLIVEIRA, V.A.; OLIVEIRA, J.B.; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F., eds. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 306 p., 2006.
- SATTERLUND, D. R. An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere. *Water Resources Research*, v. 15, p. 1649-1650, 1979.
- SCHEFFLER, R.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEER, H. Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 144, p. 281-289, 2011.
- SELLERS, P.J.; RANDALL, D.A.; COLLATZ, G.J.; BERRY, J.A.; FIELD, C.B.; DAZLICH, D.A.; ZHANG, C.; COLLELO, G.D.; BOUNOUA, L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, v. 9, p 676-705, 1996a.
- SELLERS, P.J.; TUCKER, C.J.; JUSTICE, C.O.; DAZLICH, D.A.; COLLATZ, G.J.; RANDALL, D.A. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial

- biophysical parameters from satellite data. *Journal of Climate*, v. 9, p. 706-737. 1996b.
- SENNA, M.C.A. *Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida pela Floresta Tropical Amazônica: Uma Comparação Entre Estimativas Baseadas em Modelagem, Sensoriamento Remoto e Medições de Campo*. 2004. 54 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- SOMBROEK, W. Spatial and Temporal Patterns of Amazon Rainfall. *AMBIO*, v.30, n.7, p. 388-396. 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1579/0044-7447-0.7.388>
- SOROOSHIAN, S.; HSU, K.; GAO, X.; GUPTA, H.V.; IMAM, B.; BRAITHWAITE, D. Evaluation of PERSIANN System Satellite-Based Estimates of Tropical Rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 81, n.9, p. 2035-2046, 2000.
- SOUZA, P. J. O. P.; RIBEIRO, A.; ROCHA, E. J. P.; BOTELHO, M. N.; SOUSA, A. M. L.; SOUZA, E. B.; FARIAS, J. R. B. Impacts of Soyabean expansion on the Amazon energy balance: a case study. *Experimental Agriculture*, v. 47, n. 3, p. 553-567, 2011.
- SOUZA, P. J. O. P.; ROCHA, E. J. P.; RIBEIRO, A. Impactos do avanço da soja no balanço de radiação no leste da Amazônia. *Acta Amazonica*, v. 43, n. 2, p. 169-178, 2013.
- SWINBANK, W. C. Long-Wave Radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 89, n. 381, p. 339-348, 1963.
- TOMASELLA, J.; NEILL, C.; FIGUEIREDO, R.; NOBRE, A. D. Water and Chemical budgets at the catchment scale including nutrient exports from intact forests and disturbed landscapes. In: *Amazonia and Global Change*,

- Geophysical Monograph Series 186, American Geophysical Union, p. 505-524, 2009.
- TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos, 2 ed., Porto Alegre : Editora da UFRGS, 2005, 678 p.
- VIANELLO, R.L.; ALVES, A.R. Meteorologia básica e aplicações. 2ª ed., Viçosa: Editora UFV, 460 p., 2012.
- VILLAR, J. C. E.; RONCHAIL, J.; GUYOT, J. L.; COHONNEAU, G.; NAZIANO, F.; LAVADO, W.; OLIVEIRA, E.; POMBOSAG, R.; VAUCHELH, P. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, v. 29, p. 1574–1594, 2009. DOI: 10.1002/joc.1791
- WATERLOO, M.J.; OLIVEIRA, S. M.; DRUCKER, D. P.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M.G.; LANGEDIJK, I.; JANS, W. W. P.; TOMASSELA, J.; ARAÚJO, A. C.; PIMENTEL, T. P.; ESTRADA, J. C. M. Export of organic carbon in run-off from an Amazonian rainforest blackwater catchment. *Hydrological Processes*, v. 20, p. 2581-2597, 2006.
- WEBLER, G.; ROBERTI, D.R.; CUADRA, S.V.; MOREIRA, V.S.; COSTA, M.H. Evaluation of a Dynamic Agroecosystem Model (Agro-IBIS) for Soybean in Southern Brazil. *Earth Interactions*, v. 16, n. 12, p. 1-15, 2012.
- WERNECK, F. P. The diversification of eastern South American open vegetation biomes: Historical biogeography and perspectives. *Quaternary Science Reviews*, v. 30, p. 1630-1648, 2011.
- WICKEL, A. J.; van de GIESEN, N. C.; SÁ, T. D. A. Stormflow generation in two headwater catchments in eastern Amazonia, Brazil. *Hydrological Processes*, v. 22, p. 3285-3293, 2008.

## ANEXO A

Neste anexo estão apresentadas as equações de Cosby et al. (1984) e Clapp e Hornberger (1978) que foram utilizadas para estimar a porosidade, a capacidade de campo ( $\Theta_{fc}$ ), o ponto de murcha ( $\Theta_{wp}$ ), o expoente “b” de Campbell (b), o potencial de entrada de ar ( $\Theta_{ad}$ ) e a condutividade hidráulica saturada ( $K_S$ ).

Os componentes do potencial total da água responsáveis pelo fluxo vertical no solo (de cima para baixo) são os potenciais matricial e gravitacional (CAMPBELL e NORMAN, 1998). A equação da lei de Darcy, que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso, pode ser escrita considerando esses potenciais na forma:

$$J_w = -K(\Psi_m) \frac{d\Psi}{dz} \quad (A1)$$

Onde  $J_w$  é a densidade de fluxo ( $m\ s^{-1}$ );  $K(\Psi_m)$  é a condutividade hidráulica num dado potencial matricial ( $m\ s^{-1}$ );  $d\Psi$  é a diferença no potencial total do solo entre dois pontos (m); e  $dz$  é a diferença entre dois pontos no solo (m). Quando todos os poros do solo estão preenchidos de água (solo saturado) a condutividade hidráulica tem o

valor de  $K_S$ . Em parte desse trabalho  $K_S$  foi determinado em experimento de campo no trabalho de Scheffler et al. (2011). Já onde a condutividade hidráulica saturada foi estimada utilizou-se a equação de Cosby et al. (1984), que estima  $K_S$  a partir das frações de areia ( $F_{areia}$ ) e argila ( $F_{argila}$ ):

$$K_S = 10^{(-0,60 - 0,64 \times F_{argila} + 1,26 \times F_{areia})} \times \frac{0,0254}{(60 \times 60)} \quad (A2)$$

Quanto mais seco estiver o solo, mais negativo é o potencial matricial e menor é a condutividade hidráulica. O cálculo de  $K(\Psi_m)$  nos modelos é dado pela equação:

$$K(\Psi_m) = K_S \left( \frac{\Psi_e}{\Psi} \right)^{2 + \frac{3}{b}} \quad (A3)$$

Sendo  $\Psi_e$  é o potencial de entrada de ar quando o potencial matricial é de -3,1 MPa ou  $\Psi_e = 316,11$  m H<sub>2</sub>O;  $\Psi$  é a soma dos potenciais matriciais e gravitacionais (m); e b o expoente da equação de liberação de água no solo (adimensional). Neste trabalho o expoente “b” foi calculado segundo Cosby et al. (1984):

$$b = 3,10 + 15,7 \times F_{argila} - 0,3 \times F_{areia} \quad (A4)$$

Uma das formas de se estimar o teor de umidade no solo quando o potencial de entrada de ar é atingido é pela equação proposta por Clapp e Hornberger (1978):

$$\theta_{ad} = \theta_s \left[ \frac{\Psi_s}{\Psi_{ad}} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (A7)$$

Onde  $\theta_s$  é a porosidade (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e  $\Psi_s$  é o potencial matricial na saturação (m). Esses dois parâmetros podem ser estimados pelas equações de Cosby et al. (1984):

$$\theta_s = (50,5 - 3,7 \times F_{argila} - 14,2 \times F_{areia}) / 100 \quad (A8)$$

$$\Psi_s = 10^{(2,17 - 0,63 \times F_{argila} - 1,58 \times F_{areia})} \times 0,01 \quad (A9)$$

Assim, o expoente “b”,  $K_S$  e  $\theta_{ad}$  são parâmetros relacionados com a infiltração de água no solo. Após a passagem da água pela superfície, a água continua em movimento descendente provocando o molhamento das camadas

inferiores da coluna de solo, o que é conhecido como processo de redistribuição. Nesse processo a capacidade de campo tem uma função importante.

Durante a redistribuição da água no solo há formação da frente de umedecimento, que é uma a região do solo onde há variação abrupta da umidade e que provoca o molhamento das camadas inferiores do solo. Nesse contexto, a habilidade do solo de permitir o fluxo de água para além da frente de umedecimento é determinada pela capacidade de campo. A equação utilizada nesse trabalho para estimar o teor de umidade na capacidade de campo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) foi proposta por Clapp e Hornberger (1978):

$$\theta_{fc} = \theta_s \left[ \frac{K_{fc}}{K_s} \right]^{\frac{1}{2b+3}} \quad (\text{A10})$$

Considerando que a capacidade de campo é definida como a condutividade hidráulica de 0,1 mm dia<sup>-1</sup> ou  $K_{fc} = 1,157 \times 10^{-9} \text{ m s}^{-1}$ ;

A água também se move através do solo por meio da absorção de água pelas plantas. O processo de transpiração da vegetação é limitado principalmente pela demanda evaporativa da atmosfera e a água disponível na zona radicular. O ponto de murcha é o teor de umidade do solo no qual a planta não consegue mais absorver água do solo. Sem a limitação da demanda atmosférica por água, a taxa de absorção de água no solo é tanto maior quanto a quantidade de água disponível no solo, sendo que com a redução na disponibilidade de água a taxa de absorção cai rapidamente. Nesse trabalho o teor de umidade do solo no ponto de murcha ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) foi estimado segundo Clapp e Hornberger (1978):

$$\theta_{wp} = \theta_s \left[ \frac{\psi_s}{\psi_{wp}} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (\text{A11})$$

Sendo que o ponto de murcha é definido quando o potencial matricial é de -1,5 MPa ou  $\psi_{wp} = 152,95 \text{ m H}_2\text{O}$ .