ELIANE AKIKO HONDA

**Repartição da água da chuva sob o dossel e umidade do solo no gradiente
fisionômico da vegetação do Cerrado**

São Carlos-SP

2013

ELIANE AKIKO HONDA

Repartição da água da chuva sob o dossel e umidade do solo
no gradiente fisionômico da vegetação do Cerrado.

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Doutor em Ciências
da Engenharia Ambiental

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Giselda Durigan

São Carlos

2013

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

H771 HONDA, ELIANE AKIKO
/ ELIANE AKIKO HONDA; orientadora GISELDA DURIGAN.
São Carlos, 2013.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

1. CERRADO. 2. GRADIENTE DE BIOMASSA. 3. TRANSPRECIPITAÇÃO. 4. ESCOAMENTO PELO TRONCO. 5. INTERCEPTAÇÃO DA ÁGUA DA CHUVA. 6. UMIDADE DO SOLO. 7. RECURSO HÍDRICO. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **ELIANE AKIKO HONDA**.

Título da tese: "Repartição da água da chuva sob o dossel e umidade do solo no gradiente fisionômico da vegetação do Cerrado".

Data da defesa: 29/11/2013

Comissão Julgadora:

Dra. Giselda Durigan (Orientadora)
(Instituto Florestal do Estado de São Paulo/Assis)

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **Augusto Cesar Franco**
(Universidade de Brasília/UnB)

Prof. Titular **Walter de Paula Lima**
(Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP)

Dr. **Maurício Ranzini**
(Instituto Florestal do Estado de São Paulo/Assis)

Resultado:

Aprovada
Aprovado
Aprovado
Aprovado
Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:
Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

ESCAR
Serviço de Pós-Graduação
Protocolado em _____

Aos pais,
Mitsuho e Shozo,
aos quais devo tudo o que sou,
minha eterna gratidão;

aos irmãos,
Sumiko, Augusto e Alexandre,
pelo apoio sempre presente, mesmo que estejam muito, muito distantes,
minha eterna amizade;

à filha,
Meiri,
meu precioso tesouro, um dia você trilhará o seu caminho.
A você, meu eterno amor.

DEDICO

EPÍGRAFE

Uma grande jornada
Sempre tem início com um pequeno passo

Provérbio chinês

AGRADECIMENTOS

Agradeço, encarecidamente, à orientadora, Giselda Durigan, pelo incentivo, confiança, sugestões, conselhos e, acima de tudo, encorajamento e apoio.

Ao Instituto Florestal, pela oportunidade.

Aos funcionários da Floresta Estadual de Assis, seu atual chefe, Osmar Vilas Boas e ex-chefe, José Carlos Molina Max, que, apesar dos recursos sempre escassos, nunca negaram apoio a esta pesquisa.

Ao Professor Walter de Paula Lima, um agradecimento muito especial por ter sido o grande mestre de gerações de hidrólogos no fabuloso mundo da Hidrologia Florestal.

Ao Programa de Pós Graduação da Escola de Engenharia da USP de São Carlos e aos secretários Claudete, Nelsinho e José Luiz, sempre solícitos, pelo enorme apoio com os trâmites burocráticos.

Aos membros da banca examinadora, pela disposição em contribuir na avaliação desta tese.

Ao esposo Wilson, que me ensinou que as barreiras existem para serem vencidas.

Aos colaboradores incansáveis Edison Adriano Berto, Édson Damasceno, Luiz Carlos Malícia, pelo apoio em campo e laboratório.

A Lucia Yuka Mayeda, Margarida Mayeda e Marcos Custódio Nekatschalow, pela acolhida sempre hospitaleira e carinhosa em Piracicaba, em especial à Lucia, amiga de longa data, quase irmã e conselheira matemática.

Às amigas Sabrina de Souza, Carol e Carina, pela hospitalidade inesquecível em São Carlos.

Aos colegas pesquisadores Valdir de Cicco, Franciso Arcova, Mauricio Ranzini, hidrólogos do Instituto Florestal da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo e companheiros nas discussões hidrológicas.

Aos pesquisador Ricardo Marques Coelho e sua orientada Ana Carolina Cunha de Assis, do Instituto Agrônomo de Campinas, pelas dicas preciosas sobre como trabalhar com a umidade do solo.

Ao professor Jonas Teixeira Nery, da UNESP Ourinhos, por ceder gentilmente os dados coletados nas Estações Micrometeorológicas Automatizadas da FEA e EECa.

Ao DAEE, na pessoa de Gré de Araújo Lobo, pela cessão dos dados pluviométricos da EECa.

À pesquisadora Angelica Praelo Pantano, do Instituto Agrônomo de Campinas, pela amizade, pelas respostas às dúvidas meteorológicas e intermediação na cessão dos dados

meteorológicos coletados pela APTA-Médio Paranapanema e ao Alan Gomes, técnico de apoio do Centro de Ecofisiologia e Biofísica – IAC.

Ao Rodrigo Lilla Manzione, professor da UNESP de Ourinhos, e ao colega Antonio Carlos Galvão de Melo, analista ambiental da Floresta Estadual de Assis, pelos conselhos estatísticos. Agradecimentos muito especiais a Rodolfo Cesar Real de Abreu e Augusto Hashimoto de Mendonça, irmãos de orientadora, também pelos valiosos conselhos estatísticos.

À Luiza Maria T. Aparecido, Daniel B. Borges, Carolina B. Jardim, Kamille D. Spera, Dimitrio Schievein e Diego Narita, estagiários e vítimas da fase mais crucial desse empreendimento: a coleta de dados.

À fisioerapeuta Isabela Regis, ao terapeuta ocupacioal Jamerson Vieira e à secretária Odete Agnei, pelo inestimável apoio à minha integridade física e mental.

A lista ainda é extensa e peço perdão aos que não foram citados nominalmente. Essa façanha não teria sido possível sem o apoio e colaboração de todos!

RESUMO

HONDA, E.A. **Repartição da água da chuva sob o dossel e umidade do solo no gradiente fisionômico da vegetação do cerrado**. 2013. 145 f. Tese (Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2013

Apesar da grande área ocupada pelo Cerrado no território brasileiro e de sua importância ecológica e hidrológica, ainda é desconhecida a repartição da água das chuvas no gradiente fisionômico da vegetação nesse bioma. No presente estudo quantificamos a interceptação da água das chuvas e a umidade do solo, para estabelecer correlações entre as características estruturais da vegetação, representadas principalmente pela área basal, e os dados hidrológicos. Para tanto, quantificamos a transprecipitação e o escoamento pelo tronco das árvores, em 15 parcelas representativas do gradiente fisionômico entre o cerrado típico e o cerradão, localizados na Estação Ecológica de Assis (EEcA), SP, para obtenção da proporção da precipitação efetiva que atravessa o dossel e chega à superfície do solo, em comparação com a precipitação total, quantificada a céu aberto. Os indivíduos lenhosos em cada parcela com DAP ≥ 5 cm foram identificados e medidos. A quantidade de transprecipitação foi tanto maior quanto menos complexa a estrutura da vegetação, sendo também influenciada pelas características da chuva incidente. A proporção da transprecipitação também foi fortemente influenciada pela estrutura da vegetação, porém, não foi detectada influência das características das chuvas. Assim, foi possível concluir que, em ambiente de Cerrado, é a estrutura da vegetação que influencia de forma decisiva a proporção de água que alcançará o solo sob forma difusa. A facilidade em captar a água da chuva e escoá-la pelo tronco variou em função de atributos da árvore, sendo que árvores mais altas e com copa volumosa escoaram maior quantidade, enquanto árvores de crescimento monopodial, tronco ereto e reto e copa compacta têm maior eficiência de captação. O agrupamento das parcelas em diferentes fisionomias resultou em diferenças significativas nas taxas de precipitação efetiva e interceptação, indicando que elas devem ser caracterizadas hidrologicamente como ambientes distintos, onde há gradação na quantidade de água que chega ao solo em função do gradiente de biomassa. A transição da entrada de água ao solo no gradiente do Cerrado é crescente e

contínua, desde as comunidades menos densas (cerrado típico) até as comunidades mais densas (cerradão). A dinâmica e a disponibilidade de água do solo foram mais influenciadas pelas propriedades do solo do que pela cobertura vegetal, quando ambos os fatores são variáveis. Concluímos que, em regiões nas quais a água é um recurso escasso, o manejo visando controlar a biomassa da vegetação é um recurso válido, visto que os resultados apontam para a importância das fisionomias mais abertas do Cerrado para a produção hídrica.

Palavras-chave: Cerrado, gradiente de biomassa, transprecipitação, escoamento pelo tronco, interceptação da água da chuva, umidade do solo, recurso hídrico.

ABSTRACT

HONDA, E.A. **Rainfall partitioning under the canopy and soil moisture in the physiognomy gradient of Cerrado vegetation.** 145 f. Thesis (Doctoral) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brazil. 2013.

Despite the large area occupied by the Cerrado in Brazil and its ecological and hydrological importance, the rainfall partitioning in the physiognomy gradient of the vegetation in this biome is still to be elucidated. In this study, we quantified rainfall interception and the of soil moisture to establish correlations between vegetation structure, represented by the basal area, and hydrological data. Therefore, we quantified the throughfall and stemflow of trees in 15 plots representing the physiognomic gradient between typical cerrado and cerrado, located at Assis Ecological Station (EEcA), SP, to obtain the net rainfall reaching the ground, compared to the total precipitation quantified at open adjacent area. The woody plants with $DBH \geq 5$ cm were identified and measured in every plot. Throughfall was lower when the vegetation structure was more complex, and was not influenced by micrometeorological factors. We concluded that, in Cerrado, vegetation structure decisively influences the proportion of rainfall to reaching the soil. The stemflow amount was greater the larger the tree and the tree canopy, while trees with monopodial growing, erect and straight trunk and compact canopy had more capture efficiency. Grouping plots by Cerrado physiognomies resulted in significant differences in both net precipitation and interception, indicating that they must be categorized as hydrologically distinct environments. There is increasing and continuous transition from the more open communities (cerrado típico) to the forest physiognomies (cerrado) in the proportion of rainfall retained by the canopies. The dynamics and the availability of soil water were more influenced by soil properties than the vegetation cover, when both factors varies. This study points out the importance of low biomass Cerrado physiognomies for hydric production and we concluded that, when and where water is a scarce resource, controlling vegetation biomass can be recommended to aiming at water production.

keywords: Cerrado, biomass gradient, throughflow, stemflow, rainwater interception, soil moisture, water resource.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Representação esquemática do gradiente fisionômico da vegetação do cerrado e fatores condicionantes	1
Figura 2	- Localização das parcelas de estudo na EEcA.....	32
Figura 3	- Vista do cerrado típico. Estrato arbóreo descontínuo e piso parcialmente coberto por gramíneas	33
Figura 4	- Vista do cerrado denso. Estrato arbóreo descontínuo, gramíneas ausentes, terreno coberto por arbustos e subarbustos	33
Figura 5	- Vista do cerradão. Fisionomia florestal, com estrato arbóreo contínuo. Gramíneas, arbustos muito raros ou ausentes	33
Figura 6	- Croqui de cada parcela de 20 x 50 m, com as sub-parcelas de 10 x 10 m e as posições dos pluviômetros e do ponto georeferenciado	34
Figura 7	- Pluviômetro de funil, equipamento utilizado para coleta da água das chuvas.....	35
Figura 8	- Transprecipitação em função da área basal da vegetação de Cerrado na EEcA	45
Figura 9	- Equipamento utilizado para coleta de água do escoamento pelo tronco.....	57
Figura 10	- Aspecto da subparcela de coleta do escoamento pelo tronco	57
Figura 11	- Detalhe da espuma de poliuretano moldada no tronco, impermeabilizada com silicone e mostrando o canal de drenagem para coleta da água do escoamento pelo tronco	58
Figura 12	- Escoamento pelo tronco em árvores individuais, em litros (Et_{iL}), para um total de chuva de 580,2 mm (A) e coeficiente de escoamento pelo tronco C_{Et} (B), na Estação Ecológica de Assis, SP	65
Figura 13	- Escoamento pelo tronco em árvores individuais, em milímetros (Et_{imm}), para um total de chuva de 580,2 mm (A) e em porcentagem do volume de chuva que cai sobre a copa do indivíduo ($Et_{i\%}$) (B) na EEcA, SP.	65
Figura 14	- Somatório do volume do escoamento pelo tronco, em função do volume de chuva por coleta, de todos os 129 indivíduos, em 17 coletas efetuadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012 na EEcA, SP	66
Figura 15	- Eficiência de captação da água da chuva pelo tronco ($Et\%$), em função do volume de chuva por coleta, obtida a partir da média de Et_{imm} de todos os 129 indivíduos, em 17 coletas efetuadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012 na EEcA, SP.	67

Figura 16 -	Volume de água da chuva que escoar pelo tronco em função do volume de chuva por coleta. Dados do indivíduo de número 2865, <i>Copaifera langsdorffii</i> , com um dos menores somatório de Et_{imm} em 17 coletas de chuva efetuadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012 na EEcA, SP	67
Figura 17 -	Volume de água da chuva que escoar pelo tronco em função do volume de chuva por coleta. Dados do indivíduo de número 256, <i>Machaerium acutifolium</i> , com o maior somatório de Et_{imm} em 17 coletas de chuva efetuadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012 na EEcA, SP	68
Figura 18 -	Coeficiente de escoamento pelo tronco C_{Et} em função da altura da copa de árvores do Cerrado (H_{copa}) na EEcA, SP	69
Figura 19 -	Eficiência da captação da água da chuva pela copa $Et_i\%$ em função da área de projeção da copa (APC) na EEcA, SP	70
Figura 20 -	$Et_i\%$ em função do hábito de crescimento das árvores na EEcA, SP	70
Figura 21 -	$Et_i\%$ em função da tortuosidade do tronco na EEcA, SP	71
Figura 22 -	$Et_i\%$ em função da inclinação do tronco na EEcA, SP	72
Figura 23 -	Eficiência em captar a água da chuva pela copa e escoar pelo tronco $Et_i\%$ em função da espécie na EEcA, SP.....	73
Figura 24 -	Relações prováveis entre $Et_i\%$ e a umidade no perfil do solo sob árvores com eficiência de captação da água da chuva alta (A) e baixa (B)	86
Figura 25 -	Repartição da água da chuva em função da área basal da comunidade na EEcA. A) transprecipitação, B) escoamento pelo tronco, C) interceptação.....	93
Figura 26 -	Proporção d da comunidade a repartição da água da chuva em função da área basal na EEcA. $I_{\%}$: interceptação; $Et_p\%$: escoamento pelo tronco na parcela; $P_{ip}\%$: transprecipitação; $Pe_p\%$ = precipitação efetiva na parcela ..	94
Figura 27 -	Repartição da água das chuvas em diferentes fisionomias do Cerrado na EEcA. A) transprecipitação; B) escoamento pelo tronco; C) interceptação.....	95
Figura 28 -	Adensamento na vegetação da EEcA de 1962 a 2006	100
Figura 29 -	Umidade padronizada do solo em função da área basal da vegetação do Cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP	108
Figura 30 -	Umidade padronizada em função do conteúdo de areia grossa no solo da Estação Ecológica de Assis, SP	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Proporção da interceptação e modelos de estimativa desta variável em diversos tipos de cobertura vegetal	7
Tabela 2	- Proporção de transprecipitação e modelos para estimativa da variável em relação ao volume total de chuva em diferentes tipos de cobertura vegetal	11
Tabela 3	- Proporção do escoamento pelo tronco e modelos para estimativa desta variável em relação ao volume total de chuva em diferentes tipos de vegetação.....	18
Tabela 4	- Coordenadas geográficas dos pluviômetros, pluviógrafos e equipamento micrometeorológico automatizado instalados na Estação Ecológica de Assis e adjacências, para obtenção de dados de precipitação a céu aberto.....	36
Tabela 5	- Correlações de Spearman entre os valores de Pi_{mm} e $Pi_{\%}$ por coleta e as variáveis micrometeorológicas correspondentes a cada coleta, no período compreendido entre outubro de 2010 a janeiro de 2012 na EEcA.....	44
Tabela 6	- Ranqueamento de correlações de Spearman entre as variáveis relativas ao porte da árvore, coeficiente de escoamento pelo tronco e eficiência em captar a água da chuva pela copa na EEcA, SP.....	69
Tabela 7	- Ranqueamento de Spearman entre os atributos funcionais da árvore – volume da casca, número de ramos, espessura da casca e $Et_i\%$ na EEcA, SP	72
Tabela 8	- Ranqueamento de Spearman entre conteúdo de areia grossa (AG), areia fina (AF), silte (S), argila (A), água disponível (AD) e umidade padronizada mediana (U) do solo na Estação Ecológica de Assis, SP.....	109

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	001
1.1	O gradiente fisionômico do cerrado e fatores condicionantes	002
1.2	A hidrologia do cerrado e sua importância para a manutenção dos recursos hídricos	004
1.3	A vegetação e os processos hidrológicos	005
1.3.1	<i>Interceptação</i>	006
1.3.2	<i>Transprecipitação (precipitação interna)</i>	010
1.3.3	<i>Escoamento pelo tronco</i>	016
1.4	Processos hidrológicos em savanas	022
1.5	Métodos de quantificação dos processos hidrológicos	023
1.5.1	<i>Quantificação da precipitação a céu aberto</i>	023
1.5.2	<i>Quantificação da transprecipitação</i>	024
1.5.3	<i>Quantificação do escoamento pelo tronco</i>	026
2	OBJETIVOS	029
2.1	Objetivo geral	029
2.2	Objetivos específicos	029
3	MATERIAL E MÉTODOS	030
3.1	Caracterização geral da área de estudo	030
3.2	Quantificação da precipitação total a céu aberto	035
CAPÍTULO I		037
ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO E TRANSPRECIPITAÇÃO NO GRADIENTE FISIONÔMICO DO CERRADO		037
1	INTRODUÇÃO	037
2	MATERIAL E MÉTODOS	040
2.1	Área de estudo	040
2.2	Coleta de dados.	040
2.2.1	<i>Obtenção de dados micrometeorológicos</i>	040
2.2.2	<i>Estrutura da comunidade vegetal</i>	040
2.2.3	<i>Precipitação em área aberta (Pt) e transprecipitação (Pi)</i>	041
2.3	Análise de dados	042

2.3.1	<i>Influência dos fatores micrometeorológicos na proporção da água da chuva na transprecipitação</i>	042
2.3.2	<i>Modelagem da transprecipitação $Pi_{\%}$ em função do gradiente de área basal</i>	043
3	RESULTADOS	044
3.1	Transprecipitação (precipitação interna P_i) na EEcA	043
3.2	Influência dos fatores micrometeorológicos sobre a transprecipitação	044
3.3	Transprecipitação em função do gradiente de biomassa	045
4	DISCUSSÃO	046
4.1	Transprecipitação no Cerrado da Estação Ecológica de Assis em comparação com outros ecossistemas	046
4.2	Fatores micrometeorológicos e sua influência sobre a transprecipitação	048
4.3	Variação da proporção da transprecipitação em função do gradiente de biomassa.....	049
5	CONCLUSÕES	051
CAPÍTULO II		053
FATORES QUE INFLUENCIAM O ESCOAMENTO PELO TRONCO EM ÁRVORES DO CERRADO		053
1	INTRODUÇÃO	053
2	MATERIAL E MÉTODOS	055
2.1	Área de estudo	055
2.2	Quantificação da Precipitação a céu aberto	056
2.3	Quantificação do escoamento pelo tronco	056
2.4	Caracterização das árvores pelos seus atributos	059
2.4.1	<i>Atributos dendrométricos</i>	060
2.4.2	<i>Atributos morfológicos e de arquitetura</i>	060
2.5	Análise de dados	061
2.5.1	<i>Caracterização das árvores</i>	062
2.5.2	<i>Análise geral do escoamento pelo tronco em árvores individuais</i>	062
2.5.3	<i>Escoamento pelo tronco em função do volume de chuva.</i>	063
2.5.4	<i>Escoamento pelo tronco em função do porte da árvore</i>	063
2.5.5	<i>Escoamento pelo tronco em função dos atributos funcionais</i>	063
2.5.6	<i>Escoamento pelo tronco das árvores de diferentes espécies do Cerrado</i>	064

3	RESULTADOS	064
3.1	Escoamento da água da chuva pelo tronco de árvores individuais	064
3.2	Escoamento pelo tronco em função do volume de chuva	066
3.3	Escoamento pelo tronco em função do porte da árvore	068
3.4	Escoamento pelo tronco em função dos atributos funcionais	070
3.5	Escoamento pelo tronco das árvores de diferentes espécies do Cerrado	072
4	DISCUSSÃO	073
4.1	Análise geral do escoamento pelo tronco em árvores individuais	073
4.2	Escoamento pelo tronco em função do volume de chuva	074
4.3	Escoamento pelo tronco em função do porte da árvore	077
4.4	Escoamento pelo tronco em função dos atributos funcionais	079
4.5	Escoamento pelo tronco das árvores de diferentes espécies do Cerrado	083
4.6	Importância do escoamento pelo tronco para árvores individuais	085
5	CONCLUSÕES	087
CAPÍTULO III		089
REPARTIÇÃO DA ÁGUA DA CHUVA NO GRADIENTE FISIONÔMICO		
DO CERRADO		089
1	INTRODUÇÃO	089
2	MATERIAL E MÉTODOS	090
2.1	Área de estudo	090
2.2	Métodos	090
2.2.1	<i>Repartição da água da chuva no gradiente de biomassa.....</i>	<i>090</i>
2.2.2	<i>Repartição da água da chuva em cada fisionomia</i>	<i>092</i>
3	RESULTADOS	092
3.1	Repartição da água da chuva no gradiente de biomassa do Cerrado	092
3.2	Repartição da água da chuva nas diferentes fisionomias do Cerrado	094
4	DISCUSSÃO	095
4.1	Proporção de escoamento pelo tronco nas parcelas	095
4.2	Proporção de precipitação efetiva ($P_{e\%}$) no gradiente de biomassa do Cerrado	097
4.3	Proporção de interceptação ($I_{\%}$) no gradiente de biomassa do Cerrado	098
4.4	A água da chuva que chega ao solo nas diferentes fisionomias do Cerrado	099

5	CONCLUSÕES	102
CAPÍTULO IV		
A UMIDADE DO SOLO NO GRADIENTE DE BIOMASSA DO CERRADO		103
1	INTRODUÇÃO	103
2	MATERIAL E MÉTODOS	105
2.1	Área de estudo	105
2.2	Métodos	105
2.3	Análise dos dados	106
2.3.1	<i>Umidade padronizada do solo no gradiente de biomassa do Cerrado</i>	107
2.3.2	<i>Umidade padronizada em função das características do solo do Cerrado</i>	107
3	RESULTADOS	108
3.1	Variação da umidade padronizada no gradiente de biomassa	108
3.2	Umidade padronizada em função das características do solo	109
4	DISCUSSÃO	110
4.1	Variação da umidade do solo no gradiente de biomassa	110
4.2	O solo como fator condicionante da vegetação do Cerrado	112
5	CONCLUSÕES	115

REFLEXÕES SOBRE A HIDROLOGIA DO CERRADO E IMPLICAÇÕES SOBRE SEU MANEJO E CONSERVAÇÃO		117
REFERÊNCIAS		121
APÊNDICES		139
APÊNDICE A - Resumo das coletas e das características das chuvas envolvida nas coletas registradas na estação meteorológica automatizada d APTA – Médio Paranapanema, no período compreendido entr outubro de 2010 a janeiro de 2012		140
APÊNDICE B - Transprecipitação medida em 15 parcelas com diferentes fisionomias de cerrado na Estação Ecológica de Assis no período de outubro de 2010 a janeiro de 2012 para uma precipitação total correspondente de 908,5 mm		142
APÊNDICE C - Caracterização estrutural da comunidade vegetal em 15 parcelas ao longo do gradiente fisionômico do Cerrado, nas quais foi realizada a quantificação da transprecipitação		143

APÊNDICE D - Espécies arbóreas e número de indivíduos amostrados para quantificação de escoamento pelo tronco na Estação Ecológica de Assis, SP	144
---	-----

1 INTRODUÇÃO GERAL

Internacionalmente, o Cerrado é considerado uma vegetação savânica, que tem relações ecológicas e fisionômicas com outras savanas da América Tropical e de continentes como a África e a Austrália. Segundo Walter, Carvalho e Ribeiro (2008), o termo “savana” é utilizado para referir-se à vegetação com estrato graminoso contínuo ou descontínuo, contendo árvores ou arbustos espalhados, estruturalmente intermediária entre floresta e campo; essas paisagens existem em todas as regiões tropicais e são vizinhas de praticamente todas as formações tropicais-tipo, cobrindo perto de um terço da superfície terrestre.

No Brasil, a área de domínio do Cerrado corresponde a mais de 20% do território, compreendendo extensa área contínua nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Tocantins, Bahia, Maranhão e Piauí e também penínsulas e áreas disjuntas que se estendem por outros estados, como São Paulo (EITEN, 1972). O bioma compreende um mosaico de fisionomias que variam desde o campo limpo até o cerradão, sendo que o cerradão marca a transição entre savana e floresta tropical estacional semidecidual. A este gradiente fisionômico há um gradiente correspondente de biomassa (Figura 1), condicionado por fatores naturais que determinam a capacidade de suporte do meio e/ou por pressões antrópicas, especialmente o pastoreio, incêndios frequentes e exploração de lenha.

Figura 1 - Representação esquemática do gradiente fisionômico da vegetação do cerrado e fatores condicionantes (Adaptado de DURIGAN et al., 2011)

Diversos autores (COUTINHO, 1982, 1990; EITEN, 1972; GOODLAND; FERRI, 1979; PIVELLO; COUTINHO, 1996) consideram que o processo sucessional do Cerrado consiste apenas na alteração de fisionomias mais abertas para fisionomias mais densas, até um clímax que é definido pela capacidade de suporte do meio, sem substituição de espécies. Esse processo sucessional tende a ocorrer com a supressão dos agentes de perturbação, especialmente o fogo, e que fisionomias abertas de Cerrado poderão desaparecer em algumas regiões (DURIGAN et al., 1987; DURIGAN; RATTER, 2006; RATTER et al., 1988).

1.1 O gradiente fisionômico do cerrado e fatores condicionantes

Os fatores condicionantes do Cerrado foram e continuam sendo alvo de controvérsias. Durante muito tempo acreditou-se que as características escleromórficas do Cerrado eram decorrentes de deficiência hídrica (WARMING, 1973). Ferri (1963, p. 20) aponta Rawitscher (1948) como sendo o pioneiro em considerar “seriamente a possibilidade de que a vegetação do cerrado não fosse condicionada pela falta de água”, “após observações feitas em várias partes do Estado de São Paulo. De fato, após calcular o balanço hídrico de várias localidades com vegetação de cerrado, Camargo (1963, p. 107) concluiu que “o macroclima, sob o ponto de vista do fator umidade” parece “não ter papel decisivo na determinação da vegetação de Cerrado”. Embora o clima do Cerrado se caracterize por invernos comumente secos e verões chuvosos, a precipitação média anual varia de 600 mm a 2.200mm (ADÁMOLI et al., 1987). Esta pluviosidade assegura disponibilidade de água para o estrato arbustivo-arbóreo durante todo o ano para espécies de maior porte e raízes mais profundas, de forma que somente o estrato herbáceo sofre seca total da parte aérea no inverno e rebrota na estação chuvosa.

Por essa aparente suficiência de água, creditada às raízes muito profundas (FERRI, 1963) e bem desenvolvidas desde a fase de plântulas (BROWN; ARCHER, 1990; RUBIN FILHO; MORAES, 1998), que alcançam as reservas de água do subsolo durante todo o ano, as relações hídricas foram deixadas de lado e outras hipóteses foram propostas para explicar o aspecto xeromórfico do Cerrado. Levantou-se a hipótese de que a distribuição atual do Cerrado foi condicionada pela ação antrópica, especialmente por incêndios frequentes (RAWITSCHER, 1948). Depois, atribuiu-se às características desfavoráveis do solo (deficiências minerais, saturação por alumínio, etc.) a baixa biomassa e o aspecto xeromórfico da vegetação (GOODLAND; FERRI, 1979). EITEN (1994) associou as fisionomias de

Cerrado a diversos fatores: fertilidade do solo, teor de alumínio e saturação hídrica das camadas superficiais, de modo que cada fisionomia seria um clímax edáfico. Adámoli et al. (1987) consideraram os solos ácidos, de baixa fertilidade e o clima estacional como os principais fatores ecológicos determinantes da presença do Cerrado. A ocorrência de fatores hídricos ou edáficos compensadores ou limitantes condicionariam a existência das diversas fisionomias.

A tendência atual é admitir que clima, biota e solo agiriam conjuntamente, contribuindo para o aspecto geral da vegetação (RIBEIRO; WALTER, 1998). Assim, Walter, Carvalho e Ribeiro (2008) enumeram o clima, o solo, a hidrologia, a geomorfologia, o fogo e o pastoreio como os fatores mais importantes a determinar a existência de fisionomias savânicas. Franco, Haridasan e Ferreira (2008) apontam a seca anual regular como o principal fator determinante da estrutura e funcionamento do Cerrado, sendo que os solos ácidos, com alta taxa de alumínio trocável e pobres em nutrientes seriam um fator limitante adicional para o crescimento das plantas. Oliveira Filho e Ratter (2002) consideram como os mais importantes fatores condicionantes do Cerrado a estação seca definida, a fertilidade e a drenagem do solo, o regime de fogo e as flutuações climáticas no Quaternário. Dentre estes fatores, Ratter e Dargie (1992) consideraram o solo como um dos mais importantes. Rossatto et al. (2012) documentaram o gradiente na profundidade do lençol freático sendo condicionado pelo gradiente topográfico e ambos relacionados com o gradiente fisionômico, em área de Cerrado próxima a Brasília. Ruggiero et al. (2006), utilizando análises multivariadas e dados secundários, concluíram que a hierarquia dos fatores condicionantes pode mudar entre locais, que fatores hidrológicos influenciam a estrutura e a fisionomia da vegetação e que, por fim, há restrições sobre a importância dos aspectos nutricionais. Durigan et al. (2003) analisaram os fatores que explicam a similaridade florística entre 202 fragmentos de Cerrado remanescentes no estado de São Paulo e estados adjacentes e concluíram que, dentro dessa região, o clima (temperatura e duração da estação seca) exerce a maior influência, seguido das propriedades dos solos.

Estudos recentes têm comprovado que a “oportunidade de ocupação” de uma área por uma espécie vegetal está intimamente relacionada com seus aspectos hídricos. Carvalho et al. (2005) consideraram a umidade do solo como o principal fator a influenciar a distribuição da vegetação em um gradiente de solos e topografia em um trecho de floresta ripária em Minas Gerais. Em estudo realizado no estado do Mato Grosso, Marimon Jr. e Haridasan (2005) concluíram que o fator determinante para a coexistência de cerrado *stricto sensu* e cerradão não é, definitivamente, a fertilidade do solo, mas a disponibilidade hídrica, pois solos com

maior teor de argila, comuns sob cerradão, são capazes de reter maior quantidade de água ao longo do perfil e por um tempo mais longo do que os solos arenosos característicos das fisionomias mais abertas de cerrado. Resultados semelhantes têm sido apontados por outros autores (ROSSI et al., 2005; TOPPA, 2004) e, de fato, na Estação Ecológica de Assis (EEcA), foi comprovado que parâmetros granulométricos e físico-hídricos e a morfologia dos solos explicam as diferenças estruturais entre a fisionomia florestal e as savânicas, sendo que o solo do cerradão possui maior capacidade de retenção de água em relação ao cerrado *stricto sensu*, devido ao maior teor de argila e maior microporosidade (ASSIS et al., 2010). Na mesma localidade, Juhász et al. (2007), estudando uma topossequência sob a fisionomia cerradão, constataram oscilações significativas da umidade do solo ao longo do ano, mas concluíram que é a baixa retenção de água nos horizontes de solo superficiais e subsuperficiais, condicionada pela elevada macroporosidade local, que determina as características da vegetação.

A incorporação de fatores hidrológicos aos condicionantes de vegetação, especialmente pelas suas relações com a disponibilidade hídrica do solo, torna ainda mais complexo o balanço entre os fatores naturais e antrópicos que determinam as fisionomias do Cerrado. Por sua vez, no ambiente de Cerrado são pouco conhecidas as influências que os atributos da comunidade vegetal exercem sobre os processos hidrológicos.

1.2. A hidrologia do cerrado e sua importância para a manutenção dos recursos hídricos

O Cerrado está situado, em sua maior parte, em zonas de elevada altitude no Planalto Central brasileiro e desempenha função fundamental no processo de distribuição dos recursos hídricos no território nacional, fornecendo água para oito das 12 regiões hidrográficas brasileiras. O bioma Cerrado é responsável por cerca de 4% da vazão na Bacia Amazônica, 71% na Araguaia-Tocantins, 11% na Atlântico Norte-Nordeste, 94% na do São Francisco, 7% na Atlântico Leste e 71% na Paraná-Paraguai, totalizando 14% de toda a vazão que percorre o Brasil (LIMA; SILVA, 2008). Por estar localizado nas partes mais altas de grandes bacias hidrográficas, impactos sobre o Cerrado comprometem a qualidade dos recursos hídricos superficiais das bacias hidrográficas como um todo.

Há que se considerar que, sob o domínio do Cerrado, ocorre grande parte da recarga do aquífero Guarani e que a importância do Cerrado como produtor de água é enfatizada pela proposta de criação do Programa de Conservação e Recuperação das nascentes das principais regiões hidrográficas do Brasil – Arco das Nascentes do Brasil, atualmente em discussão no Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2012a).

A produção hídrica de 14% da água em 24% do território pode parecer pequena em relação aos 73% produzidos por 46% do território nacional na Bacia Amazônica (LIMA; SILVA, 2008). Porém, a Bacia Amazônica, com muita água disponível e baixa densidade populacional, tem realidade distinta das bacias hidrográficas cujas nascentes encontram-se no Cerrado, nas quais se concentra grande parte da população das regiões sul, sudeste, nordeste e centro-oeste do Brasil e a quase totalidade da produção agropecuária do país. A expansão agrícola recente sobre o Cerrado pode ter consequências muito negativas sobre os recursos hídricos, mas são raras as ocasiões em que esses são lembrados. Para a continuidade da geração dos benefícios e minimização dos impactos negativos da ocupação agropecuária do Cerrado, são necessárias informações para embasar o gerenciamento dos recursos envolvidos. Neste contexto, são desconhecidas, em grande parte, as influências ecológicas e hidrológicas que as mudanças no uso do solo acarretam, especialmente no que tange aos processos hidrológicos e à disponibilidade de recursos hídricos no Cerrado. Assim, é relevante a compreensão das relações entre a água das chuvas e a vegetação nesse Bioma, pois, em última instância, é desta relação que dependem as reservas de água subterrânea e superficiais de boa parte do país.

1.3. A vegetação e os processos hidrológicos

A bacia hidrográfica é um sistema aberto em equilíbrio dinâmico, com entrada e saída de matéria e energia, sendo que a vegetação cumpre função reguladora desse fluxo. A função da vegetação como reguladora hídrica tem início com a entrada de água no sistema. Tanto maior a possibilidade de interação entre a água e a vegetação quanto maior a complexidade estrutural da comunidade vegetal. Havendo interação, a água pode ficar retida na folhagem e evaporar (interceptação); pode gotejar de forma difusa, compondo a transprecipitação, ou chegar ao solo na forma de escoamento pelo tronco. A partir da chegada da água da chuva ao solo, a separação entre a água que infiltra e a água que escorre pela superfície é função da

inclinação e rugosidade do terreno, sendo a rugosidade fortemente influenciada pela cobertura do solo (KITAHARA et al, 1995; LOURENÇÃO; HONDA, 2007; OCHIAI; NAKAMURA, 2004). Uma vez no interior do solo, o processo fisiológico de transpiração diminui a quantidade de água armazenada, que poderá influenciar a produção de água da bacia hidrográfica ou a quantidade de água que alimenta os reservatórios subterrâneos.

1.3.1 Intercepção

Horton (1919) quantificou a intercepção das chuvas em florestas de região temperada, obtendo proporções entre 15 a 80% do total anual e observou que espécies com folhas aciculadas interceptam maior proporção de chuva, uma vez que sua folhagem tem maior capacidade de armazenamento de água. Kuraji e Tanaka (2003), em revisão sobre intercepção da água da chuva em região tropical, estabeleceram limites gerais entre 10 e 20%, mas mencionaram também valores entre 35 a 45%, assim como valores inferiores a 10% e concluíram que regiões tropicais em geral têm maior proporção de chuva atravessando o dossel, em relação às regiões temperadas (Tabela 1).

Tabela 1 - Proporção da interceptação da chuva e modelos de estimativa desta variável em diversos tipos de cobertura vegetal. I_{mm} : interceptação em mm; $I_{\%}$: interceptação em %; FPT: Floresta pluvial tropical; FE: floresta estacional; FES: floresta estacional semidecidual; AF: agrofloresta (*Teobroma cacao* sob floresta pluvial tropical); classificação climática segundo Köppen; AB: área basal; Pt: volume total de chuva; *¹: Período chuvoso (outubro-março); *²: período menos chuvoso (abril-setembro); r^2 : coeficiente de determinação da regressão.

Cobertura vegetal	local	clima	AB (m ² ha ⁻¹)	I (%)	Modelo preditivo	r ²	fonte
FPT	Indonésia	Af	50-69	18~53			Dietz et al., 2006
FPT	Indonésia	Af	22-31	10~21			Verrimmen et al., 2007
FPT	Colômbia	AFi		17~18			Verrimmen et al., 2007
FPT terra firme	Jaru, Rondonia	Am		12			Ubarana, 1996
FPT terra firme	Vale do Rio Doce, Pará	As		13			Ubarana, 1996
FPT terra firme	Manaus, Am	Af		20	I%=35,1 Pt ^{0,189}	0,26	Franken et al., 1982
FPT terra firme	Manaus, Am	Af		9			Lloys et al., 1988
FPT terra firme	Amazonas			5			Jordan; Heuveldop, 1981
FPT terra baixa secundária	Java	Am		21			Calder et al., 1986
FPT montana	Tanzania				I _{mm} =0,896 log (Pt) +0,765	0,68	Jackson, 1971.
FPT - regeneração	Cunha, SP	Cwb		19	I _{mm} =0,548+0,147 Pt ^{*1}	0,81 ^{*1}	Arcova et al., 2003
FPT - regeneração	Cunha, SP	Cwb		19	I _{mm} =0,062+0,267 Pt ^{*2}	0,58 ^{*2}	Arcova et al., 2003
FPT - regeneração	Cubatão, SP	Cwb		9	I _{mm} =1,788-0,292 Pt	0,01	Naton; Vellardi, 1992
FPT desbaste	Indonésia	Af	35-67	7~29			Dietz et al., 2006
FE temperada de coníferas, 500 anos	Washington, USA	Cfb		24			Link et al., 2004
<i>Quercus petraea</i> , 43 anos	França	Cfb	25	23			Breda et al., 1995
<i>Quercus petraea</i> , 43 anos	França	Cfb	18	16			Breda et al., 1995
Florresta temperada diversos	Japão				I%=12+0,00498(arrv ha ⁻¹)	0,43	Komatsu, 2007
AF	Indonésia	Af	9-26	0~18			Dietz et al., 2006
<i>Pinus caribaea</i> 6 anos	Piracicaba	Cfa	13,5	7			Lima, 1976
<i>Eucalyptus saligna</i> 6 anos	Piracicaba	Cfa	15,4	13			Lima, 1976
Cerradão	São Manuel, SP			17		baixo	Leopoldo; Conte 1985
árvores e arbustos	Mexico	Bsh		8	I _% =4,43+ 81,61/(3,88+Pt)	0,77	Carlyle-Moses, 2004
arbustos	Mexico	Bsh		19	I _{mm} =0,62+0,22Pt	0,75	Navar; Bryan, 1990

Locais onde os eventos de chuva têm longa duração e baixa intensidade, como nas regiões de alta latitude, são propensos a maiores perdas evaporativas pelo dossel durante os eventos, resultando em menor proporção de chuva que atravessa o dossel (KURAJI; TANAKA, 2003). Em locais cujos eventos hídricos são menos duradouros e mais intensos, como em regiões de baixa latitude, o tempo e a possibilidade de interação entre as gotas de chuva e folhagem é menor, o que aumenta a proporção da chuva que atravessa o dossel (KURAJI; TANAKA, 2003). Calder, Wright e Murdiyarso (1986) atribuem o aumento da proporção da chuva que atravessa o dossel, nas florestas de Java, ao maior tamanho das gotas de chuva em eventos com maior intensidade, o que aumenta a velocidade terminal e a energia cinética da gota, fazendo com que atravesse o dossel vegetal com mais facilidade. A estrutura das folhas, relativamente largas, planas e com superfície cerosa nessa região, também colabora para reduzir a retenção das gotas de chuva. Locais com ventos intensos e frequentes diminuiriam a capacidade de retenção transitória de água pelas copas, devido ao movimento de ramos e folhas. Já a capacidade de retenção transitória de água pelo tronco, alta em árvores com casca espessa e fissurada de regiões tropicais, não seria afetada pelo vento (HERWITZ, 1985).

A repartição da chuva depende, entre outros fatores, do volume do evento chuvoso (TOBÓN MARIN; BOUTEN; SEVINK, 2000). Assim, a porcentagem de perda por interceptação varia de forma inversa com a chuva, seja em volume ou em intensidade, até atingir um valor constante. Em eventos individuais e sob árvores isoladas, em Albany, EUA, Horton (1919) obteve desde 100% de interceptação em chuvas inferiores a 1,27 mm, com diminuição progressiva até a proporção de perda atingir um valor constante, em torno de 25% em chuvas de grande montante. Jordan e Heuvelod (1981) também observaram 100% de interceptação em chuvas com volume inferior a 5 mm e 8% em chuvas com volume superior a 50 mm em floresta amazônica na Venezuela. Franken et al. (1982), em floresta de terra firme no Amazonas, verificaram que, para chuvas superiores a 20 mm, a interceptação se tornou constante em 20%. Em Mata Atlântica secundária, a interceptação estabilizou-se em 16,5% em chuvas com montante superior a 40 mm, em Cunha, SP (CICCO et al., 1986/88). Na Reserva de Jaru, Rondônia, as perdas por interceptação em chuvas com intensidades inferiores a 2 mm hora⁻¹ variaram entre 60 e 70%, diminuindo progressivamente com o aumento da intensidade da chuva, até atingirem valores proporcionalmente insignificantes em chuvas com intensidade superior a 40 mm hora⁻¹ (UBARAMA, 1996).

Franken et al. (1982) verificaram que a interceptação decai exponencialmente com o volume da chuva, mas concluíram que a curva é explicada somente em 25% pelo volume total

de chuva. Este resultado respalda a afirmação de Jackson (1975), após estudo dos parâmetros da chuva relacionados com a interceptação, na Tanzânia, que concluiu que a quantidade da chuva a transpassar o dossel, em regiões tropicais, depende mais das características da chuva (intensidade máxima, duração, frequência) do que do volume total.

Na presença de vegetação, a água da chuva que não é retida pelas copas chega ao solo como transprecipitação e escoamento pelo tronco, que, juntos, compõem a precipitação efetiva. A diferença entre a precipitação total e a efetiva significa redução na quantidade de água que efetivamente atinge o solo e, como consequência, diminuição na produtividade hídrica. De fato, no estado de Texas, EUA, Ball e Taylor (2003) defendem o controle da biomassa da vegetação para o manejo da produção hídrica. Em comunicação oral, a psicóloga com experiência em tradições indígenas Baker-Pilgrim (2009) afirmou que, durante pelo menos 40.000 anos, os aborígenes australianos habitantes de savanas aumentavam a disponibilidade de água diminuindo a biomassa vegetal, utilizando o manejo do fogo. A documentação sobre aumento da produção hídrica após execução de operações silviculturais ou mudanças do uso da terra que diminuem a cobertura florestal, ou sobre a diminuição da produção hídrica após aumento da cobertura vegetal é extensa (BOSH; HEWLETT, 1982; BROWN et al., 2005; BRUIJNZEEL, 1990; CORNISH; VERTESSY, 2001; SWANK; SWIFT; DOUGLASS, 1984). Vários são os fatores ou processos que ocasionam maiores taxas de evaporação na floresta em relação às demais formações vegetais. Entre eles, a maior rugosidade aerodinâmica da superfície da copa, que leva à maior turbulência aerodinâmica (MONTEITH, 1973); maior acesso à água subterrânea pelo sistema radicular em período de seca (CALDER et al., 1997; DAWSON, 1996; JACKSON. et al., 1999; OLIVEIRA et al., 2005a, b; ROSSATO et al., 2012; SCHOLZ et al., 2002); maior capacidade de armazenamento da água no interior dos troncos, que permite transpiração diurna e reposição noturna (VERBEECK et al., 2007); regulação da homeostase durante a estiagem (BUCCI et al., 2008) e interceptação eficiente de neblina e orvalho em áreas sujeitas a alta umidade, devido à grande área foliar (BRUIJNZEEL, 2001).

Estudos têm demonstrado que a precipitação efetiva, a transprecipitação e a interceptação são fortemente influenciadas por características da chuva, tais como intensidade, ângulo, frequência e duração (HEWLETT, 1969; JORDAN; HEUVELDOP, 1981), e pela capacidade de armazenamento transitório das copas, que, por sua vez, varia conforme a natureza da cobertura vegetal, a área foliar e a estrutura da casca (HERWITZ, 1985).

Horton (1919), pioneiro em estudos de repartição da água da chuva pela vegetação, definiu a capacidade de armazenamento da copa de uma árvore como o volume total de água que, na ausência de vento, pode ser retido pela copa, dividido pela área da projeção da copa dessa árvore. O autor estima que esse valor varia entre 0,5 a 1,8 mm por chuva, em copas bem desenvolvidas de árvores de região temperada nos EUA. Estudando plantas jovens de cinco espécies e 51 árvores maduras em floresta tropical, Herwitz (1985) determinou capacidade de armazenamento pelas folhas entre 112 a 161 mL por m² de área foliar e capacidade de armazenamento pelo tronco de 0,51 a 0,97 mL por cm³ de volume de casca, totalizando de 2,2 mm a 8,3 mm por árvore. O autor concluiu que a alta variabilidade destes valores sugere a necessidade de dados florísticos e demográficos para cálculo acurado da capacidade de armazenagem da água das chuvas (interceptação) em vegetação tropical com alta riqueza de espécies.

Fisionomias mais ralas têm árvores com menor estatura distribuídas com maior espaçamento entre si, o que significa menos obstáculos à passagem da água e menor capacidade de armazenamento hídrico pela copa ou pelos troncos, o que garante maior quantidade de água chegando ao solo. A transição para fisionomias mais densas implica em aumento da densidade de árvores, do porte dos indivíduos e da biomassa foliar e, como consequência, da capacidade de armazenamento de água nas copas e nos troncos. A rugosidade aerodinâmica também aumenta em função da altura da comunidade vegetal (MONTEITH, 1973) que, por sua vez, estimula a evaporação da água armazenada nas copas mesmo durante os eventos chuvosos, o que disponibiliza espaço para armazenar mais água. Todas essas modificações implicam em aumento da dificuldade à livre passagem de água pelo dossel ou em facilitação da evaporação, tendo como resultado a diminuição da transprecipitação.

1.3.2 Transprecipitação (precipitação interna)

A proporção de transprecipitação no balanço hídrico local varia em função da região e da comunidade vegetal considerada (Tabela 2).

Tabela 2 - Proporção de transprecipitação (Pi) e modelos para estimativa da variável em relação ao volume total de chuva (Pt) em diferentes tipos de cobertura vegetal. FPT: Floresta pluvial tropical; FE: floresta estacional; FES: floresta estacional semidecidual; classificação climática segundo Köppen; AB: área basal; n: número de coletores ou área da captação; r²: coeficiente de determinação da regressão; ^{*1}: Período chuvoso (outubro-março); ^{*2} período menos chuvoso (abril-setembro); ^{*3} todo o período; ^{*4}: Período chuvoso (abril, maio e setembro); ^{*5} período menos chuvoso (junho a agosto); ^{*6} período muito chuvoso (outubro a março); ^{*7}: Período vegetativo ; ^{*8}: período dormente. (Continua)

Cobertura vegetal	Local	clima	AB (m ² ha ⁻¹)	n	Pi (%)	modelo	r ²	fonte
FPT planície sedimentar	Colômbia	Afi		102	87	Pi=1,02+0,926 Pt	0,99	Tobón Marin et al., 2000
FPT planície de inundação	Colômbia	Afi		84	82	Pi=1,48+0,887 Pt	0,99	Tobón Marin et al., 2000
FPT terraço baixo	Colômbia	Afi		97	86	Pi=1,07+0,906 Pt	0,99	Tobón Marin et al., 2000
FPT terra firme	Amazons	Af		20	80	Pi=0,79+0,80 Pt	0,99	Franken et al., 1982
FPT terra firme	Rondônia	Aw		20	90			Germer et al., 2006.
FPT terra firme	Amazonas	Ami		3,5 m ²	87			Jordan; Heuvel, 1981
FPT terra firme	Pará	Am		25	77	Pi=1,299+0,813 Pt	0,96	Oliveira et al., 2008
FPT terra firme	Jaru, Rondonia	Am		30	87	Pi=0,99+0,960 Pt		Ubarana, 1996
FPT terra firme	Vale do Rio Doce, Pará	As		30	86	Pi=1,09+0,870 Pt		Ubarana, 1996
FPT	Indonésia	Af	22-31	18-20	77~89			Vernimmen et al., 2007
FPT montana	Tailândia	Aw		5-20	81			Ziegler et al., 2009
FPT montana - regeneração	Cunha, SP	Cwb		10		Pi=0,2897+0,805 Pt	1,00	Arcova; Cicco, 1987
FPT montana - regeneração	Cunha, SP	Cwb		16	81	Pi=0,529+0,850 Pt ^{*1}	0,99 ^{*1}	Arcova et al., 2003
FPT montana - regeneração	Cunha, SP	Cwb		16	81	Pi=0,067+0,731 Pt ^{*2}	0,91 ^{*2}	Arcova et al., 2003
FPT Montana- regeneração	Cunha, SP	Cwb		10	76	Log _{np} =0,484+1,189 Log P _i	0,89	Cicco, 2009
FPT montana - regeneração	Cunha, SP	Cwb		16	81	Pi=0,021+0,807 Pt	1,00	Cicco et al., 1986/88
FPT montana	Cunha, SP	Cwa		16	83	Pi=0,584+0,839 Pt	1,0	Fujieda et al., 1997
FPT montana regeneração	Cubatão, SP	Cfa		11 ^{*4}	96 ^{*4}			Nalon; Vellardi, 1992
FPT montana regeneração	Cubatão, SP	Cfa		22 ^{*5}	87 ^{*5}			Nalon; Vellardi, 1992

Tabela 2 - Proporção de transprecipitação (Pi) e modelos para estimativa da variável em relação ao volume total de chuva (Pt) em diferentes tipos de cobertura vegetal. FPT: Floresta pluvial tropical; FE: floresta estacional semidecidual; classificação climática segundo Köppen; AB: área basal; n: número de coletores ou área da captação; r^2 : coeficiente de determinação da regressão; *¹: Período chuvoso (outubro-março); *²: período menos chuvoso (abril-setembro); *³: todo o período; *⁴: Período chuvoso (abril, maio e setembro); *⁵: período menos chuvoso (junho a agosto); *⁶: período muito chuvoso (outubro a março); *⁷: Período vegetativo ; *⁸: período dormiente. (Continuação_

Cobertura vegetal	Local	clima	AB (m ² ha ⁻¹)	n	Pi (%)	modelo	r ²	fonte
FPT montana regeneração	Cubatão, SP	Cfa		17* ⁶	95* ⁶	Pi=-0,55+0,94 Pt * ³	0,93* ³	Nalon; Vellardi, 1992
FPT montana regeneração	Cubatão, SP	Cfa						Nalon; Vellardi, 1992
FPT	Recife PE	As'		24	85	Pi _{mm} =4,874+1,00 Pt	0,98	Moura et al., 2009
FES de planalto - regeneração	PEFL, SP	Cwb		10	78	L _{10Tpp} =-0,199+1,045 Log P _t	0,92	Cicco, 2009
FES tropical em regeneração	Viçosa, MG	Cwb	32	75	77	Pi _{mm} =-2,808+0,921Pt	0,98	Oliveira Jr., 2006
FES tropical em regeneração	Viçosa, MG	Cwb	29	25	80	Pi _{mm} =-2,716+0,867 Pt	0,99	Oliveira Jr.; Dias, 2005
Vegetação savânica	México	BSh	16	25-55	83	Pi _{mm} =-0,239+0,849 Pt	1,00	Carlyle-Moses (2004)
cerradão	São Manoel, SP	Cfa		30	80	Pi _{mm} =-0,96+0,85 Pt	0,98	Leopoldo; Conte, 1985
cerradão	Agudos, SP	Aw		16	73	Pi _{mm} =1,74+0,69 Pt	0,96	Lima; Nicolielo, 1983
<i>Prosopis glandulosa</i>	Texas, EUA	Bwk		60	91	Pi _{mm} =-0,11+0,92 Pt	0,98	Thompson, 1986
<i>Acacia mangium</i> 5 anos	Seropédia, RJ	AW			52	Pi _{mm} = 0,300+0,510 Pt	0,97	Balieiro et al., 2007
<i>Acacia mangium</i>	Panama	Af		12	73	Pi _{mm} = -0,104+0,974 Pt	0,99	Park; Cameron, 2008
<i>Gliricidia sepium</i>	Panama	Af		12	87	Pi _{mm} = -0,093+1,022 Pt	0,99	Park; Cameron, 2008
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Panama	Af		12	89	Pi _{mm} = -0,057+1,002 Pt	0,99	Park; Cameron, 2008
<i>Ochroma pyramidale</i>	Panama	Af		12	84	Pi _{mm} = -0,044+0,975 Pt	0,99	Park; Cameron, 2008
<i>Eucalyptus grandis</i> 5 anos	Seropédia, RJ	AW			79	Pi _{mm} =-0,371+0,850 Pt	0,99	Balieiro et al., 2007
<i>P. guachapele</i> e <i>E. grandis</i> 5 anos	Seropédia, RJ	AW			83	Pi _{mm} =-1,019+0,894 Pt	0,99	Balieiro et al., 2007
<i>Tapirira guianensis</i> 17 anos	Assis, SP	Cwa- Cfa	13	10	69	Pi _{mm} = 1,787+0,644 Pt	0,99	Genova et al., 2007
<i>Pinus elliptii</i> 17 anos	Assis, SP	Cwa- Cfa	63	10	73	Pi _{mm} = 0,009+0,732 Pt	0,99	Genova et al., 2007

Tabela 2 - Proporção de transprecipitação (Pi) e modelos para estimativa da variável em relação ao volume total de chuva (Pt) em diferentes tipos de cobertura vegetal. FPT: Floresta pluvial tropical; FE: floresta estacional; FES: floresta estacional semidecidual; classificação climática segundo Köppen; AB: área basal; n: número de coletores ou área da captação; r²: coeficiente de determinação da regressão; ^{*1}: Período chuvoso (outubro-março); ^{*2} período menos chuvoso (abril-setembro); ^{*3} todo o período; ^{*4}: Período chuvoso (abril, maio e setembro); ^{*5} período menos chuvoso (junho a agosto); ^{*6} período muito chuvoso (outubro a março); ^{*7}: Período vegetativo ; ^{*8}: período dormente. (Conclusão).

Cobertura vegetal	Local	clima	AB (m ² ha ⁻¹)	n	Pi (%)	modelo	r ²	fonte
Plantio misto com espécies do Assis, SP Cerrado 17 anos	Assis, SP	Cwa-Cfa	12	10	87	Pi _{mm} =0,199+0,874 Pt	0,99	Genova et al., 2007
<i>Adenantha falcata</i> 17 anos	Assis, SP	Cwa-Cfa	17	10	88	Pi _{mm} = 2,231+0,816 Pt	0,98	Genova et al., 2007
<i>P. caribaea caribaea</i> 6 anos	Piracicaba, SP	Cwa	14	12	90	Pi _{mm} =0,570+0,938 Pt	0,980	Lima, 1976
<i>E. saligna</i> 6 anos	Piracicaba, SP	Cwa	15	12	84	Pi _{mm} =0,530+0,890 Pt	0,98	Lima, 1976
<i>P. oocarpa</i> 13 anos	Agudos, SP	Aw	25	10	88	Pi _{mm} =0,87+0,90 Pt	0,98	Lima; Nicolielo, 1983
<i>P. caribaea hondurensis</i> 13 anos	Agudos, SP	Aw	29	10	88	Pi _{mm} =0,11+0,89 Pt	0,99	Lima; Nicolielo, 1983
<i>Araucaria angustifolia</i> 30 anos	Cunha, SP	Cwb	28	15	89 ^{*1}	Pi _{mm} =0,652+0,922 Pt ^{*1}	0,99 ^{*1}	Sousa et al. 2011
<i>Araucaria angustifolia</i> 30 anos	Cunha, SP	Cwb	28	15	81 ^{*2}	Pi _{mm} =0,644+0,864 Pt ^{*2}	0,98 ^{*2}	Sousa et al. 2011
Floresta de folhosas	Alemanha	Cfb	32-46	61-70	58~78 ^{*7}			Krämer; Hölscher, 2009
Floresta de folhosas	Alemanha	Cfb	32-46	61-70	66~75 ^{*8}			Krämer; Hölscher, 2009
Floresta de folhosas	Grã Bretanha	Cfb	44	30	70 ^{*7}	Pi _{mm} =0,17Pt ^{*7}	0,62 ^{*7}	Herbst et al., 2008
Floresta de folhosas	Grã Bretanha	Cfb	44	30	77 ^{*8}	Pi _{mm} =0,45Pt ^{*8}	0,81 ^{*8}	Herbst et al., 2008
Floresta de folhosas	Leste dos EUA					Pi _{mm} =0,031+0,901 Pt ^{*7}		Helvey; Patric, 1965
Floresta de folhosas	Leste dos EUA					Pi _{mm} =0,015+0,914 Pt ^{*8}		Helvey; Patric, 1965
<i>Pinus halepensis</i>	Espanha	Csa	8-36	48	84~56	Pi _% =90,35—0,99AB	0,79	Molina; campo, 2012
<i>Pinus sylvestris</i> e <i>P. nigra</i> 44 anos	Grã Bretanha			24	67			Gash; Stewart, 1977
Floresta de folhosas	Ontario, Canadá	Dfb	32-42	10	69~86			Buttle; Farnsworth, 2012

Em estudo de interceptação por árvores isoladas, realizado em Albany, Estados Unidos, após eventos individuais, Horton (1919) registrou desde 0% de transprecipitação (100 de interceptação) em chuvas inferiores a 1,27 mm, com aumento progressivo da captação até a proporção atingir um valor constante, em torno 75 a 80% de transprecipitação (20 a 25 % de interceptação) em chuvas de grande montante. Levia Jr. e Frost (2003), após revisão sobre a variação do volume da transprecipitação e a entrada de solutos em ambiente florestal, concluíram que a variação da proporção da transprecipitação entre pontos dentro de um tipo de vegetação pode ser maior do que entre diferentes coberturas vegetais.

Pesquisadores se esforçam para estabelecer generalizações nas relações entre as características das árvores e o volume de transprecipitação, mas as diferenças entre espécies, idade e densidade de plantio e circunstâncias climáticas e fisiográficas têm dificultado essa tarefa.

Estudos relacionando a repartição de chuva com as características da vegetação foram conduzidos por Krämer e Hölscher (2009) em florestas maduras mistas de *Fagus silvatica* com outras 11 espécies, em diferentes proporções, na Alemanha Central. Os autores concluíram que não é a espécie que define a proporção da repartição da água da chuva, mas sim as características das árvores que compõem a comunidade.

Em Assis, SP, ao final de um ano hídrico, a transprecipitação foi menor sob plantio de árvores perenifólias (GENOVA; HONDA; DURIGAN, 2007b), comparadas com árvores caducifólias ou semicaducifólias. Em região de vegetação savânica do Texas, Thompson (1986) mediu a transprecipitação sob árvores de *Prosopis grandulosa*, cada qual com cinco coletores sob a copa, e não detectou diferença de transprecipitação sob 10 das 12 árvores medidas, sendo que as maiores proporções de transprecipitação foram registradas sob as árvores maiores, que têm a porção terminal da ramificação voltada para o solo e folhagens menos compactas. Dietz et al. (2006) determinaram, por meio de regressão linear múltipla, que a altura das árvores e o índice de área foliar explicaram 81% da variação da transprecipitação em floresta pluvial tropical na Indonésia, submetida a diferentes formas de manejo.

Assume-se que a quantidade de folhas em uma árvore é decisiva para avaliar a quantidade de água que a sua copa pode reter, desde que Horton (1919) quantificou o número de gotas de água retidas na superfície das folhas de várias espécies de clima temperado e calculou a capacidade de armazenamento de água pela copa por meio de estimativa da quantidade de folhas em uma árvore. De fato, Aston (1979), após estudar árvores jovens de oito espécies florestais da Austrália sob chuva simulada e condições controladas, constatou

que a quantidade de água que pode ser armazenada pela copa é diretamente proporcional à densidade da folhagem.

Os modelos correntes de predição da interceptação utilizam dois conjuntos de parâmetros, sendo o primeiro conjunto relativo a variáveis micrometeorológicas e o segundo conjunto relativo a variáveis relacionadas à estrutura da comunidade vegetal, para parametrizar principalmente o armazenamento de água pelas copas e a fração da chuva que atinge o solo sem interagir com a copa (LLORENS; GALLART, 2000). Rutter, Morton e Robins (1975) relacionaram o armazenamento pelas copas com o índice de área foliar (IAF) e desde então os estudos de repartição de água da chuva pelas copas têm inclusa a quantificação ou a estimativa do IAF (GARCIA-ESTRINGANA; ALONSO-BLÁZQUEZ; ALEGRE, 2010; KOMATSU, 2007; KRÄMER; HÖLSCHER, 2009; LINK, UNSWORTH; MARKS, 2004). Entretanto, após revisão da bibliografia sobre a influência de variáveis bióticas e abióticas sobre o volume de transprecipitação, Levia Jr. e Frost (2003) concluíram que, embora a relação entre IAF e volume de transprecipitação seja conceitualmente óbvia, há dificuldade prática em relacionar a captação da água de coletores individuais e a IAF imediatamente acima destes coletores. Park e Cameron (2008), em estudo da relação entre características da copa de 5 espécies no Panamá e repartição da água da chuva pelas suas copas, determinaram que o IAF, a largura da copa e a abertura da copa influenciaram transprecipitação em chuvas com volume pequeno, mas a profundidade da copa (diferença entre a altura da árvore e a altura do ramo vivo em posição inferior) foi o único preditor a influenciar a transprecipitação em chuvas com volume superior a 20 mm. Park e Cameron (2008) forneceram quatro motivos que diminuem o poder do IAF como variável preditiva da transprecipitação. Primeiro: o armazenamento da água em curto prazo pode ser incrementado devido à redução da evaporação no interior de copas longas. Segundo: dado um mesmo IAF, as folhas distribuídas ao longo de copas longas têm maior área superficial disponível em relação a copas curtas, onde pode haver diminuição da área disponível para interceptação devido à sobreposição das folhas que estão em contato. Terceiro: muitos ramos emergindo do tronco principal de copas longas aumentam a capacidade de armazenamento da copa. Quarto, válido somente para árvores altas: a altura aumenta a rugosidade aerodinâmica, que aumenta a evaporação e, portanto, diminui a transprecipitação. Samba, Camiré e Margoliz (2001), em estudo sobre repartição hídrica sob árvores com diferentes intensidades de desrama em região semi-árida do Senegal, não detectaram diferenças significativas no intervalo entre 3,1 e 5,5 m² m⁻² de IAF em árvores de *Cordyla pinnata*. Há que se considerar que o IAF é uma variável de difícil quantificação e, quando quantificada, a exatidão pode ser comprometida quando do seu

escalonamento para a copa como um todo (LLORENS; GALLART, 2000). De fato, em revisão bibliográfica englobando 90 artigos publicados em mais de três décadas (1970-2005) de pesquisas hidrológicas na região mediterrânea, Llorens e Domingo (2007) encontraram referência à densidade da comunidade vegetal estudada em 76% dos estudos. Entre os estudos, 66% utilizaram diâmetro medido à altura do peito (DAP), 57% referiram-se à área basal e apenas 28% se referiram ao IAF.

A área basal (AB) é a variável que, segundo Pinheiro e Durigan (2012), melhor representa a estrutura e a biomassa da vegetação no gradiente fisionômico do Cerrado. Esta variável tem sido largamente utilizada para caracterizar diferentes comunidades vegetais em região do Cerrado (WALTER et al., no prelo). Dada as estreitas relações entre área basal, biomassa dos troncos e a biomassa ou superfície foliar (BARTELINK, 1997; SAMBA; CAMIRÉ; MARGOLIS, 2001; WARING; RUNNING, 2007), a variável área basal, de obtenção mais fácil e mais precisa do que qualquer uma das outras, é recomendável como variável preditora de processos relacionados com a repartição da água da chuva pela vegetação.

Considerando, porém, que a interceptação pelas copas depende de características da folhagem, a área basal é uma boa variável preditora dentro de um determinado tipo de vegetação, mas o seu uso para conjuntos de dados oriundos de diferentes tipos de vegetação pode reduzir seu poder preditivo. Em outras palavras, não se deve usar um modelo baseado em área basal de um tipo de vegetação para estimar a interceptação em outros tipos de vegetação.

1.3.3 Escoamento pelo tronco

Apesar do grande volume de água que uma árvore individual pode canalizar para a sua base escoando pelo tronco, este volume é relativamente pequeno se analisado em proporção relativa à quantidade de chuva que cai sobre a copa, ficando entre um a cinco por cento da precipitação total. De forma geral, a proporção do escoamento pelo tronco no balanço hídrico é menor em florestas tropicais se comparadas às florestas temperadas (Tabela 3). Kuraji e Tanaka (2003) atribuem menores valores de escoamento pelo tronco em árvores de região tropical a 1) maior capacidade de armazenamento de água pelos troncos de espécies tropicais, devido à maior espessura e rugosidade da casca e mais epífitas presentes nos galhos e troncos, que aumentam a superfície de retenção da água; 2) menor velocidade dos ventos em regiões tropicais em relação às regiões temperadas, o que diminui a probabilidade das gotas de chuva

chegarem ao tronco e escorrerem até o solo; 3) maior intensidade das chuvas nos trópicos, que frequentemente são superiores à capacidade de escoamento dos canais de drenagem formados nos troncos.

Apesar de proporcionalmente pequeno dentro do balanço hídrico, o escoamento pelo tronco é um processo importante, por ser concentrado em pequenas áreas, o que, potencializado pelo direcionamento proporcionado pelas raízes, o torna eficiente na reposição da água do solo (LI, 2009; WANG et al., 2011). Leonard (1961) registrou volume sete vezes maior de água em torno do tronco em relação à chuva medida em uma área aberta em New Hampshire, norte dos EUA, em 37 árvores de diferentes espécies de folhosas. Herwitz (1986), ao estudar a concentração de água em torno do tronco propôs o “fator de afunilamento”, que é o resultado da divisão do volume de escoamento pelo tronco pela área basal da árvore, multiplicada pela altura da chuva. O fator de afunilamento avalia o direcionamento da água da chuva pelo tronco concentrando-o em uma área equivalente à sua área basal. Wang et al. (2011) obtiveram fator de afunilamento médio de 89,8 em arbustos (*Caragana korshinskii*) no clima árido de estepe, da China, e verificaram que, sob os arbustos, há um grande gradiente de umidade entre as camadas de solo superficiais e as mais profundas.

O escoamento pelo tronco é um processo sujeito a grande variação entre árvores (HORTON, 1919) e é função das características da chuva e de atributos morfológicos e dimensionais das árvores (HELVEY; PATRIC, 1965; HORTON, 1919; KURAJI; TANAKA, 2003; STEINBUCK, 2002; THOMPSON, 1986). Entretanto, a relação entre as características das árvores e a quantidade de escoamento pelo tronco é ainda mais controversa do que a relação entre a transprecipitação e as características das árvores ou com condições climáticas e fisiográficas. Rugosidade da casca, dimensões das árvores, presença de epífitas, densidade da folhagem, ângulo de ramificação e quantidade de ramos estão entre as características mais estudadas.

Rutter (1963) obteve relação linear entre captação do escoamento pelo tronco e o DAP² em plantio de *Pinus sylvestris*, na Grã Bretanha. Entretanto, a variação dos atributos relativos ao porte das árvores explicaram no máximo 17% da variação observada para o escoamento pelo tronco em 47 árvores nativas do cerrado no município de Assis, SP (APARECIDO et al., 2011).

Modelos lineares que correlacionam escoamento pelo tronco com o volume total de chuva têm coeficiente angular maior durante o período de dormência nos climas temperados, o que indica maior produção de escoamento pelo tronco por unidade volumétrica de chuva no período em que as árvores estão sem folhas (HELVEY; PATRIC, 1965).

Tabela 3 - Proporção do escoamento pelo tronco e modelos para estimativa desta variável em relação ao volume total de chuva em diferentes tipos de vegetação. FPT: floresta pluvial tropical; FES: floresta estacional semidecidual; classificação climática segundo Köppen; AB: área basal; ♦AB em $\text{cm}^2 \text{arvore}^{-1}$; n: número de troncos medidos; Etp(%): Escoamento pelo tronco na comunidade vegetal; Eti(%): escoamento pelo tronco individual; r^2 : coeficiente de determinação da regressão; r^2 : Período chuvoso (outubro-março); r^2 : período menos chuvoso (abril-setembro); r^3 Período vegetativo; r^4 período dormente. (Continua)

Cobertura vegetal	local	clima	AB ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	n	Etp (%)	Eti (%)	modelo	r^2	fonte
FPT de terra firme	Caxiuanã, Pará	Am		7	1,7		$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,139+0,022 \text{ Pt}$	0,56	Oliveira et al., 2008
FPT terra firme	Jaru, Rondônia	Am			1,4		$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,09+0,010 \text{ Pt}$		Ubarana, 1996
FPT terra firme	Vale do R. Doce, Pará	As			0,8		$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,10+0,023 \text{ Pt}$		Ubarana, 1996
FPT aberta	Rondônia	Aw		32	8,0				Germer et al., 2006
FPT	Indonésia	Af	22-31	41	0,8~2,0				Vernimmen et al., 2007
FPT	Indonésia	Af	7-69	120	0,3-1,0				Dietz et al., 2006
FPT	Colômbia	Afi		135	1,0~1,2				TobónMarín et al., 2000
FPT	Recife, PE	As'		20		2,4	$\text{Et}_{\text{nm}}=-8,27+201,2 \text{ Pt}$	0,94	Moura et al., 2009
FPT secundária	Cubatão, SP	Cfa			0,4		$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,020+0,061 \text{ Pt}$	0,68	Nalon; Vellardi, 1992
FPT montana - regeneração	Cunha, SP	Cwb		12			$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,040+0,012 \text{ Pt}$	0,87	Arcova; Cicco, 1987
FPT montana - regeneração	Cunha, SP	Cwb		38	0,2		$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,019+0,003 \text{ Pt}^{*1}$	0,94*	Arcova et al., 2003
FPT montana - regeneração	Cunha, SP	Cwb		38	0,2		$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,015+0,002 \text{ Pt}^{*2}$	0,80* ²	Arcova et al., 2003
FPT montana	Cunha, SP	Cwb		9	1,0		$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,044+0,012 \text{ Pt}$	0,87	Fujieda et al., 1997
FES tropical	Viçosa, MG	Cwb			1,7		$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,522+0,022 \text{ Pt}$	0,96	Oliveira Jr.; Dias, 2005
árvores e arbustos	Noroeste mexicano	BSh		4	8,5		$\text{Et}_l=[21,13(\text{Pt} \times \text{AB})]n$	0,30	Carlyle-Moses, 2004
cerradão	São Manoel, SP				2,9	-		baixo	Leopoldo; Conte 1985
<i>Laurus azorica</i>	Ilhas Canárias	Csa	225 ♦	5	2,3	4,0	$\text{Et}\%=-0,204+0,910 \ln (\text{P})$	0,67	Aboal et al., 1999b
<i>Persea indica</i>	Ilhas Canárias	Csa	334 ♦	5	1,3	4,9	$\text{Et}\%=-0,068+1,063 \ln (\text{P})$	0,58	Aboal et al., 1999b
<i>Erica arborea</i>	Ilhas Canárias	Csa	150 ♦	5	1,4	6,5	$\text{Et}\%=-0,172+1,531 \ln (\text{P})$	0,67	Aboal et al., 1999b
<i>Myrica faya</i>	Ilhas Canárias	Csa	905 ♦	5	1,6	2,7	$\text{Et}\%=-0,004+0,546 \ln (\text{P})$	0,51	Aboal et al., 1999b
<i>Ilex canariensis</i>	Ilhas Canárias	Csa	117 ♦	5	0,2	6,2	$\text{Et}\%=-0,205+1,378 \ln (\text{P})$	0,59	Aboal et al., 1999b

Tabela 3 - Proporção do escoamento pelo tronco e modelos para estimativa desta variável em relação ao volume total de chuva em diferentes tipos de vegetação. FPT: floresta pluvial tropical; FES: floresta estacional semidecidual; classificação climática segundo Köppen; AB: área basal; ❖AB em cm² arvore⁻¹; n: número de troncos medidos; Etp(%): Escoamento pelo tronco na comunidade vegetal; Eti(%): escoamento pelo tronco individual; r²: coeficiente de determinação da regressão; *¹: Período chuvoso (outubro-março); *² período menos chuvoso (abril-setembro); *³ Período vegetativo ; *⁴ período dormiente. (Continuação)

Cobertura vegetal	local	clima	AB		Etp (%)	Eti (%)	modelo	r ²	fonte
			(m ² ha ⁻¹)	n					
<i>Ilex perado</i>	Ilhas Canárias	Csa	117 ❖	5	0,1	3,3	Et%=0,005+0,695 ln (P)	0,53	Aboal et al., 1999b
Floresta de louro	Ilhas Canárias	Csa	33,7	5	6,8	4,6	Et%=0,269+1,981 ln (P)	0,70	Aboal et al., 1999b
<i>Acacia mangium</i>	Panamá	Af		3		2,7	Et _{mm} =-0,055+0,165 Pt	0,58	Park; Cameron, 2008
<i>Gliricidia sepium</i>	Panamá	Af		3		1,5	Et _{mm} =-0,048+0,115 Pt	0,52	Park; Cameron, 2008
<i>Guazuma ulmifolia</i>	Panamá	Af		3		2,3	Et _{mm} =-0,072+0,172 Pt	0,73	Park; Cameron, 2008
<i>Ochroma pyramidale</i>	Panamá	Af		3		0,9	Et _{mm} =-0,027+0,070 Pt	0,39	Park; Cameron, 2008
<i>Pachira quinata</i>	Panamá	Af		3		1,3	Et _{mm} =-0,051+0,115 Pt	0,62	Park; Cameron, 2008
<i>Acacia mangium</i>	Seropédica, RJ	Aw		9	33		Et _{mm} =-1,719+1,097 Pt	0,94	Baleiro et al., 2007
<i>Pseudosamanea guachapele</i>	Seropédica, RJ	Aw		9	9,4		Et _{mm} =-0,081+0,143 Pt	0,56	Baleiro et al., 2007
<i>Eucalyptus grandis</i>	Seropédica, RJ	Aw		9	5,9		Et _{mm} =-0,897+0,236 Pt	0,93	Baleiro et al., 2007
<i>Pinus sylvestris</i> e <i>P. nigra</i>	Grã Bretanha			5	1,6				Gash; Stewart, 1977
<i>P. caribaea caribaea</i>	Piracicaba, SP	Cwa		10	3,0		Et _{mm} =0,139+0,025 Pt	0,37	Lima, 1976
<i>E. saligna</i>	Piracicaba, SP	Cwa		10	4,2		Et _{mm} =-0,060+0,053 Pt	0,79	Lima, 1976
<i>Araucária angustifolia</i>	Cunha, SP	Cwb			0,1* ³		Et _{mm} =-0,019+0,025* ¹	0,84* ¹	Sousa et al. 2011
<i>Araucária angustifolia</i>	Cunha, SP	Cwb			0,1* ³		Et _{mm} =-0,006+0,013* ²	0,47* ²	Sousa et al. 2011
<i>Stewartia monadelphpha</i>	Kyoto, Japão	Cfa	373-665 ❖	5	12	3,3-26,0			Liang et al., 2009
Folhosas	Leste dos EUA						Et _{mm} =-0,005+0,041 Pt* ⁸		Helvey; Patric, 1965
Folhosas	Leste dos EUA						Et _{mm} =-0,005+0,062Pt* ⁹		Helvey; Patric, 1965
Floresta folhosa secundária de 100 anos <i>N. densiflorus</i>	Califórnia	Csb		12					Steinbuck, 2002
<i>Pinus pseudostrobus</i> temperada seca	Floresta México	Cfb		6		0,3			Návar, 2011

Tabela 3 - Proporção do escoamento pelo tronco e modelos para estimativa desta variável em relação ao volume total de chuva em diferentes tipos de vegetação. FPT: floresta pluvial tropical; FES: floresta estacional semidecidual; classificação climática segundo Köppen; AB: área basal; ♦AB em $\text{cm}^2 \text{arvore}^{-1}$; n: número de troncos medidos; Etp(%): Escoamento pelo tronco na comunidade vegetal; Eti(%): escoamento pelo tronco individual; r^2 : coeficiente de determinação da regressão; r^2 : período chuvoso (outubro-março); r^2 : período menos chuvoso (abril-setembro); r^2 : período vegetativo; r^2 : período dormente. (Conclusão)

Cobertura vegetal	local	clima	AB ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)	n	Etp (%)	Eti (%)	modelo	r^2	fonte
<i>Quercus</i> spp	México	Cfb		12		0,8			Návar, 2011
<i>Prosopis glandulosa</i>	Texas	Bwk		11		4,1	$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,06+0,05 \text{ Pt}$	0,98	Thompson, 1986
<i>H. scoparium</i>	China	BSk		7		2,3-7,0	$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,046+0,034 \text{ Pt}$	0,94	Li et al., 2009
<i>S. psammophila</i>	China	BSk		7		0,2-14,2	$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,139+0,063 \text{ Pt}$	0,94	Li et al., 2009
<i>Caragana korshinskii</i>	China	BSk		8		7,9±1,3	$\text{Et}_{\text{nm}}=-0,335+0,151 \text{ Pt}$	0,91	Wang et al., 2011
Arbustos mediterrâneos	Espanha			3-12		3,8-26,4			Garcia-Estringna et al., 2010
<i>Diospyros texana</i>	Tamaulipan, Mexico	BSh		33		2,7			Návar, 2011
<i>Acacia rigidula</i>	Tamaulipan, Mexico	BSh		14		3,3			Návar, 2011
<i>Condalia hookeri</i>	Tamaulipan, Mexico	BWh		5		1,0			Návar, 2011
<i>Bernardia celastrina</i>	Tamaulipan, Mexico	BWh		4		1,1			Návar, 2011
<i>Codia bioissieri</i>	Tamaulipan, Mexico	BWh		3		2,1			Návar, 2011
<i>Pithecellobium pallens</i>	Tamaulipan, Mexico	BWh		3		3,4			Návar, 2011

A relação entre o volume de chuva que escoar pelo tronco é mais estreita com o volume de água da chuva do que com as características das árvores. Mesmo assim, os baixos valores dos coeficientes de determinação obtidos por Lima (1976) em regressões lineares relacionando o escoamento pelo tronco e o volume de chuva em árvores de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*, aos 6 anos de idade, levaram o autor a considerar a importância de outros fatores influenciando o processo de escoamento da água da chuva pelo tronco, além da precipitação.

A relação entre rugosidade da casca e capacidade de armazenamento do tronco foi confirmada por Herwitz (1985) em cinco espécies arbóreas australianas. O autor concluiu que esse processo deve ser importante entre as espécies tropicais, que tendem a ter casca mais rugosa. De fato, a influência do tipo de casca no escoamento pelo tronco tem sido comprovada por vários autores (HELVEY; PATRIC, 1965; STEINBUCK, 2002).

Após avaliar o escoamento pelo tronco em Floresta Estacional Semidecidual, em Viçosa, MG, Oliveira Jr. (2006) concluiu que a influência de uma característica, quando analisada individualmente, não explica o processo, sendo necessário avaliar o conjunto de várias características da árvore. Steinbuck (2002) gerou, para floresta secundária no norte da Califórnia, modelo linear para estimativa do escoamento pelo tronco baseado em três variáveis: área de projeção de copa, proporção de ramos com inclinação positiva (crescimento acima da linha do horizonte a partir do ponto de inserção do caule) e área da superfície do tronco. O modelo explicou 88% da variação na variável-resposta. Thompson (1986) desenvolveu equação de regressão múltipla para explicar o escoamento pelo tronco em árvores de *Prosopis glandulosa* em vegetação savânica do Texas. Utilizou como variáveis preditoras o volume de chuva, a circunferência do tronco e o ângulo de inserção dos ramos, que explicaram, juntas, 68% da variação na variável-resposta. O volume de água escoado pelo tronco foi maior em talhões jovens em relação aos talhões maduros, em estudo realizado por Helvey e Patric (1965). Para os autores, a casca lisa, a ramificação mais fechada e a maior densidade de árvores em talhões jovens explicam esse resultado.

O escoamento pelo tronco resulta em grande quantidade de água concentrada em uma área de infiltração pequena, normalmente de alguns centímetros de distância a partir da base do tronco, o que pode resultar em melhores condições de solo para o crescimento da árvore (ABOAL et al., 1999b; NAVAR; BRIAN, 1990; NAVAR, 2011).

1.4. Processos hidrológicos em savanas

A densidade da vegetação desempenha importante função na regulação da repartição da água entre os componentes do sistema, atuando nas perdas por evapotranspiração. Por exemplo, no ecótono entre a savana temperada dominada por *Quercus* e campina semi desértica dominada por gramíneas perenes C₄ do sudoeste do Arizona, Weltzin e Mcpherson (2000) documentaram que a perda por evapotranspiração da água da chuva é menor na presença de cobertura vegetal esparsa, em relação à perda que ocorre na presença de cobertura vegetal densa. Essa diferença, para os autores, pode acarretar consequências na distribuição da umidade do solo, nas espécies presentes e na dinâmica da regeneração dessas espécies. Em estudo envolvendo balanço de energia em fisionomias contrastantes do Cerrado próximo a Brasília, Giambelluca et al. (2009), constataram diferenças significativas nas taxas de evapotranspiração entre o cerrado denso e o campo cerrado, sendo o índice de área foliar utilizado como parâmetro da vegetação para explicar as diferenças. Gradiente de transpiração ao longo do gradiente fisionômico do Cerrado foi constatado por Bucci et al. (2008), próximo a Brasília, DF, ao analisarem vegetação desde campo sujo até cerradão.

Nos últimos 20 anos têm se intensificado estudos que enfocam a economia da água das plantas do Cerrado, notadamente sobre o uso e redistribuição da água do solo pelas plantas (JACKSON et al., 1999; OLIVEIRA et al., 2005a, b; ROSSATO et al., 2012; SCHOLZ et al., 2002). A partir desses estudos, muitos paradigmas existentes sobre o uso de água pelas plantas do Cerrado têm sido testados. Muitos paradigmas foram comprovados, outros refutados e ainda há os que continuam em aberto. Em aberto está, por exemplo, a influência da biomassa no gradiente fisionômico sobre a água das chuvas que chega ao solo do Cerrado. Ainda se desconhece se ao gradiente de biomassa está associado um gradiente de redistribuição de água e quais as influências que esse gradiente pode causar nos padrões de perda de água para a atmosfera, recarga de água subterrânea e crescimento da vegetação.

Sendo o Cerrado um mosaico de fisionomias com biomassa variável, é possível prever que haja diferenças nas proporções dos processos hidrológicos ao longo do gradiente fisionômico. De fato, Giambelluca et al. (2009), estudando a evapotranspiração e o balanço de energia no Cerrado do Brasil Central, com variação de densidade arbórea, estimaram perdas evaporativas de 57,2% e 47,8% da precipitação total, respectivamente, em fisionomia de cerrado denso e campo cerrado. Essas proporções são baixas, comparadas às florestas tropicais (BOSCH; HEWLETT, 1982; BROWN et al., 2005, BRUIJNZEEL, 1990), podendo

explicar a alta produtividade hídrica que é atribuída ao Cerrado, e que vem sendo alvo de atenção para enfrentar a demanda crescente pelos recursos hídricos.

A expansão agropecuária sobre o Cerrado foi intensificada nos últimos 40 anos e grandes extensões dessa vegetação cederam espaço para monoculturas agrícolas. Informações visando otimização das atividades agrícolas em regiões antes ocupadas pelo Cerrado foram geradas, mas as implicações das mudanças causadas pelo homem ainda não são suficientemente conhecidas. No campo da hidrologia, Assad (1994) estudou o regime pluviométrico e a distribuição sazonal de chuvas em todo o domínio do Cerrado, de forma a subsidiar as atividades relacionadas ao agronegócio; Lima e Silva (2008) avaliaram a situação dos recursos hídricos como fonte de água para irrigação e desenvolvimento socioambiental e quantificaram a contribuição hídrica superficial do Cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras, divulgando a sua importância dentro deste contexto (LIMA; SILVA, 1998; LIMA et al., 2002; LIMA; SILVA, 2007). Entretanto, ainda são poucas as informações sobre os processos hidrológicos que envolvem a vegetação do Cerrado (LIMA, 1983a, 1983b; LEOPOLDO; CONTE, 1985; LIMA et al., 2002; GIAMBELLUCA et al., 2009; ASSIS et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2005; ROSSATO et al., 2012) e as mudanças que podem ser acarretadas pelas alterações na paisagem dentro deste bioma.

1.5. Métodos de quantificação dos processos hidrológicos

A quantificação da chuva se faz por meio do uso de pluviômetros, que podem ser automatizados ou simplesmente recipientes com área de captação conhecida, que armazenam a água da chuva até a sua quantificação. A comparação da chuva captada em pluviômetros a céu aberto e sob a vegetação permite quantificar a interceptação e a transprecipitação.

1.5.1. Quantificação da precipitação a céu aberto

As dificuldades em estudos para avaliar a influência da vegetação na repartição da chuva têm início na escolha do local para instalação dos pluviômetros e o seu número para quantificar a precipitação com precisão aceitável, tanto sob o dossel quanto a céu aberto. Ao

utilizar somente um pluviômetro a céu aberto, localizado a 1.200 m de distância da área de estudo, Moura et al. (2009) relataram a ocorrência de volume de precipitação interna superior à precipitação registrada a céu aberto. Para evitar conclusões equivocadas, Kuraji e Tanaka (2003) recomendam distribuir, dentro da área de estudos, pontos de medição sobre torres e também em clareiras, pois a distribuição espacial das chuvas em regiões tropicais pode ser muito variada mesmo entre pontos muito próximos. Lima (2008, p.94) esclarece que “a utilização de dois a quatro pluviômetros bem distribuídos nas proximidades das parcelas tem sido satisfatória para a maioria dos experimentos de medição de interceptação”.

1.5.2. Quantificação da transprecipitação

A transprecipitação é um componente do ciclo hidrológico cuja determinação é frequente, apesar das dificuldades inerentes à sua grande variabilidade espacial dentro da comunidade vegetal. Nanko et al. (2011) verificaram a grande variação no volume de transprecipitação sob uma única árvore de *Cryptomeria japonica*, apontando a existência de pontos de gotejamento preferencial concentrados próximos à borda da copa. Nakakita et al. (1984) demonstraram padrão complexo sob o dossel de plantios puros com diferentes espécies florestais, em parcelas de 9 m², com 96 pluviômetros instalados a 30 cm de distância, tendo uma árvore como o ponto central. Em plantio homogêneo de *Picea sitcensis*, na Escócia, Ford e Deans (1978) registraram menor captação de água em coletores localizados sob a linha de sobreposição das copas em relação aos coletores instalados na linha de plantio. Em plantio homogêneo de *Picea abies* na Grã Bretanha, Whelan e Anderson (1996) evidenciaram a natureza sistemática do padrão espacial de transprecipitação sob os talhões dessa espécie. Lloyd e Marques Filho (1988), após estudo sobre erros associados à repartição da água da chuva sob o dossel de floresta pluvial tropical amazônica, concluíram que se trata de um ecossistema cuja quantificação dos parâmetros do balanço hídrico é dificultada pela heterogeneidade ambiental. Os autores recomendaram, para florestas naturais, a distribuição dos pontos de coleta em transecto e consideraram que o uso de parcelas com área definida é mais indicado para florestas homogêneas. Para cálculo da melhor medida da transprecipitação que atinge o solo, esses autores sugeriram o uso da média aritmética do somatório de todas as medições no período de estudo como o valor mais próximo da chuva que atinge o piso florestal por este processo.

Assim, para quantificar devidamente a transprecipitação e minimizar os efeitos da distribuição espacial, Bruijnzeel (1990, p. 16) aconselhou o uso de “elaborado delineamento para amostragem” para cobrir a grande variabilidade espacial sob o dossel, mas observou que raramente esta recomendação é seguida. Howerda, Scatena e Bruijnzeel, (2006) dividiram o delineamento amostral dos estudos de transprecipitação em função dos objetivos: os que utilizaram coletores móveis e os que utilizaram coletores fixos. A técnica do ponto de amostragem móvel e coletas frequentes durante o período de estudo foi recomendada para quantificar a transprecipitação, enquanto grande número de coletores fixos é preferível em estudos de curta duração que objetivam avaliar a variabilidade da transprecipitação em função das características meteorológicas ou da copa.

Ao longo dos anos, o método do coletor móvel foi defendido por inúmeros autores como sendo o mais eficiente em amostrar a transprecipitação sob o dossel florestal (BRUIJNZEEL, 1990; HELVEY; PATRIC, 1965; LLOYD; MARQUES FILHO, 1988; WILM, 1943; ZARNOCH; ABRAHAMSON; DOUGHERTY, 2002; ZIEGLER, 2009). Wilm (1943) provou, estatisticamente, em plantio antigo de *Pinus contorta*, no Colorado, que a precisão alcançada com o uso de um número pequeno de coletores móveis equivale àquela obtida com grande número de coletores fixos. De fato, após revisão da literatura existente sobre interceptação em florestas de latifoliadas do leste dos Estados Unidos, Helvey e Patric (1965) concluíram que os resultados de muitos dos estudos iniciais de transprecipitação eram inadequados, comprometidos pelo método utilizado e também recomendaram o uso de coletores móveis para diminuir erros associados à espacialidade da transprecipitação. Finalmente, Lloyd e Marques-Filho (1988) comprovaram que o método é o mais adequado para florestas com grande variabilidade espacial, como a floresta pluvial tropical.

Sobre o tipo de coletor de chuva, duas são as soluções propostas para cobrir a grande variabilidade espacial sob o dossel florestal (KURAJI; TANAKA, 2003): aumentar a área de captação do equipamento coletor ou usar grande número de coletores com pequena área de captação. Os resultados (ZIEGLER et al., 2009) apontam vantagens e desvantagens para cada método, mas Helvey e Patric (1965) afirmam que o número de coletores é mais importante do que o tipo utilizado. As dificuldades inerentes ao uso de equipamentos de grandes dimensões têm feito os pesquisadores optarem pelo uso de pequenos coletores, com 5 a 20 cm de diâmetro, conectados a um reservatório.

A intensidade amostral também é assunto de discussão. Wilm (1943) demonstrou o método de cálculo do número ideal de coletores, para um nível de exatidão de 5%, e a quantidade de observações necessárias para cada ponto de observação em florestas de

coníferas. Helvey e Patric (1965) estabeleceram que, para quantificar a transprecipitação em florestas maduras mistas de latifoliadas e coníferas no leste dos Estados Unidos e obter resultados com menos de 5% de erro, são necessários 13 a 46 pluviômetros móveis padrão durante o período de crescimento e seis a 24 pluviômetros móveis padrão no período dormente, sendo a quantidade de pluviômetros variável em função do volume de chuva no aberto. Zarnoch, Abrahamson e Dougherty (2002), em estudo sobre a transprecipitação em floresta plantada de *Pinus taeda*, sugeriram o uso de quatro pluviômetros de calha, com dimensões de 1,5 x 0,1 m, por parcela de 0,9 ha, para obter exatidão de 5%, ao nível de 80% de probabilidade. Kuraji e Tanaka (2003), em revisão dos estudos de interceptação em florestas tropicais, recomendaram que o somatório da área de captação da transprecipitação seja, no mínimo, equivalente ou superior a 2.500 cm². Lima (2008) recomendou o uso de 10 a 12 pluviômetros para medir a transprecipitação com a mesma precisão de um pluviômetro no aberto. Em artigo de revisão, Llorens e Domingo (2007) consideraram confiáveis, para a vegetação do Mediterrâneo, os estudos de transprecipitação que utilizaram superfície de coleta cujo somatório fosse superior a 0,2 m², o que corresponde a 20 coletores com 10 cm de diâmetro.

Helvey e Patric (1965) afirmaram que informações sobre proporção da transprecipitação em relação à chuva devem ser acompanhadas pela distribuição da frequência dos volumes de chuva, pois as características dos eventos chuvosos podem levar a erros que subestimam (chuvas fracas e frequentes) ou superestimam (chuvas intensas) as perdas. Para esses autores, as regressões lineares em função da classe de chuva são as melhores formas de descrever a relação entre a chuva no aberto e a transprecipitação em eventos de volumes variados. As equações calculadas para as florestas maduras mistas de latifoliadas e coníferas no leste dos Estados Unidos são, segundo os autores, “surpreendentemente uniformes”, apesar da variabilidade das características da vegetação.

1.5.3. Quantificação do escoamento pelo tronco

Coletar a água da chuva que escorre pelo tronco vem sendo um desafio em todo o mundo. É conhecido que o volume de escoamento pelo tronco, embora de grandeza significativa considerando-se a árvore individualmente, torna-se pequeno em proporção, diante dos outros componentes do balanço hídrico (HORTON, 1919). Helvey e Patric (1965) atribuem à dificuldade na coleta e aos pequenos valores relativos obtidos as explicações para que muitos pesquisadores tenham ignorado esse processo (FRANKEN et al., 1982; GENOVA

et al., 2007a; JACKSON, 2000; LIMA, 1983; MITCHELL et al., 2009). A essas dificuldades juntam-se as dificuldades para avaliar a variabilidade espacial do escoamento pelo tronco.

Segundo Bruijnzeel (1990), a medição do escoamento pelo tronco deve levar em consideração a sua grande variabilidade espacial. Jordan (1978), em estudo de ciclagem de nutrientes na Amazônia venezuelana, envolvendo 38 árvores em duas áreas, documentou que duas árvores pequenas de subosque direcionaram de forma consistente um volume de água três a seis vezes maior em relação às demais árvores da mesma classe de tamanho. Stan II e Levia Jr (2010), em pesquisa sobre a relação entre o micro relevo da casca e o escoamento pelo tronco em *Fagus grandifolia* Ehrh e *Liriodendron tulipifera* L. em Maryland, EUA, determinaram desvio padrão maior que a média em ambas as espécies e em todas as classes de tamanho estudadas. Carlyle-Moses (2004) quantificou o escoamento pelo tronco em comunidade de árvores baixas e esparsas no noroeste mexicano e assumiu que o erro padrão associado ao escoamento pelo tronco por evento é de 100% para mais ou menos, com nível de confiança de 95%.

Quanto à intensidade amostral, o alto valor do coeficiente de variação em estudo realizado em parcelas de 0,09 ha e com quatro réplicas, em floresta plantada de *Pinus taeda*, fez com que Zarnoch, Abrahamson e Dougherty (2002) concluíssem ser necessária a quantificação do escoamento pelo tronco em cerca de metade das árvores em parcela com 100 indivíduos, para que a amostragem atingisse a possibilidade de erro de 5% em 80% das amostragens sob chuvas de 25 mm.

As dificuldades técnicas e logísticas em medir o escoamento pelo tronco fazem com que os pesquisadores utilizem métodos de estimativa que, muitas vezes, levam a conclusões errôneas. Hanchi e Rapp (1997) compararam três métodos para quantificar o escoamento pelo tronco: 1) medição do escoamento pelo tronco em todas as árvores e divisão do volume total escoado pela área da parcela. Este método seria o ideal, porém é impraticável, segundo os autores, por ser necessária uma área verdadeiramente representativa, o que é difícil em ambiente natural; 2) medição do escoamento pelo tronco em árvores com diâmetro representativo e extrapolação do volume captado por essa classe de diâmetro para a área em hectare, método utilizado pela praticidade, mas sujeito a grandes erros; 3) medição do escoamento pelo tronco em todas as árvores de uma área definida, separadas em classes de tamanho, seguida da extrapolação do volume captado por cada classe de diâmetro para a área em hectare. O último método tem sido mais recomendado, pela praticidade de aplicação e por menores erros.

Outra fonte de controvérsia é o método utilizado para cálculo do volume escoado pelo tronco em unidade comparável à chuva (mm), dificuldade esta apontada por Nalon e Vellardi (1992). Horton (1919) dividiu o volume escoado por árvores individuais pela área de projeção de sua copa e esse método tem sido o método tradicionalmente utilizado por gerações de hidrólogos.

Para comparar a eficiência da árvore em direcionar água da chuva ao solo pelo tronco é necessário um índice que padronize características individuais, possibilitando assim a comparação entre troncos de diferentes portes e atributos. Horton (1919) estabeleceu os protocolos mais utilizados para avaliar a contribuição individual da captação e transporte da água pelo tronco, sendo a ‘altura equivalente do escoamento pelo tronco sobre a área de projeção da copa’ o volume total de água escoado pelo tronco dividido pela área de projeção horizontal da copa e a sua unidade, em analogia com a ‘altura correspondente de água da chuva’, expressa em milímetros. Helvey e Patric (1965), em artigo de revisão, afirmam ser este método o mais usual. De fato, em muitos estudos não está explícito o método de cálculo da conversão (FUJIEDA et al., 1997; GASH; STEWART, 1977; LLOYD; MARQUES FILHO, 1988; OLIVEIRA Jr.; DIAS, 2005; RUTTER, 1963), deduzindo-se que geralmente é esse o método utilizado. Na verdade, o divisor deve ser decidido em função do objetivo do estudo. A divisão do volume de água escoada pelo tronco pela área de projeção da copa é apropriada quando o objetivo é avaliar a quantidade de água coletada individualmente pela árvore em estudo que visa identificar diferenças entre indivíduos. A dificuldade em estimar a área das copas em florestas tropicais tem levado os pesquisadores a medir o escoamento pelo tronco em todas as árvores de uma parcela e dividir o volume total escoado pela área total da parcela. Este procedimento é recomendado em estudos de balanço hídrico, pois, para essa finalidade, dividir o volume coletado pela área de projeção da copa pode resultar em subestimativa quando há sobreposição de copas, assim como pode haver superestimativa da água que entra na área quando a distribuição das árvores é esparsa (ABOAL et al., 1999b).

Assim, em estudos de balanço hídrico, Leopoldo e Conte (1985), Cicco et al. (1986/1988), Arcova et al (2003), Sousa et al. (2011), Nalon e Vellardi (1992) dividiram o volume total de água do escoamento pelo tronco de todas as árvores pela área da parcela. Lima (1976) e Jordan (1978) utilizaram fator de conversão que considerou o número de indivíduos por hectare. Método similar foi utilizado por Balieiro et al. (2007), que multiplicaram o volume médio de escoamento pelo tronco obtido em três árvores pelo número de árvores plantadas por hectare em Seropédica, RJ. Para comparar a produção individual de escoamento pelo tronco, Shinzato et al. (2011) dividiram o volume escoado pela área de

projeção da copa das árvores em povoamento de Floresta Estacional Semidecidual e em talhões de *Pinus* sp e *Eucalyptus cloeziana*, na Floresta Nacional de Ipanema, São Paulo, assim como Moura et al. (2009), em fragmento de Mata Atlântica no Recife, PE. Wang et al. (2011) e Li et al (2009) dividiram o volume de água coletada por planta pela área da sua copa e também pela área basal, para avaliar a contribuição individual na recarga da água do solo.

HERWITZ (1986) propôs a taxa de afunilamento como um protocolo para comparar o escoamento pelo tronco entre indivíduos. Essa taxa indica o acréscimo de água que ocorre devido ao escoamento pelo tronco em uma área correspondente à área basal da árvore, em relação a uma área de dimensão equivalente, porém sem a árvore. Návar (1993) utilizou o escoamento pelo tronco em litros por milímetros de chuva, que denominou de coeficiente de escoamento pelo tronco (C_{Et}).

Em síntese, existem métodos distintos para quantificar o escoamento pelo tronco, mas agrupam-se, grosso modo, em quantificação para árvores individuais ou para a comunidade.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa foi elucidar as relações entre as características estruturais da vegetação do Cerrado e os processos hidrológicos representados pela interceptação da água da chuva, transprecipitação, escoamento pelo tronco e umidade do solo.

2.2 Objetivos específicos

Dentro da pesquisa, diferentes aspectos da hidrologia do Cerrado foram tratados individualmente, com objetivos específicos, incluindo:

- a) Quantificar a transprecipitação e verificar se existe correlação entre a proporção da transprecipitação e o volume total de chuva ao longo do gradiente fisionômico, que vai do cerrado típico ao cerradão;

- b) Quantificar a proporção da chuva que escoar pelo tronco em função de variáveis morfológicas da árvore;
- c) Verificar a quantidade de água da chuva que alcança o solo ao longo do gradiente fisionômico do Cerrado;
- d) Quantificar a umidade do solo em diferentes situações, no decorrer do tempo após a ocorrência da precipitação, no gradiente fisionômico do Cerrado.

Buscamos responder às seguintes questões:

- 1) Existe correlação entre a proporção da transprecipitação e a biomassa no gradiente fisionômico do Cerrado?
- 2) A proporção da água da chuva que escorre pelo tronco é variável em função do porte ou dos atributos funcionais das árvores?
- 3) Como varia a precipitação efetiva entre as fisionomias do Cerrado?
- 4) A umidade do solo é influenciada pela quantidade de água das chuvas retida pelas copas das árvores?

3 MATERIAL E MÉTODOS

Dentro desta introdução geral são apresentados tópicos como a caracterização geral da área de estudo e os métodos de coleta de chuva para caracterização da precipitação a céu aberto, que dizem respeito a todos os capítulos. Os detalhes metodológicos são apresentados em cada capítulo, segundo o seu objetivo.

3.1 Caracterização geral da área de estudo

O estudo foi conduzido na Estação Ecológica de Assis, que protege área de 1.312 ha de vegetação de Cerrado, localizada entre as coordenadas geográficas 22°33'65" a 22°36'68"S e 50°23'00" a 50°22'29"W, no município de Assis, Província Geomorfológica do Planalto Ocidental, oeste do Estado de São Paulo. O relevo da região é de colinas amplas e aplainadas,

com vertentes predominantemente retilíneas, sendo que a área de estudo ocupa as terras mais altas do município de Assis, com altitudes entre 500 e 588 m.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é transicional entre os tipos Cwa (mesotérmico de inverno seco) e Cfa (mesotérmico e úmido sem estiagem). A síntese meteorológica dos registros em Assis, entre os anos de 1991 a 2007, no Posto Meteorológico da APTA Médio Paranapanema (coordenadas geográficas 22° 37' 02,0" S e 050° 22' 35,0" W), resultaram em chuva média anual de 1.423 mm, valor este próximo ao do diagrama climático apresentado por Garrido et al (s.d.) do mesmo local. Doravante, consideraremos 1.400 mm como sendo o valor do volume anual de chuva. A média de temperatura anual é de 22°C, sendo que nos meses entre maio e agosto há maiores probabilidades de ocorrência de temperaturas abaixo de 2°C em abrigo meteorológico, sendo as geadas relativamente frequentes. Segundo Brunini e Prela (2007), o balanço hídrico mensal indica excedentes hídricos na maioria dos meses, mas dentro de sua variabilidade climática ocorre alta frequência de períodos secos (veranicos). A frequência de seca moderada a extrema é maior em dezembro e janeiro e os meses de outubro, junho e julho são os meses com menor probabilidade de ocorrência de chuva (BRUNINI; PRELA, 2007).

A Estação Ecológica de Assis, criada em 1992, preserva um dos últimos remanescentes de Cerrado na região oeste do estado de São Paulo. O pastoreio, as queimadas, a agricultura e a exploração de madeira foram interrompidos desde 1959, quando a área passou a ser propriedade do Estado (DURIGAN et al., 1987), levando ao adensamento da vegetação (PINHEIRO; DURIGAN, 2009). Atualmente o Cerrado na EEcA apresenta duas fitofisionomias distintas: cerrado *stricto sensu* e cerradão, sendo possível subdividir a primeira em cerrado típico e cerrado denso, segundo a classificação de Ribeiro e Walter (1998).

No interior da Estação Ecológica de Assis estão instaladas, desde 2006, 30 parcelas permanentes, georeferenciadas (Figura 2) para monitoramento da dinâmica da vegetação, no gradiente fisionômico que vai do cerrado típico ao cerradão (Figuras 3, 4 e 5). As parcelas, de formato retangular, foram instaladas de acordo com o proposto pelo Projeto Biogeografia do Bioma Cerrado (FELFILI et al., 1994), com dimensões de 20 x 50 m (1.000 m²), subdivididas em dez sub-parcelas de 10 x 10 m (100 m²) (Figura 6). Tendo como base as medições dendrométricas realizadas em 2006, selecionamos quinze parcelas representativas do gradiente para a instalação dos equipamentos de coleta de dados hidrológicos (Figura 2). A distância máxima entre duas parcelas utilizadas no presente estudo foi de 3 km e a distância mínima foi de 30 m.

Figura 2 - Localização das parcelas de estudo na Estação Ecológica de Assis (adaptado de Pinheiro, 2008). Os pontos marcados com “X” representam os pontos de coleta de chuva a céu aberto. Os números simbolizam postos automatizados e as letras simbolizam postos de coleta manual.

Figura 3 - Vista do cerrado típico. Estrato arbóreo descontínuo e piso parcialmente coberto por gramíneas e plantas herbáceas ou lenhosas de pequeno porte. (Foto: G. Durigan).

Figura 4 - Vista do cerrado denso. Estrato arbóreo descontínuo, gramíneas praticamente ausentes, terreno coberto por arbustos e subarbustos. (Foto: G. Durigan).

Figura 5 - Vista do cerradão. Fisionomia florestal, com estrato arbóreo contínuo. Gramíneas e arbustos muito raros ou ausentes. (Foto: G. Durigan).

Figura 6 - Croqui de cada parcela de 20 x 50 m, com as sub-parcelas de 10 x 10 m e as posições dos pluviômetros e do ponto georeferenciado.

3.2 Quantificação da precipitação total a céu aberto

A precipitação em área aberta em cada evento chuvoso foi registrada por um equipamento micrometeorológico automatizado (EMA) e dois pluviógrafos. Também foram distribuídos em áreas abertas seis pluviômetros de funil, com área de captação de 165 cm^2 , a 1 m de altura da superfície do solo (Figuras 2 e 7, Tabela 4), sendo a água armazenada em um recipiente de 20 litros, devidamente vedado. Os funis, confeccionados com alumínio, têm a borda inclinada com 8 cm de altura, para evitar “gotejamento para fora” e foram instalados em áreas abertas, o mais próximo possível das parcelas, seguindo as especificações recomendadas por Hewlett (1969).

Consideramos como eventos chuvosos individuais aqueles com volume superior à resolução do pluviógrafo (0,125 mm) e separados dos eventos adjacentes por períodos superiores a 5 horas, período este considerado suficiente, em qualquer horário, para a evaporação da água armazenada na superfície das folhas e no tronco das árvores. Efetuamos a coleta após a finalização de cada evento chuvoso, sempre quando possível.

Figura 7 - Pluviômetro de funil, equipamento utilizado para coleta da água das chuvas. (Foto: E.A. Honda)

Tabela 4 - Coordenadas geográficas dos pluviômetros, pluviógrafos e equipamento micrometeorológico automatizado (EMA), instalados na Estação Ecológica de Assis e adjacências, para obtenção de dados de precipitação a céu aberto.

identificação	Tipo de equipamento	Coordenadas geográficas	
		latitude	longitude
A	Pluviógrafo	22°35' 06,1" S	50° 23' 23,8" W
1	Pluviômetro	22° 36' 01,0" S	050° 23' 35,7" W
2	Pluviômetro	22° 36' 37,3" S	050° 22' 54,3" W
3	Pluviômetro	22°35' 47,8" S	50° 22' 43,3" W
4	Pluviômetro	22°35' 51,2" S	50° 21' 06,6" W
B	Pluviógrafo	22°35' 51,2" S	50° 21' 06,6" W
5	Pluviômetro	22° 35' 34,8" S	050° 21' 29,9" W
6	Pluviômetro	22° 35' 06,5" S	050° 21' 25,0" W
C	Pluviógrafo	22° 37' 02,0" S	050° 22' 35,0" W

CAPÍTULO I.

ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO E TRANSPRECIPITAÇÃO NO GRADIENTE FISIONÔMICO DO CERRADO

1. INTRODUÇÃO

A vegetação desempenha função reguladora no contexto do balanço hídrico, promovendo a redistribuição da água dentro dos compartimentos do sistema. Considerando que “é da interação entre o balanço hídrico e a vegetação que resultam as diferenças fundamentais entre os diferentes biomas e o desenvolvimento do seu padrão, tanto no espaço como no tempo” (PORPORATO; RODRIGEZ-ITURBE, 2002, p. 812), conhecer as características do balanço hídrico e os processos hidrológicos no ecossistema é fundamental para entender o seu funcionamento e, assim, definir as formas de manejo mais adequadas e eficazes do ponto de vista ecológico e econômico.

Os modelos de predição da interceptação desenvolvidos até a década de 1970 utilizavam relações empíricas derivadas das características da chuva e tinham caráter específico para o local e as suas características ambientais, tendo, portanto, a aplicabilidade restrita às condições idênticas ao meio em que foram gerados (MUZYLO et al., 2009). Modelos baseados em processos físicos começaram a surgir na década de 1970 (RUTTER et al., 1971; GASH, 1979). Esses modelos utilizam parâmetros micrometeorológicos para cálculo da evaporação, o que possibilitou a expansão da sua aplicabilidade para condições climáticas distintas daquelas para as quais foram geradas. Todavia, os parâmetros da vegetação, relacionados com o armazenamento de água pelas copas, continuaram a ser obtidos de forma empírica, e, portanto, a limitar a utilização desses modelos.

Rutter, Morton e Robins (1975) relacionaram o armazenamento pelas copas com o índice de área foliar (IAF) e, desde então, estudos de repartição de água da chuva que utilizam modelos com base física incluem a quantificação ou a estimativa do IAF (ABOAL et al., 1999a; BUTTLE; FARNSWORTH, 2012; GÓMEZ; GIRÁLDEZ; FERERES, 2001; KOMATSU, 2007; LINK, UNSWORTH; MARKS, 2004). De fato, Aston (1979) determinou a relação positiva entre o IAF e a capacidade de armazenamento de água pelas copas das árvores; Gómez, Giráldez e Fereres (2001) obtiveram um modelo simples para estimar a

interceptação anual em árvores maduras de *Olea europaea* em função da sua área foliar e Swank; Swift e Douglass (1984) documentaram diminuição da produção hídrica à medida que houve aumento do IAF em função do tempo decorrido após o plantio, em três bacias hidrográficas recobertas por floresta latifoliada na Carolina do Norte, EUA. Entretanto, dificuldades práticas em relacionar a captação da água de coletores individuais e o IAF imediatamente acima destes coletores (LEVIA JR; FROST, 2003), assim como a sua complexa determinação (ŠRAJ; BRILLY; MIKOŠ, 2008) tornam o uso dessa variável não muito frequente em estudos hidrológicos.

A necessidade de incluir parâmetros da estrutura da vegetação, assim como parâmetros florísticos e demográficos em ambientes tropicais, dada a extrema diversidade das comunidades vegetais dessas regiões, tem sido apontada pelos hidrólogos em várias ocasiões (HERWITZ, 1985; LLORENS; DOMINGO, 2007). A área basal da comunidade arbórea (AB) é a variável que, segundo Pinheiro e Durigan (2012), melhor representa a estrutura e a biomassa da vegetação no gradiente fisionômico do Cerrado. Em estudos sobre comunidades vegetais, esta variável tem sido largamente utilizada para caracterizar diferentes comunidades vegetais em região do Cerrado (WALTER et al., no prelo). Dadas as estreitas relações entre área basal, biomassa dos troncos e biomassa ou área da superfície foliar (BARTELINK, 1997; WARING; RUNNING, 2007), a variável área basal, de obtenção mais fácil, não destrutiva e mais precisa do que qualquer uma das variáveis relativas à biomassa citadas acima, seria mais recomendável como variável preditora de processos relacionados com a repartição da água da chuva pela vegetação. Entretanto, estudos hidrológicos que caracterizam estruturalmente a comunidade vegetal e relacionam essas características com variáveis hidrológicas ainda são raros (LLORENS; DOMINGO, 2007; KRÄMER; HÖLSCHER, 2009; MOLINA; CAMPO, 2012; PARK; CAMERON, 2008). Molina e Campo (2012), estudando a influência do desbaste na repartição da água da chuva, relacionaram as variáveis de estrutura da comunidade vegetal com a proporção de transprecipitação e obtiveram o maior coeficiente de correlação (79%) na relação desta com a AB. No Brasil, há estudos sobre repartição da água da chuva que utilizaram a área basal para caracterizar a comunidade vegetal (MOURA et al., 2009; OLIVEIRA Jr., 2006; OLIVEIRA Jr.; DIAS, 2005; LIMA, 1976; LIMA; NICOLIELO, 1983; SOUSA et al. 2011), mas somente Genova, Honda e Durigan (2007a) a relacionaram com processos hidrológicos.

Pesquisas hidrológicas, no Brasil, têm se concentrado no ambiente de floresta pluvial tropical montana, na Serra do Mar (ARCOVA; CICCIO, 1987; ARCOVA; CICCIO; ROCHA,

2003; CICCIO et al., 1986/88; FUJIEDA et al., 1997; NALON; VELLARDI, 1992; OLIVEIRA JÚNIOR.; DIAS, 2005; SOUSA et al., 2011), em floresta amazônica (FRANKEN et al., 1982; GERMER; ELSENBEER; MORAES, 2006; JORDAN; HEUVELDOP, 1981; LLOYD; MARQUES-FILHO, 1988; OLIVEIRA et al., 2008; UBARANA, 1996) e em plantações florestais (BALIEIRO et al., 2007; LIMA, 1976; LIMA; NICOLIELO, 1983; RODRIGUES, 2009; SHINZATO et al., 2011). Em ambiente de Cerrado, no estado de São Paulo, Leopoldo e Conte (1985) caracterizaram a repartição da água de chuva em vegetação com características de cerradão em São Manoel (SP); Lima e Nicolielo (1983) e Lima (1983) compararam a repartição da água das chuvas da vegetação do Cerrado com plantações florestais em Agudos. No Parque Estadual de Vassununga, Rocha et al. (2005) realizaram estudos para reconhecimento do ambiente hidrológico em diversas fisionomias do Cerrado. Em Assis, SP, foram realizados estudos sobre transprecipitação em modelos de plantio de mata ciliar (GENOVA; HONDA; DURIGAN, 2007a, b; HONDA; GENOVA, 2006). Entretanto, as informações sobre os processos hidrológicos no Cerrado do oeste paulista estão aquém do necessário para a devida compreensão sobre o funcionamento hidrológico desse ecossistema no seu gradiente fisionômico. Em área de Cerrado próxima a Brasília, Giambelluca et al. (2009) constataram diferenças significativas nas taxas de evapotranspiração no gradiente fisionômico entre o campo cerrado e o cerrado denso, e Bucci et al. (2008) verificaram gradiente de transpiração ao longo do gradiente fisionômico que variou desde o campo sujo até o cerradão.

Como em boa parte do bioma Cerrado, a cobertura vegetal da Estação Ecológica de Assis caracteriza-se por variações espaciais e temporais na estrutura da vegetação (PINHEIRO, DURIGAN, 2009) e há diferenças até mesmo na proporção entre raiz e parte aérea entre fisionomias (DURIGAN; MELO; BREWER, 2012). Considerando-se que a estrutura da vegetação influencia fortemente nos processos hidrológicos, essa Unidade de Conservação reúne condições ideais para estudos cujo foco seja o gradiente de biomassa e sua influência sobre os processos hidrológicos.

Neste capítulo objetivamos quantificar a água da chuva que atinge o solo sob a vegetação do Cerrado de forma difusa e avaliar como este componente do balanço hídrico é influenciado pelo gradiente de biomassa. Assim, no presente capítulo, verificamos a influência dos fatores micrometeorológicos e da estrutura da comunidade vegetal sobre a transprecipitação e quantificamos a sua proporção sob as copas entre as diferentes fisionomias

do Cerrado. Nossa hipótese era de que a transprecipitação seria inversamente proporcional à biomassa da vegetação, representada pela área basal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Para as análises apresentadas neste capítulo, utilizamos as 15 parcelas mencionadas na Introdução Geral (Figura 2, página 32 e Figura 6, página 34), nas quais foram instalados pluviômetros para coleta de transprecipitação.

2.2 Coleta de dados

Realizamos medições dendrométricas para caracterização da estrutura da vegetação em cada parcela, medições pluviométricas em área aberta e sob o dossel da vegetação para os estudos da transprecipitação e utilizamos dados micrometeorológicos para caracterizar as condições ambientais durante os eventos de chuva. A coleta de dados de transprecipitação ocorreu no período entre 27 de setembro de 2010 e 31 de janeiro de 2012.

2.2.1 Obtenção de dados micrometeorológicos

Para verificar se fatores micrometeorológicos influenciam a transprecipitação, efetuamos análise prévia utilizando os dados de volume de chuva, velocidade do vento a 2 m de altura acima do solo, radiação solar incidente, umidade relativa e temperatura atmosféricas obtidos na estação micrometeorológica automatizada da APTA-Médio Paranapanema.

2.2.2 Estrutura da comunidade vegetal

Em cada uma das parcelas de 1.000 m², descritas no item 3.1 da Introdução Geral (página 30), amostramos todos os indivíduos de porte arbóreo, adotando como critério de inclusão o diâmetro do tronco à altura do peito (DAP) igual ou superior a 5 cm. Todas as árvores amostradas encontram-se numeradas com etiquetas metálicas e identificadas.

Em cada árvore medimos o diâmetro à altura do peito (DAP) com fita diamétrica e altura com régua dendrométrica telescópica.

A partir dos dados dendrométricos, obtivemos as variáveis densidade de árvores e biomassa aérea, que foram analisadas por meio de análise de correlações em busca da variável que melhor representasse as relações com a transprecipitação (Anexo C). O melhor resultado foi obtido para área basal, dando respaldo à utilização desta variável para representar a estrutura da vegetação neste estudo. O modelo em função da AB apresenta ainda a vantagem de poder ser utilizado para quantificação da proporção da transprecipitação em relação à precipitação incidente ($P_i\%$) em qualquer local com vegetação do Cerrado cuja AB tenha sido calculada, sem exigir novos levantamentos para obtenção da variável preditora.

2.2.3 Precipitação em área aberta (P_t) e transprecipitação (P_i)

Além dos dados de chuva disponibilizados pela APTA- Médio Paranapanema e pelo CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS - CIIAGRO (2012), instalamos pluviômetros para coleta de precipitação incidente em área aberta conforme informado no item 3.2 da Introdução Geral (página 35).

Em cada uma das 15 parcelas instalamos 10 pluviômetros, um em cada sub-parcela de 10 x 10 m, o que resultou em 150 pluviômetros, com área total de captação de 1.650 cm² por parcela. Utilizamos pluviômetros de funil, com características idênticas aos utilizados na quantificação da precipitação em uma área aberta (Figura 7, página 35).

Utilizamos a estratégia de amostragem dos pluviômetros móveis (HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; LLOYD; MARQUES-FILHO, 1988; WILM, 1943), assim descrita: em cada subparcela demarcamos cinco posições em quincôncio (Figura 6, página 34) e, a aproximadamente cada dez coletas, mudamos a posição dos pluviômetros, sendo a nova posição sorteada sem reposição, de forma que, ao final do estudo, totalizamos cinco configurações diferentes, com uso de todas as posições demarcadas. Assim, em cada parcela utilizamos 50 posições de amostragem, o que totalizou 750 posições para toda a área de estudo. Posicionamos os coletores à distância de pelo menos 15 cm dos troncos, para evitar gotejamento concentrado proveniente dos troncos (RUTTER, 1963; FORD; DEANS, 1978).

Para cálculo da transprecipitação (ou precipitação interna- P_i), selecionamos coletas uniformes. Efetuamos a avaliação da uniformidade da coleta por meio de análise do coeficiente de variação dos volumes de chuva coletados nos pluviômetros instalados em área aberta. Consideramos como sendo uniformes as coletas cujo coeficiente de variação entre os volumes medidos nesses pluviômetros foi inferior a 15%. Doravante, “coletas efetuadas

durante o período de estudo” serão referentes às coletas selecionadas, sendo que as demais foram descartadas.

Quantificamos, em cada coletor, o volume da precipitação total (Pt) em mililitros e posteriormente convertimos em altura pluviométrica por meio da Equação (1).

$$Pt \text{ (mm)} = Pt \text{ (mL)} \times \text{fator do pluviômetro} \dots\dots\dots(1)$$

Onde:

Pt (mm) = precipitação total no aberto em mm;

Pt (mL) = precipitação em mililitros;

Fator do pluviômetro = 0,065

Doravante, a expressão chuva ou precipitação no aberto (Pt) será sempre referente à altura pluviométrica, em mm, obtida pela média de todos os coletores a céu aberto.

Calculamos a quantidade de chuva na precipitação interna, ou transprecipitada ($P_{i\text{mm}}$), de forma análoga ao cálculo da Pt, substituindo-se a precipitação total no aberto pela transprecipitação.

A quantidade de transprecipitação de cada parcela foi obtida pela média aritmética de todas as coletas nela efetuadas durante todo o período (LLOYD; MARQUES FILHO, 1988).

A proporção de chuva incidente que atravessou as copas ($P_{i\%}$) foi obtida por meio da Equação 2:

$$P_{i\%} = 100 \ P_{i\text{mm}} / Pt \dots\dots\dots(2)$$

2.3 Análise de dados

2.3.1 *Influência dos fatores micrometeorológicos na proporção da água da chuva na transprecipitação*

Elaboramos uma matriz de correlações de Spearman entre a proporção da chuva que atravessou as copas ($P_{i\%}$) e as variáveis micrometeorológicas que caracterizaram cada coleta, para verificar a influência de variáveis micrometeorológicas preditoras (volume total de água por coleta, intensidades máxima e média da chuva, velocidade do vento a 2 m de altura do solo, radiação solar, umidade relativa e temperatura atmosféricas) sobre a variável resposta

($Pi_{\%}$). Nesta análise, a unidade amostral foi a coleta e $Pi_{\%}$ corresponde à média da transprecipitação dos coletores de todas as parcelas em cada coleta.

2.3.2 Modelagem da transprecipitação $Pi_{\%}$ em função do gradiente de área basal

Utilizamos análise de regressão para modelar a transprecipitação ao longo do gradiente fisionômico. Nesse modelo, a variável resposta foi $Pi_{\%}$ e a variável preditora foi a área basal.

A unidade amostral, nessa análise, foi a parcela de 1.000 m². O valor de $Pi_{\%}$ refere-se ao total da chuva transprecipitada em cada parcela ao longo de todo o período de estudo (média de 10 pluviômetros por coleta, 26 coletas), em relação ao total de chuva a céu aberto no mesmo período.

Na ocasião da elaboração da regressão, os valores extremos foram detectados, por meio da análise da normalidade dos resíduos da regressão, com eliminação dos valores após avaliação da origem das suas discrepâncias.

Para as análises utilizamos o software Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

3. RESULTADOS

3.1 Transprecipitação (precipitação interna Pi) na Estação Ecológica de Assis

Das 61 coletas de chuva realizadas, selecionamos 26 coletas com base no critério de homogeneidade, que totalizaram 908,5 mm de chuva (APÊNDICE A).

O volume de chuva a céu aberto por coleta (Pt) variou de 5,8 mm a 99,3 mm, com erro padrão de 0,2 mm e 5,5 mm, respectivamente, entre os coletores. O menor valor de quantidade de transprecipitação por coleta foi de 4,4 mm, equivalente a 75,9% do volume de 5,8 mm da chuva que a originou. A maior quantidade de transprecipitação foi de 84,8 mm, o que equivaleu a 85,4% do volume de 99,3 mm da chuva que a originou. Não houve tendência da variação de $Pi_{\%}$ em relação ao volume de chuva Pt , sendo a menor proporção de

transprecipitação ($Pi_{\%}$) de 71,3%, em chuva de 69,7mm, e a maior proporção, 98,5%, em chuva de 35,8 mm (APÊNDICE A).

O somatório da média aritmética dos valores de Pi_{mm} das 15 parcelas em todas as 26 coletas foi de 778,5mm. Assim, é possível afirmar que, de um total de 908,5 mm de chuva, 85,7% atingiu o solo de forma difusa em toda a área de estudo, sem separação das fisionomias.

Na comparação entre parcelas (APÊNDICE B), o maior valor de Pi_{mm} , 882,1 mm (97,2% da precipitação total), foi registrado na parcela 5, cuja fisionomia foi caracterizada como cerrado típico. A parcela 29, cuja fisionomia foi caracterizada como cerradão, registrou o menor valor, 591,7 mm (65,2% da precipitação total).

3.2 Influência dos fatores micrometeorológicos sobre a transprecipitação

O volume de transprecipitação por coleta Pi_{mm} apresentou correlação direta com o volume total da chuva incidente e com as intensidades média e máxima da chuva (Tabela 5), sendo que a variação da chuva explicou 93% da variação observada na Pi_{mm} . (Equação 3). Não detectamos correlação entre os demais fatores micrometeorológicos e a Pi_{mm} , assim como não detectamos correlação entre a proporção da água transprecipitada $Pi_{\%}$ e os valores das variáveis micrometeorológicas registradas durante os eventos de chuva.

$$Pi_{mm} = 0,9331 + 0,8308Pt; \quad (r^2 = 0,9331; \quad p < 0,001; \quad n = 26) \dots\dots\dots (3)$$

Tabela 5 - Correlações de Spearman entre os valores de Pi_{mm} e $Pi_{\%}$ por coleta e as variáveis micrometeorológicas correspondentes a cada coleta, durante a ocorrência do evento chuvoso, no período compreendido entre outubro de 2010 a janeiro de 2012 na EECa. Valores em negrito: $p < 0,05$.

Fatores micrometeorológicos		transprecipitação	
		(mm)	(%)
Volume de chuva por coleta	(mm)	0.991	0.022
Intensidade máxima da chuva da coleta	(mm hora ⁻¹)	0.596	0.218
Intensidade média da chuva da coleta	(mm hora ⁻¹)	0.745	0.126
Velocidade média do vento	(m s ⁻¹)	-0.298	0.074
Radiação solar médio	(w m ⁻²)	-0.037	-0.153
Umidade relativa média	(%)	0.236	-0.025
Temperatura média	(°C)	0.353	0.347

3.3 Transprecipitação em função do gradiente de biomassa

A área basal da comunidade (APÊNDICE C) explicou 75,5% da variação na proporção da água da chuva que atravessa as copas da vegetação no gradiente fisionômico do Cerrado (Equação 4).

$$Pi_{\%} = 103,2 - 0,97 AB; \quad (r^2 = 0,7548; p < 0,001) \dots \dots \dots (4)$$

A proporção de água que atravessa o dossel decresce à medida que aumenta a biomassa. Dentro do espectro de área basal analisado, estima-se que para cada aumento de 1 m² na área basal, há uma diminuição em um ponto percentual da água da chuva que atravessa as copas e chega ao solo. As parcelas com menor biomassa, classificadas como pertencentes à fisionomia cerrado típico, permitem a passagem de maior quantidade de água, em proporção superior a 95% da chuva no aberto. No outro extremo se encontram as parcelas com maior biomassa, classificadas como cerradão, cuja Pi% variou entre 75% a 87%. (Figura 8).

Figura 8 - Transprecipitação em função da área basal da vegetação de Cerrado na Estação Ecológica de Assis. Linhas tracejadas representam o intervalo de confiança (95%).

4. DISCUSSÃO

4.1 Transprecipitação no Cerrado na Estação Ecológica de Assis em comparação com outros ecossistemas

Valores anuais de transprecipitação apresentados na literatura variam desde 43%, registrado por Ford e Deans (1978) em plantio homogêneo de 14 anos de *Picea sitcensis*, na Escócia, a 91%, documentado por Thompsom (1986), sob arbustos de *Prosopis glandulosa*, no Texas, EUA (Tabela 2, página 11). Em São Paulo, sob vegetação classificada como cerradão, Lima (1976) obteve, em Agudos, transprecipitação anual de 73% e Leopoldo e Conte (1985) registraram 80% em São Manoel. Em plantios comerciais no interior do estado de São Paulo, Lima (1976) obteve valores de transprecipitação de 90 e 84%, respectivamente, em plantios de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus saligna* aos 6 anos de idade, em Piracicaba. Entre o 11º e o 13º ano após plantio de *Pinus oocarpa* e *Pinus caribaea*, a transprecipitação anual foi da ordem de 88%, em ambas as espécies, em São Manoel, SP (LIMA; NICOLIERO, 1983).

A exemplo do valor anual de transprecipitação de 43% apresentado por Ford e Deans (1978), baixas proporções de transprecipitação são documentadas com maior frequência em regiões temperadas. Por outro lado, Bruijnzeel (1990), em artigo de revisão sobre processos hidrológicos em regiões tropicais, selecionou os estudos com nível de confiabilidade aceitável, concluindo que o percentual de água transprecipitado em floresta tropical de terras baixas varia entre 77 a 93%, enquanto em floresta tropical montana varia entre 75 a 86%. A revisão de Kuraji e Tanaka (2003) sobre os estudos de interceptação em região tropical também levam à conclusão de que os valores de transprecipitação entre os trópicos são superiores em relação aos valores apresentados na revisão de Llorens e Domingo (2007), sobre repartição de água sob condições do Mediterrâneo.

Características distintas do clima e da vegetação são decisivas na repartição da água das chuvas das diferentes regiões. Calder; Wright e Murdiyarso (1986) atribuem as dificuldades na aplicação dos modelos conceituais de predição da interceptação desenvolvidos em região temperada às diferenças nas características climáticas entre regiões temperadas e regiões tropicais. O modelo aplicado por esses autores passou a ser satisfatório em condições de floresta pluvial tropical somente após alteração nos coeficientes referentes à taxa de armazenamento de água nas copas originais por coeficientes desenvolvidos no local. O diferencial foi creditado ao tamanho das gotas das chuvas, maiores e com maior energia

cinética nos trópicos, em comparação com as chuvas de regiões temperadas, e à estrutura das folhas das florestas tropicais, relativamente amplas, de superfície aplainada e cerosa, que tendem a reduzir a retenção das gotas de chuva (CALDER; WRIGHT; MURDIYARSO, 1986).

No presente estudo, a proporção de água a alcançar o solo de forma difusa variou de forma gradual, desde valores baixos semelhantes aos obtidos em regiões temperadas até valores altos próprios de regiões tropicais, refletindo a grande variação de biomassa no gradiente de fisionomias do Cerrado. Fenômeno semelhante foi registrado em estudos que separaram o ano em períodos de atividade foliar e desfolha, sendo que o período em que as árvores perdem as folhas (menor área foliar) apresentou maior coeficiente angular na regressão linear do volume de transprecipitação (HELVEY; PATRIC, 1965; HERBST et al., 2008; LEONARD, 1961), ou maiores valores de $Pi_{\%}$ (Herbst et al., 2008; KRÄMER; HÖLSCHER, 2009). A mesma relação foi obtida em estudos de desbaste, nos quais $Pi_{\%}$ aumentou em função da diminuição de biomassa (BUTTLE; FARNSWORTH, 2012; DIETZ et al., 2006; KOMATSU; KUME; OTSUKI, 2009; MOLINA; CAMPO, 2012).

A parcela com menor quantidade de chuva a alcançar o solo pela transprecipitação, neste estudo, excluída como “outlier” da análise de regressão linear, é composta em 10% da sua densidade por indivíduos de *Tapirira guianensis*, espécie que ocorreu raramente nas outras parcelas. Em estudo comparativo da transprecipitação sob diferentes modelos de plantio de mata ciliar, esta espécie apresentou transprecipitação inferior ao plantio puro de *Pinus elliottii* (GENOVA; HONDA; DURIGAN, 2007), o que contradiz os resultados de estudos sobre efeitos sobre modificações da cobertura vegetal em bacias hidrográficas, cuja substituição de florestas de coníferas por vegetação folhosa resultou em aumento de produção hídrica (BOSCH; HEWLETT 1982; BROWN et al., 2005; SWANK; SWIFT; DOUGLASS, 1984), mas explica os valores baixos obtidos na parcela excluída do presente estudo. Park e Cameron (2008), em estudo da influência das características das copas de cinco espécies arbóreas no Panamá na repartição da água da chuva, observaram que há diferenças interespecíficas que desfavorecem a transprecipitação e favorecem o escoamento pelo tronco. No caso panamenho, a transprecipitação em exemplares de *Acacia mangium* foi menor em relação às demais espécies, enquanto o seu escoamento pelo tronco foi maior. Características estruturais da copa da *Tapirira guianensis*, tais como a folhagem cerosa, que diminui a retenção de água na superfície, o formato de cálice da extremidade dos ramos e o ângulo de inserção das folhas, que favorecem o escoamento da água pelos ramos, o ângulo de inserção dos ramos, que favorece a drenagem pelo tronco e, finalmente, a espessura e textura da casca,

finas e ásperas ou finamente fendilhadas, fazem com que a água que cai sobre a copa ou fique retida para evaporação ou escoar por caminhos preferenciais pelos ramos, atingindo o tronco e escoando até o solo (ver capítulo 2 desta tese).

4.2 Fatores micrometeorológicos e sua influência sobre a transprecipitação

É consenso que o aumento da quantidade de chuva seja acompanhado pelo acréscimo de água que atravessa o dossel (ARCOVA; CICCIO; ROCHA, 2003; BALIEIRO et al., 2007; CICCIO, 2009; CICCIO et al., 1986/88; FRANKEN et al., 1982; FUJIEDA et al., 1993; GÊNOVA, HONDA; DURIGAN; 2007a; LIMA, 1976; LIMA; NICOLIELO, 1983; MOURA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2008; OLIVEIRA JR; DIAS, 2005), conforme também ocorreu no presente estudo.

Entretanto, não há consenso, na literatura, sobre a variação da proporção de transprecipitação em função do volume total de chuva. Dentre os casos onde houve variação de $P_{i\%}$ em função de $P_{i\text{mm}}$ há registro de $P_{i\%}$ de 67% em chuvas com volume total inferior a 0,6 mm e estabilização em torno de 85% em chuvas com volume superior a 25 mm, com elaboração de regressão com coeficiente de determinação de 43,5%, em vegetação aberta e baixa de região com microclima semi-árido no noroeste mexicano (CARLYLE-MOSES, 2004). Em quatro ecossistemas florestais da Amazônia colombiana, $P_{i\%}$ variou entre 47% e 59% na menor classe de chuva e estabilizou-se em valores próximos a 88% nas classes de chuva com volume superior a 20 mm (TOBÓN MARIN; BOUTEN; SEVINK, 2000). No Brasil, chuvas de baixo volume geraram $P_{i\%}$ que variaram de 60 a 70%, com aumento gradual da proporção até valores próximos a 80% em chuvas com volume superior a 20 mm, independentemente do ecossistema considerado (CICCIO et al., 1986/88; Franken et al., 1982, Leopoldo e Conte, 1985). Também são abundantes relatos que não detectaram tendência nítida na relação entre $P_{i\%}$ e P_t (GERMER, ELSSENBEER; MORAES, 2006; HONDA; GENOVA, 2006; LIMA, 1976; OLIVEIRA JR; DIAS, 2005; PYPKER, BOND; UNSWORTH, 2004; SOUZA et al., 2011; THOMPSON, 1986; ZIEGLER et al., 2009). Essa variabilidade de resultados ocorre porque chuvas de igual montante podem originar $P_{i\text{mm}}$ distintos devido às diferenças de intensidade, frequência e duração (JACKSON, 1971). Aston (1979), ao estudar a variação de P_i sob chuva simulada em oito árvores jovens e em condições de laboratório, determinou relação inversa entre $P_{i\%}$ e a intensidade da chuva, o que o autor

atribuiu ao melhor aproveitamento da capacidade de armazenamento de água da copa devido ao maior salpicamento das gotas de chuva em condições de alta intensidade. Por outro lado, em estudo de evaporação em floresta tropical de Java, Calder; Wright e Murdiyarso (1986) afirmaram que maior proporção de água atinge o solo durante chuvas intensas, pois maior velocidade e tamanho de gotas de chuva que costumam estar associados a esses eventos dificultaria o preenchimento pleno da capacidade de armazenamento da chuva pelas copas.

Quando a coleta engloba vários eventos chuvosos de diferentes volumes, a relação entre o volume total de chuva e o volume coletado é complexa, de forma que é difícil determinar correlação entre estas variáveis (JACKSON, 1971). Eventos sequenciais podem ocorrer de forma a não haver tempo suficiente para que a água proveniente de chuva anterior e retida pelas folhas, troncos e ramos seja evaporada e, nessas condições, uma coleta com precipitação em sequência pode apresentar valores relativamente altos para a precipitação interna e baixos para a interceptação (FRANKEN et al., 1982). No presente estudo, dentre 26 coletas consideradas para análise, somente 7 representaram eventos individuais, de forma a dificultar conclusões sobre a $Pi_{\%}$ baseados no volume de Pi_{mm} . A mesma explicação pode ser válida para a correlação baixa entre as variáveis meteorológicas e a proporção da transprecipitação. Modelos de predição de evaporação da água da chuva baseados em conceitos físicos utilizam resolução temporal que varia desde 10 minutos até, no máximo, valores diários para cálculo da capacidade evaporativa do meio (MUZYLO et al., 2009).

Uma vez que os valores obtidos de volume de transprecipitação neste estudo não foram influenciados pelas condições micrometeorológicas, as características da vegetação surgem como a única variável a explicar a proporção de água da chuva que atravessa as copas.

4.3 Variação da proporção da transprecipitação em função do gradiente de biomassa

A relação inversa existente entre o índice de área foliar e a proporção da chuva que transpassa a copa (ASTON, 1979; PARK; CAMERON, 2008; TOBÓN MARIN; BOUTEN; SEVINK, 2000) e as relações entre o índice de área foliar e as dimensões das árvores (BARTELINK, 1997; SAMBA, CAMIRÉ; MARGOLIS, 2001) sugerem a existência de relação entre os diferentes atributos dendrométricos e estruturais da comunidade vegetal e a quantidade de água que chega ao solo por meio da transprecipitação, o que tem sido

verificado por vários autores (ASTON, 1979; HERWITZ, 1985; KRÄMER; HÖLSCHER, 2009; LLORENS; DOMINGO, 2007; MOLINA; CAMPO, 2012).

Em extensa revisão sobre transprecipitação e escoamento pelo tronco na região mediterrânea, Llorens e Domingo (2007) concluíram que, em virtude da relação encontrada entre P_i e as características estruturais dos talhões e da copa, é necessário incluir nas análises uma larga variedade de descritores da comunidade vegetal, como área de projeção da copa, falhas da copa, inclinação dos ramos, comprimento do ramos e características da casca. Já Herwitz (1985), estudando a capacidade de armazenamento pelas folhas e troncos, concluiu que a alta variabilidade destes valores sugere a necessidade de dados florísticos e demográficos para cálculo acurado da capacidade de armazenagem da interceptação em vegetação tropical com alta riqueza de espécies. As variáveis relativas à vegetação mais comuns entre os estudos hidrológicos são a densidade, a idade, a altura, o DAP e a área basal (LLORENS E DOMINGO, 2007), mas são frequentemente utilizadas apenas como descritores do ambiente e mais raramente como variáveis preditoras.

Em estudo sobre as diferenças florísticas e estruturais entre fitofisionomias do Cerrado em Assis, SP, Pinheiro e Durigan (2012) consideraram a área basal como sendo o melhor descritor para classificar as fitofisionomias, por ser pouco influenciada por critérios de inclusão, por ser facilmente mensurável e globalmente utilizada, facilitando comparações. De fato, a área basal tem sido largamente utilizada, inclusive no Cerrado (WALTER et al., no prelo), para caracterizar a estrutura da vegetação.

Os resultados do presente estudo apontaram estreita correlação entre a proporção de água da chuva que atravessa as copas e a biomassa da vegetação do Cerrado, representada pela área basal, cuja variação explicou 75% da variação observada de $P_i\%$. Estudos sobre os efeitos do desbaste florestal na repartição da água da chuva, realizados em regiões sem influência de neve (DIETZ et al., 2006), geraram resultados similares aos deste estudo, demonstrando que a relação entre a área basal e a $P_i\%$ é válida e robusta dentro de um mesmo tipo de vegetação, em termos de composição de espécies (superfície foliar, tipo de folhas e estrutura de copas). Tendo como base os resultados apresentados por Dietz et al. (2006), é possível estimar que, dentro do espectro de área basal analisado na floresta pluvial tropical da Indonésia, para cada diminuição de 1 m^2 na área basal, houve aumento em 0,8% da água da chuva que atravessou as copas. Na Província de Valencia, na Espanha, desbastes em plantio de *Pinus halepensis*, resultaram em aumento de cerca de 1% na transprecipitação para cada diminuição de 1 m^2 na área basal (MOLINA; CAMPO, 2012), que foi exatamente a relação encontrada no presente estudo.

Entretanto, o uso da área basal para conjuntos de dados oriundos de diferentes tipos de vegetação pode reduzir seu poder preditivo, conforme constatado por Llorens e Domingo (2007), em revisão da literatura sobre repartição da água da chuva por diferentes comunidades vegetais na região mediterrânea, que englobou situações ambientais e comunidades vegetais diversas. A inserção dos valores de transprecipitação obtidos por Genova, Honda e Durigan (2007), em diferentes modelos de plantio de mata ciliar, em Assis, na regressão obtida pela EQUAÇÃO 4, os valores de transprecipitação dos tratamentos plantio misto com espécies nativas de mata ciliar em região de Cerrado e o plantio puro de *Anadenanthera falcata* não causaram modificações drásticas nos coeficientes da equação, enquanto a inclusão das parcelas com *Pinus elliottii* ou *Tapirira guianensis* ocasionou diminuição do coeficiente de determinação, o que denuncia semelhanças estruturais entre a vegetação de Cerrado e o plantio misto ou o plantio de *A. falcata* e diferenças estruturais entre a vegetação de Cerrado e os plantios puros de *P. elliottii* e *T. guianensis*.

Assim, a EQUAÇÃO 4 é linear e com bom coeficiente de determinação, de modo que possibilita estimar a quantidade de água das chuvas que transpõem as copas na vegetação de Cerrado ou comunidades vegetais com estrutura semelhante, a partir, simplesmente, da obtenção da área basal da comunidade e dos dados de precipitação pluviométrica anual de qualquer localidade, pelo menos para área basal da comunidade vegetal entre 7,5 e 27 m² ha⁻¹, que foi a amplitude dentro da qual o modelo foi construído.

5. CONCLUSÕES

O volume de chuva que atravessa o dossel depende, diretamente, do volume de chuva a céu aberto e é relacionado negativamente com a biomassa da vegetação, ou seja, quanto maior o volume de chuva e menor a biomassa, maior será a quantidade de água que atingirá o solo sob o dossel da vegetação de Cerrado.

No entanto, a proporção da chuva que atravessa as copas e chega ao solo é independente do volume ou intensidade da chuva, sendo influenciada somente pela estrutura da vegetação. Quanto maior a biomassa, mais água das chuvas é interceptada pelas copas, ou seja, menor a proporção da água da chuva que atinge o solo.

CAPÍTULO II

FATORES QUE INFLUENCIAM O ESCOAMENTO PELO TRONCO EM ÁRVORES DO CERRADO

1 INTRODUÇÃO

O tipo de vegetação desempenha importante função na repartição da água das chuvas, uma vez que diferentes formações vegetais podem direcionar a água da chuva de forma diversa ao solo e à atmosfera (KRÄMER; HÖLSCHER, 2009; LEVIA JR.; FROST, 2003). A água da chuva que alcança a vegetação pode ser interceptada e imediatamente perdida para a atmosfera devido à evaporação da folhagem ou, pode chegar ao solo de forma difusa, pela transprecipitação, ou de forma concentrada, escoando pelos troncos das árvores.

O escoamento pelo tronco é a entrada hidrológica espacialmente concentrada na base da árvore (STAN II; LEVIA Jr., 2010) e possui significado importante nas características químicas e no regime hidrológico do solo localizado ao redor o tronco (HOFHANS et al., 2012; JORDAN, 1978; LEVIA JR.; FROST, 2003; TOBÓN; SEVINK; VERSTRATEN, 2004). O volume de água envolvido no escoamento pelo tronco, no âmbito do balanço hídrico, é pequeno, tem grande variabilidade entre indivíduos e quantificação difícil, de forma que Franken et al. (1982) chegaram a afirmar que “os erros cometidos nas leituras superam os seus próprios valores” (p.328). Essas são as justificativas para que o escoamento pelo tronco tenha sido ignorado por muitos autores. Entretanto, a água que chega ao solo após escoar pelo tronco é rica em solutos lixiviados das folhas, galhos e tronco (ANDRADE et al., 1995; ARCOVA; CICCIO, 1987; BALIEIRO et al., 2007; JORDAN, 1978) e é direcionada diretamente para a base das árvores (NAKAKITA, 1984). A partir da base do tronco, a água infiltrada percola preferencialmente ao longo das raízes pela matriz do solo e exerce efeito considerável na sua dinâmica hídrica (FORD; DEAN, 1978; NAVAR, 2011; WANG et al., 2011; Li, 2009) e nas suas propriedades (BOETTCHER; KALISZ, 1990).

A quantidade de água que escoar pelo tronco depende de muitos fatores, sendo que os atributos morfológicos das árvores desempenham importante função neste processo (ABOAL et al., 1999a,b; BRYAN, 1990; HORTON, 1919; DOMINGO et al., 1998; GARCIA-

ESTRINGANA; ALONSO-BLÁZQUEZ; ALEGRE, 2010; NÁVAR, 1993; PARK; CAMERON, 2008). Dentre os atributos que podem influenciar este processo, têm recebido destaque a morfologia e espessura da casca e a arquitetura dos ramos (HELVEY; PATRIC, 1965; HERWITZ, 1985; LEVIA JR; FROST, 2003; LEVIA; HERWITZ, 2005; STEINBUCK, 2002).

Para comparar o volume de água direcionado ao solo pelo tronco é necessário um índice que padronize características individuais, possibilitando assim a comparação entre troncos de diferentes portes e atributos. Horton (1919) estabeleceu os protocolos mais utilizados para avaliar a contribuição individual da captação e transporte da água pelo tronco, sendo a unidade mais utilizada o volume total, em litros, do escoamento pelo tronco dividido pela área de projeção da copa, ou seja, a altura equivalente da coluna da água escoada (Et_{imm}), expressa em milímetros. Esta variável permite comparar a eficiência em captar água por indivíduo, eliminando diferenças individuais da área de captação horizontal da copa, mas tem como inconveniente a necessidade de explicitar a quantidade de chuva que a originou.

A proporção de escoamento pelo tronco é a altura da coluna de água escoada pelo tronco dividida pela chuva que a ocasionou, podendo ser expressa em porcentagem ($Et_i\%$). Esta variável representa a eficiência do indivíduo em canalizar para a base do seu tronco a água que cai sobre a sua copa e permite comparar indivíduos com diferentes dimensões, sob condições de chuva distintas. Trata-se de variável com significado ecológico explícito, de compreensão fácil e obtenção simples, de forma que foi utilizada por muitos autores para comparar o $Et_i\%$ entre espécies com configurações morfológicas distintas (ABOAL et al., 1999b; GARCIA-ESTRINGANA; ALONSO-BLÁZQUEZ; ALEGRE, 2010; LI et al., 2009; NAVAR, 2011; PARK; CAMERON, 2008). Cabe ressaltar que $Et_i\%$ deve ser diferenciado da porcentagem de escoamento pelo tronco do povoamento ($Et_p\%$), uma vez que esta última variável é o somatório da água escoada por todos os indivíduos da parcela dividido pela área da parcela, sendo esta a variável utilizada na análise da repartição da água da chuva.

Návar (1993) utilizou o escoamento pelo tronco em litros por milímetros de chuva, que denominou de coeficiente de escoamento pelo tronco (C_{Et}). Esta variável permite estimar o Et_{imm} a partir do volume de chuva a céu aberto e também comparar o volume de água escoado pelo tronco entre diferentes indivíduos, para uma mesma quantidade de chuva. Há que se considerar, porém, que esta variável é influenciada pelo porte da árvore (ABOAL et al., 1999b), o que a torna inadequada para comparar a influência dos atributos das árvores na quantidade de escoamento pelo tronco e também não é a variável mais indicada para estimar o escoamento pelo tronco em uma escala maior (ABOAL et al., 1999b). Também é necessário

observar que o coeficiente de escoamento pelo tronco em uma árvore varia em função do volume da chuva. Portanto, para representar o coeficiente de escoamento pelo tronco de um indivíduo, o ideal é considerar um intervalo de tempo que englobe vários eventos.

O Cerrado apresenta diferentes fisionomias, que podem variar desde um campo aberto até a forma florestal, o cerradão (RIBEIRO; WALTER, 2008). A variação na fisionomia é acompanhada pelo gradiente de biomassa e estrutura (PINHEIRO; DURIGAN, 2012; WALTER et al., no prelo), por diferenças na arquitetura das árvores e na repartição de biomassa entre os seus componentes (DURIGAN; MELO; BREWER, 2012). Assim, é possível que árvores com atributos estruturais e funcionais distintos direcionem a água ao solo de forma diferenciada e que, por extensão, as árvores de diferentes fisionomias direcionem quantidades diferentes de água ao solo. Entretanto, ainda não existem estudos que enfocam o escoamento pelo tronco em ambiente de Cerrado.

Objetivamos, neste capítulo, quantificar o escoamento pelo tronco de árvores individuais, buscando identificar os fatores que influenciam este processo ecológico, relativos ao volume de chuva, à espécie, às dimensões dos indivíduos e aos seus atributos funcionais. Buscamos responder às seguintes questões: 1) qual (ou quais) o(s) atributo(s) que influencia(m) a quantidade de água que irá escoar pelo tronco? 2) qual é a proporção da água da chuva que atinge o solo escoando pelo tronco das árvores nas áreas ocupadas pelas diferentes fisionomias do Cerrado ?

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Selecionamos nove dentre as 15 parcelas de 1.000 m² descritas na Introdução Geral (Figura 2, página 32 e Figura 6, página 34), tendo como base o gradiente de área basal. Dentro de cada uma dessas parcelas, selecionamos uma subparcela (100 m²) cuja densidade de árvores mais se assemelhasse à densidade da parcela como um todo. Dentro desta subparcela instalamos os equipamentos para quantificação da água escoada pelo tronco.

2.2 Quantificação da Precipitação a céu aberto

Para avaliação do escoamento pelo tronco em relação ao volume de chuva, recorremos aos dados de precipitação a céu aberto, obtidos conforme informamos no item 3.2 da Introdução Geral (página 35).

Adotamos o mesmo procedimento utilizado no capítulo anterior para a seleção das coletas para análise. Selecionamos coletas com volume de chuva homogêneo entre os coletores, avaliando a uniformidade da chuva mediante a análise do coeficiente de variação dos volumes de chuva coletados nos pluviômetros instalados a céu aberto. Consideramos como sendo uniforme os eventos em que o coeficiente de variação entre os valores quantificados nos pluviômetros não fosse superior a 15%.

2.3 Quantificação do Escoamento pelo tronco

Selecionamos, para quantificação do escoamento pelo tronco, todos os indivíduos com DAP a partir de 5 cm no levantamento dendrométrico de 2006. Para efeito da análise de escoamento pelo tronco, no caso de árvores com troncos múltiplos nas quais foi possível a instalação de equipamentos separadamente, tratamos cada tronco como indivíduo. Em troncos múltiplos muito próximos, a ponto de impossibilitar instalação de equipamentos individualizados, instalamos um equipamento englobando todos os troncos e o conjunto foi considerado como um indivíduo. Assim, foram instalados coletores em 129 indivíduos, pertencentes a 34 espécies arbóreas (APÊNDICE D).

Em cada tronco instalamos um coletor de poliuretano (LIKENS; EATON, 1970) a 1,3 m da superfície do solo, moldado no tronco com cartolina e impermeabilizado com silicone (Figuras 9, 10 e 11). A água coletada foi canalizada por uma mangueira plástica de 1/2 polegada para recipiente de 20 ou 50 litros, sendo o volume do recipiente decidido em função do volume de água escoada pelo tronco em um período de observação que antecedeu o período de coleta de dados. Quantificamos o volume de água escoado pelo tronco utilizando proveta graduada de 250 mL, com precisão de 2 mL, jarros graduados com capacidade de 2 L e precisão de 25 mL ou baldes com capacidade de 20 litros e precisão de 1 L, conforme a

quantidade de água coletada. A precisão maior para volumes menores foi necessária para obter maior exatidão nos valores percentuais.

Figura 9 - Equipamento utilizado para coleta de água do escoamento pelo tronco (Foto: E.A. Honda).

Figura 10 - Aspecto da subparcela de coleta do escoamento pelo tronco na fisionomia cerradão. (Foto: E.A. Honda)

Figura 11 - Detalhe da espuma de poliuretano moldada no tronco, impermeabilizada com silicone e mostrando o canal de drenagem para coleta da água do escoamento pelo tronco. (Foto: E.A. Honda)

Das 27 coletas de escoamento pelo tronco, realizadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012, selecionamos 17 com base em critério de homogeneidade, totalizando 580,2 mm de chuva.

A altura do escoamento pelo tronco de uma árvore em milímetros – Et_{imm} é o quociente entre o volume total de água escoado pelo tronco coletado e a área de projeção da copa (Equação 5).

$$Et_{imm} = Et_{iL} / APC \dots\dots\dots(5)$$

Sendo: Et_{imm} : volume de água escoado pelo tronco (milímetros)
 Et_{iL} : volume de água escoado pelo tronco (litros)
 APC: área de projeção da copa (m^2)

A proporção de escoamento pelo tronco da árvore é o quociente entre a Et_{imm} e o volume de água da chuva (Pt). A sua multiplicação por 100 fornece a porcentagem de escoamento pelo tronco da árvore, $Et_i\%$ (Equação 6).

$$Et_i\% = 100 (Et_{imm} / Pt) \dots\dots\dots(6)$$

Sendo: $Et_i\%$: porcentagem de escoamento pelo tronco da árvore; eficiência de captação da água da chuva pelo tronco
 Pt : precipitação a céu aberto ($mm=L\ m^{-2}$)

O coeficiente de escoamento pelo tronco (NÁVAR, 1993) é o quociente entre o volume total de água escoado pelo tronco e o volume de chuva que o ocasionou (Equação 7). Utilizamos o somatório do volume de escoamento pelo tronco coletado e o volume total de chuva do período de estudo.

$$C_{Et} = Et_{iL} / Pt \dots\dots\dots(7)$$

Sendo: C_{Et} : coeficiente de escoamento pelo tronco ($L\ mm^{-1}$ de chuva)
 Et_{iL} : volume de água escoado pelo tronco (litros)
 Pt : precipitação a céu aberto (mm)

2.4 Caracterização das árvores pelos seus atributos

As 129 árvores amostradas encontram-se numeradas com etiquetas metálicas e identificadas, sendo parte da rede de parcelas permanentes da Estação Ecológica de Assis, instalada em 2006. Avaliamos, para cada árvore, 18 atributos, agrupados em dendrométricos e funcionais, detalhados a seguir.

2.4.1 Atributos dendrométricos

Para representar o porte de cada árvore medimos: diâmetro à altura do peito (DAP) por fita diamétrica, altura total e altura inferior da copa com régua dendrométrica telescópica e o diâmetro da copa (maior e menor), com trena.

A partir desses dados obtivemos as seguintes variáveis, representativas dos atributos dendrométricos:

- a) Diâmetro à altura do peito (DAP): medição direta em centímetros;
- b) Área basal individual (AB_i): calculada a partir do DAP, em m^2 ;
- c) Altura total (H): medição direta, em metros;
- d) Biomassa aérea: estimada a partir de equações alométricas desenvolvidas para as árvores do Cerrado na Estação Ecológica de Assis (PINHEIRO, 2008), em kg;
- e) Altura da copa (H_{copa}): calculada subtraindo-se a altura inferior da copa da altura total da árvore, em metros;
- f) Área de projeção da copa (APC): calculada pela fórmula da elipse, a partir de duas medidas de diâmetro da copa (o maior e o menor), em m^2 ;
- g) Volume da copa (V_{copa}): calculado a partir da fórmula de sólido elipsoidal, utilizando o diâmetro, maior, menor e altura da copa, em m^3 ;
- h) Área da superfície do tronco acima de 1,3 m de altura (A_{tr}): calculada a partir do DAP e altura total, utilizando-se a fórmula da superfície lateral do cone, em m^2 .

2.4.2 Atributos morfológicos e de arquitetura

Caracterizamos cada árvore em função dos seus atributos funcionais. Para tanto, adotamos a avaliação visual, baseada no consenso entre seis observadores, para as variáveis categóricas. Para as demais variáveis efetuamos medição ou contagem, como segue:

- a) Densidade da copa: variável categórica, classificando-se como 1. rala, 2. média e 3. densa. Avaliação visual com base no consenso entre seis observadores;
- b) Hábito de crescimento: variável categórica, classificando-se como 1. simpodial e 2. monopodial;

- c) Tortuosidade do tronco: variável categórica, classificando-se como 1. tortuoso, 2. sinuoso e 3. reto;
- d) Inclinação do tronco: variável categórica, classificando-se como, 1. muito inclinado, 2. inclinado e 3. ereto;
- e) Ângulo de inserção dos ramos: variável categórica, classificando-se como 1. muito inclinado, 2. inclinado e 3. ereto;
- f) Número de ramos por tronco: contabilizando-se todos os galhos com diâmetro superior a quatro centímetros na sua inserção no tronco;
- g) Tipo de casca: classificação com base nas imagens extraídas do glossário de Durigan et al. (2004);
- h) Espessura da casca E_{casca} : obtida mediante perfuração da casca a 1,3 m acima do solo e medição com régua milimetrada.
- i) Volume da casca a 1,3 m acima do solo V_{casca} : estimado, produto da multiplicação da espessura da casca, obtida no item 2.3.2.h, pela superfície do tronco obtida no item 2.3.1.h).

Para as características d) e e) utilizamos como ferramenta auxiliar um gabarito de metal e medimos o ângulo formado entre o tronco ou o galho com o terreno, doravante ângulo do ramo, sendo as categorias utilizadas: ereto, em ângulo da inclinação do tronco ou da inserção dos ramos em relação ao solo superior a 60°; inclinado: ângulo entre 60° e 30°; muito inclinado: ângulo inferior a 30°.

Estabelecemos a pontuação de 1 a 3, dentro das variáveis categóricas, em função da suposta facilidade de ocorrência de escoamento pelo tronco: tanto maior a pontuação da categoria quanto mais facilitar o escoamento pelo tronco.

2.5 Análise de dados

A primeira etapa compreendeu análises descritivas. Compilamos a estatística descritiva de todas as árvores estudadas e avaliamos a quantidade e a variabilidade de escoamento pelo tronco das árvores de Cerrado na Estação Ecológica de Assis. Na segunda etapa, estudamos

individualmente a relação entre as variáveis preditoras e as variáveis resposta. Na terceira etapa, quantificamos o escoamento pelo tronco nas subparcelas e parcelas.

2.5.1 Caracterização das árvores

Caracterizamos todas as árvores medidas quanto ao seu DAP, AB_i , altura total, altura da copa, área de projeção horizontal da copa, biomassa, volume da copa, área lateral do tronco acima de 1,3 do solo, espessura da casca, volume de casca e número de ramos com diâmetro superior a 4 cm para visualização generalizada.

2.5.2 Análise geral do escoamento pelo tronco em árvores individuais

Elaboramos boxplot com os valores medianos do C_{Et} , e $Et_{i\%}$ e as suas dispersões, para avaliar a dimensão e variabilidade local dessas variáveis.

Como o volume de água escoado pelo tronco é dependente do volume de chuva que o ocasionou, não são possíveis comparações para esta variável entre locais com diferentes índices de precipitação e nem no mesmo local, quando o volume de chuva é diferente. Por outro lado, o coeficiente de escoamento pelo tronco C_{Et} fornece a variação do volume de escoamento pelo tronco em função da unidade de chuva, independentemente do período de coleta, permitindo a comparação do volume de escoamento pelo tronco entre árvores que ocorrem em locais com características pluviométricas diferentes, desde que englobem vários eventos chuvosos, mas tem o inconveniente de ser influenciado pelas dimensões da árvore. O valor de $Et_{i\%}$ é normalizado pela área da copa, permitindo comparações entre árvores de diferentes tamanhos, em qualquer local. Assim, para a comparação entre árvores individuais, a variável apropriada é $Et_{i\%}$.

Nessa análise, a unidade amostral foi a árvore, e o $Et_{i\%}$, o somatório do escoamento pelo seu tronco todas as 17 coletas.

2.5.3 Escoamento pelo tronco em função do volume de chuva

Utilizamos regressão linear em árvores individuais, para modelar o volume de escoamento pelo tronco por árvore (Et_{iL}) em função do volume de chuva, utilizando o volume coletado em cada árvore e em cada coleta (KRÄMER; HÖLSCHER, 2009). Nessa análise, a unidade amostral foi a árvore e o seu Et_{iL} por coleta.

Obtidos todos os dados para as 17 coletas em todas as 129 árvores, analisamos a relação entre o somatório do Et_{imm} , de todas as árvores em cada coleta, e o volume de chuva coletado, por meio de regressão. Nessa análise, a unidade amostral foi a coleta.

2.5.4 Escoamento pelo tronco em função do porte da árvore

Para avaliar a relação entre o volume de água escoado pelo tronco e porte da árvore, utilizamos como variáveis-resposta o coeficiente de escoamento pelo tronco C_{Et} e a porcentagem de escoamento pelo tronco $Et_i\%$. A unidade amostral foi a árvore e o $Et_i\%$, o somatório do escoamento pelo seu tronco em todas as 17 coletas.

Como os dados de C_{Et} e os de $Et_i\%$ não apresentaram normalidade, tentamos os métodos de transformação mais utilizados (Zar, 1999), sem obter resultados satisfatórios. Portanto, optamos por análises não paramétricas. Para a análise individual das variáveis contínuas, elaboramos matriz de ranqueamento de correlações de Spearman entre as variáveis preditoras e as variáveis resposta. Nos casos em que foi detectada correlação, em uma segunda etapa utilizamos análise de regressão para esclarecer as relações entre a variável-resposta e a variável preditora.

2.5.5 Escoamento pelo tronco em função dos atributos funcionais

Para a análise individual das variáveis categóricas, agrupamos as árvores pelos seus atributos e adotamos a comparação por mediana (Kruskall-Wallis) entre os valores das variáveis resposta. Apresentamos os resultados em boxplots.

Para variáveis contínuas e discretas, empregamos tabela de ranqueamento de correlações de Spearman, utilizando como variável-resposta a eficiência de cada árvore na captação da

água da chuva pela copa $Et_i\%$, pois essa variável foi normalizada para o tamanho pela copa. A unidade amostral foi o tronco e o $Et_i\%$, obtido pela Equação 6 (somando-se o volume de todas as 17 coletas).

2.5.6 *Escoamento pelo tronco das árvores de diferentes espécies do Cerrado*

De início, agrupamos $Et_i\%$ por espécie. Doze espécies foram representadas por apenas um exemplar, de forma que foram excluídas desta análise. Submetemos as demais 16 espécies à comparação por mediana (Kruskall-Wallis). Apresentamos os resultados em boxplots.

Para as análises estatísticas utilizamos o software Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

3 RESULTADOS

3.1 *Escoamento da água da chuva pelo tronco de árvores individuais*

O volume de água escoado pelo tronco de árvores individuais (Et_{iL}), ao longo de todo o período de coleta (17 coletas), variou de 3 L até 609 L, com valor mediano de 41 litros (Figura 12A). O valor máximo foi registrado em um exemplar da espécie *Tapirira guianensis*, com 17 cm de DAP e 11 m de altura total. O coeficiente de escoamento pelo tronco variou de $0,005 \text{ L mm}^{-1}$ até $1,050 \text{ L mm}^{-1}$, com valor mediano de $0,0705 \text{ L mm}^{-1}$ (Figura 12B). Considerando-se a precipitação média da região como sendo de aproximadamente 1.400 mm (Capítulo Introdutório, p. 31), a quantidade de água escoada em um ano pelo tronco de uma árvore da área de estudo seria em média de 98,7 L, oscilando entre o mínimo de 7 L ao máximo de 1.470 L.

Figura 12 - Escoamento pelo tronco em árvores individuais, em litros (Et_{iL}), para um total de chuva de 580,2 mm distribuído ao longo de 11 meses (A) e coeficiente de escoamento pelo tronco C_{Et} (B), na Estação Ecológica de Assis, SP. Número de indivíduos considerados: 129.

O somatório do volume escoado pelo tronco de cada árvore (Et_{iL}) quantificado em todas as 17 coletas dividido pela área de projeção da copa da árvore forneceu Et_{imm} , que variou de 0,8 mm a 151,6 mm, com valor mediano de 7,2 mm (Figura 13A), lembrando que o volume total de chuva coletado a céu aberto foi de 580,2 mm. O valor máximo foi medido em um exemplar da espécie *Machaerium acutifolium*, com 7,5 cm de DAP e altura total de 7 m.

A proporção de escoamento pelo tronco de uma árvore em relação à chuva captada pela área de projeção da sua copa ($Et_{i\%}$) variou de 0,1% a 26,1%, sendo inferior a 1% em 56 indivíduos (43%) e maior que 10% em 5 indivíduos (4%). O valor mediano de $Et_{i\%}$ foi 1,3% (Figura 13 B).

Figura 13 - Escoamento pelo tronco em árvores individuais, em milímetros (Et_{imm}), para um total de chuva de 580,2 mm distribuídos ao longo de 11 meses (A) e em porcentagem do volume de chuva ($Et_{i\%}$) (B) na Estação Ecológica de Assis, SP. Número de indivíduos considerados: 129.

3.2 Escoamento pelo tronco em função do volume de chuva

Se analisada a comunidade como um todo (água escoada pelo tronco de todas as árvores em conjunto), por meio do Et_{imm} obtido dividindo o somatório do Et_{iL} , pelo somatório da APC de todas as 129 árvores, encontramos relação estreita entre o volume de chuva e o volume de água que escoa pelo tronco na comunidade, representada pela Equação 8 (Figura 14).

A eficiência em captar a água da chuva pela copa e drenar pelo tronco aumentou de forma logarítmica em função do aumento do volume de chuva (Equação 9), havendo uma aparente estabilização em chuvas maiores que 60 mm, em valores de $Et_{i\%}$ próximos a 2,6% (Figura 15).

$$Et_{mm \text{ comunidade}} = -0,082 + 0,0119 Pt; \dots\dots\dots r^2=0,98; p<0,001; n = 17 \dots\dots\dots(8)$$

$$Et\%_{\text{comunidade}} = -0,943 + 0,849 \ln(P); \dots\dots\dots r^2=0,804; p<0,001; n = 17 \dots\dots\dots(9)$$

Figura 14 - Volume do escoamento pelo tronco, em função do volume de chuva por coleta, considerando todos os 129 indivíduos, em coletas efetuadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012 na Estação Ecológica de Assis, SP.

Figura 15 - Eficiência de captação da água da chuva pelo tronco ($E_t\%$), em função do volume de chuva por coleta, obtida a partir da quantificação conjunta de $E_{t_{imm}}$ de todos os 129 indivíduos, em 17 coletas efetuadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012 na Estação Ecológica de Assis, SP.

Porém, o processo de captação da água e escoamento pelo tronco é muito variável entre indivíduos, resultando em enorme variação no coeficiente angular das regressões lineares entre $E_{t_{imm}}$ em função do P_t para árvores individuais. A regressão linear resultante da variação do volume de água escoado em função do volume da chuva baseado na contribuição individual das 129 árvores apresentou alto nível de significância, $p < 0,001$, mas baixo coeficiente de determinação da reta, 0,2096. Esse resultado demonstra que, no conjunto de todas as árvores, a variação do volume de chuva explicou apenas 21% da variação observada no volume de água escoado pelo tronco. Assim, pode-se afirmar que é baixo o poder preditivo de uma regressão linear única para estimar o volume de escoamento pelo tronco de árvores individuais.

Para cada uma das 129 árvores amostradas, tanto o volume de água escoado pelo tronco – $E_{t_{IL}}$ e $E_{t_{imm}}$, aumentaram linearmente em função do volume de chuva coletado. As equações de regressão linear individuais apresentaram elevado coeficiente de determinação e alta significância, de forma que, em árvores individuais, a variação do volume de chuva explicou mais de 90% da variação no escoamento pelo tronco (exemplos nas Figuras 16 e 17). Assim, é possível determinar o volume de água da chuva que escoou pelo tronco de uma árvore, em um evento chuvoso, uma vez determinados os coeficientes da regressão para esta mesma árvore.

Figura 16 E_{tL} dos indivíduos de número 3915 (*Tapirira guianensis* $E_{tL} = -8,311 + 1,29 Pt$; $r^2 = 0,93$; $p < 0,01$, $n = 10$) e 3923 (*Anadenanthera falcata* $E_{tL} = -0,314 + 0,02 Pt$; $r^2 = 0,70$; $p < 0,01$, $n = 17$), respectivamente, com o maior valor e um dos menores valores para o somatório de E_{tL} em 17 coletas de chuva efetuadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012 na Estação Ecológica de Assis, SP.

Figura 17 Escoamento pelo tronco dos indivíduos de número 256 (*Machaerium acutifolium*, $E_{t_{imm}} = -3,94 + 0,377 Pt$; $r^2 = 0,93$; $p < 0,01$; $n = 17$) e 2865 (*Copaifera langsdorffii*, $E_{t_{imm}} = -0,05 + 0,003 Pt$; $r^2 = 0,96$; $p < 0,01$; $n = 17$), respectivamente, com o maior valor e um dos menores valores, em 17 coletas de chuva efetuadas no período entre 04/03/2011 a 26/01/2012 na Estação Ecológica de Assis, SP.

Dessa forma, apesar do volume de chuva determinar em 99% a quantidade média de água a atingir o solo fluindo pelo tronco em árvores individuais, não é possível obter uma equação que se aplique a qualquer uma das árvores da comunidade, pois existem outros fatores, além do volume de chuva, que causam grande variação entre árvores. Os itens seguintes avaliam as possíveis influências causadas por diferentes atributos das árvores do Cerrado sobre o escoamento de água pelo tronco.

3.3 Escoamento pelo tronco em função do porte da árvore

A análise de correlação demonstrou que todas as variáveis preditoras representativas do porte da árvore influenciam, de forma significativa, as variáveis-resposta (Tabela 6). De forma geral, o volume de escoamento pelo tronco, representado pelo C_{Et} , tem relação positiva com todas as variáveis de dimensão, ao passo que a eficiência em captar a água da chuva pela copa e escoar pelo tronco, $Et_i\%$, tem relação inversa com o porte da árvore.

Tanto maior foi C_{Et} quanto maiores as dimensões da árvore, para todas as variáveis relacionadas com o porte do indivíduo, sendo a altura e volume da copa as variáveis que apresentaram maior coeficiente de correlação (Figura 18). Seguiram-se a estas, com valores decrescentes de correlação, as variáveis altura total, área de projeção da copa, área da superfície do tronco acima do coletor e biomassa aérea. DAP e área basal individual influenciaram C_{Et} menos intensamente do que as variáveis relativas ao tamanho da copa.

Tabela 6 - Ranqueamento de correlações de Spearman entre as variáveis relativas ao porte da árvore, coeficiente de escoamento pelo tronco (C_{Et}) e eficiência em captar a água da chuva e canalizar para o tronco ($Et_i\%$) na Estação Ecológica de Assis, SP. Valores em negrito: $p < 0,05$; $n=127$ com eliminação em caso de dados ausentes.

		DAP	AB	H	H _{copa}	APC	V _{copa}	A _{tr}	Bio	C _{Et}
Diâmetro à altura do peito DAP	(cm)	1								
Área basal individual AB _i	(m ²)	1.00	1							
Altura total H	(m)	0.55	0.56	1						
Altura da copa H _{copa}	(m)	0.44	0.44	0.65	1					
Área de projeção da copa APC	(m ²)	0.63	0.63	0.71	0.58	1				
Volume da copa V _{copa}	(m ³)	0.63	0.63	0.76	0.77	0.96	1			
Área lateral do tronco A _{tr}	(m ²)	0.87	0.87	0.87	0.63	0.76	0.79	1		
Biomassa aérea Bio	(kg)	0.92	0.92	0.82	0.59	0.75	0.77	0.99	1	
Coef. de escoam. pelo tronco C _{Et}	(L mm ⁻¹)	0.22	0.22	0.45	0.47	0.40	0.47	0.38	0.36	1
Proporção de escoam.o pelo tronco Et _i %	(%)	-0.40	-0.40	-0.31	-0.19	-0.61	-0.52	-0.40	-0.40	0.41

Figura 18 - Coeficiente de escoamento pelo tronco C_{Et} em função da altura da copa de árvores do Cerrado (H_{copa}) na Estação Ecológica de Assis, SP. Regressão: $C_{Et}=0,0483+0,0242 H_{copa}$; $r^2=0,0733$; $p<0,019$; $n=129$)

Ao contrário do C_{Et} , as relações entre as variáveis preditoras avaliadas e o $Et_i\%$ resultaram em correlação negativa, o que demonstra maior concentração do volume de água para os troncos em indivíduos de menores dimensões. Todas as variáveis preditoras apresentaram correlação negativa com $Et_i\%$, e a sua influência variou desde um nível baixo (-0,20) a moderado (-0,63). A variável preditora para $Et_i\%$ que apresentou maior correlação foi a área de projeção da copa APC (Figura 19).

Figura 19 Eficiência da captação da água da chuva pela copa $Et_i\%$ em função da área de projeção da copa (APC) na Estação Ecológica de Assis, SP. Regressão: $Et_i\%=0,0324-0,0009 APC$; $r^2=0,0724$; $p=0,002$; $n=129$)

3.4 Escoamento pelo tronco em função dos atributos funcionais

Hábito de crescimento (Figura 20), tortuosidade (Figura 21) e inclinação do tronco (Figura 22) influenciaram a eficiência de captação da água pela copa $Et_i\%$, enquanto não foi verificada influência significativa da densidade da copa, inclinação dos ramos e tipo de casca.

Os valores de $Et_i\%$ foram significativamente maiores ($KW_{H(1, 129)}=10,6$; $p=0,001$) em árvores com crescimento monopodial ($n=19$) se comparadas com árvores de crescimento simpodial ($n=110$) (Figura 20). Os valores medianos de $Et_i\%$ em árvores de crescimento monopodial e simpodial foram de, respectivamente, 2,60% e 1,02%.

Figura 20 - $Et_i\%$ em função do hábito de crescimento das árvores na EEcA, SP. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas por Kruskal-Wallis ($p<0,05$).

Em árvores de tronco tortuoso ($n=33$), $Et_i\%$ foi significativamente menor ($KW_{H(1, 129)}=6,81$; $p=0,033$) em relação a árvores de tronco reto ($n=45$) (Figura 21). Dessa forma, em termos de volume de água escoado por indivíduo, quando o tronco é tortuoso, o aumento do escoamento pelo tronco depende menos do aumento do volume de chuva do que para os tipos de tronco reto ou sinuoso. O valor mediano do $Et_i\%$ em árvores com tronco reto, sinuoso e tortuoso foi de, respectivamente, 1,6, 1,3 e 0,7%.

Figura 21 - $Et_i\%$ em função da tortuosidade do tronco na EECa, SP. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas por Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

Árvores com tronco muito inclinado ($n=18$) apresentaram valores de $Et_i\%$ significativamente menores ($KW_{H(1, 129)}=6,94$; $p=0,031$) em relação às árvores com tronco ereto ($n=56$) (Figura 22). Dessa forma, quando o tronco é muito inclinado, o aumento do escoamento pelo tronco depende menos do aumento do volume de chuva do que para troncos eretos ou inclinados. O valor mediano do $Et_i\%$ em árvores de tronco ereto, inclinado e muito inclinado foi de, respectivamente, 1,57, 1,28 e 0,69%.

Figura 22 - $Et_i\%$ em função da inclinação do tronco na EECa, SP. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas por Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

A espessura da casca não exerceu influência significativa sobre o $Et_i\%$. Porém, o volume da casca e o número de ramos, exerceram influência negativa moderada na eficiência de captação da água da chuva pela copa (Tabela 7).

Tabela 7 Ranqueamento de Spearman entre os atributos funcionais da árvore volume da casca (Vc), número de ramos (nR), espessura da casca (Ecasca) e $Et_i\%$ na Estação Ecológica de Assis, SP. Valores em negrito: $p < 0,05$; $n = 127$ com eliminação em caso de dados ausentes.

	Vc	nR	Ecasca	$Et_i\%$
Vc m	1.00			
nR	0.52	1.00		
Ecasca	0.71	0.25	1.00	
$Et_i\%$	-0.33	-0.43	-0.14	1.00

3.5 Escoamento pelo tronco das árvores de diferentes espécies do Cerrado

Não foi detectada diferença significativa de $Et_i\%$ entre as espécies consideradas para a análise (Figura 23).

Figura 23 Eficiência em captar a água da chuva pela copa e escoar pelo tronco $Et_i\%$ em função da espécie na EEcA, SP.

4 DISCUSSÃO

4.1 Análise geral do escoamento pelo tronco em árvores individuais

A grande variabilidade do volume de escoamento pelo tronco é fartamente documentada na literatura, mesmo quando é estudado o mesmo tipo de floresta ou a mesma espécie (ABOAL et al., 1999b). Assim, para comparar quantidades de escoamento pelo tronco obtidas em diferentes condições, as variáveis Et_{iL} ou Et_{imm} , dependentes do volume de chuva que as originou, não são apropriadas para comparação, a menos que tenham sido obtidas no mesmo local e sob condições de chuva idênticas. Utilizamos, portanto, a eficiência de captação da água da chuva pela copa $Et_i\%$ para comparar os resultados obtidos em árvores individuais com os valores apresentados na literatura (Tabela 3, página 18).

Em seis espécies de árvores de floresta subtropical de Lauraceas em regeneração de cerca de 50 anos, no Tenerife, Ilhas Canárias, os valores de $Et_i\%$ variaram de 1,2% (*Ilex perado*) a 13,6% (*Ilex canariensis*), sendo de 4,6% o valor médio de 30 árvores (ABOAL et al., 1999b). Em árvores de *Prosopis glandulosa*, em região semi-árida do Texas, EUA, o $Et_i\%$ médio foi de 4,9%, variando desde 2,5 a 12% (THOMPSON, 1986). Em região semi-árida da China, o $Et_i\%$ de arbustos de *Hedysarum scoparium* e *Salix psammophila* variou entre 2,3 a 7,0% e 0,2 a 14,2%, com médias de 3,4 e 6,3%, respectivamente (LI et al., 2009). Em nove espécies de arbusto do mediterrâneo cultivados em vaso, o $Et_i\%$ variou entre 3,8 e 26,4% (GARCIA-ESTRINGANA; ALONSO-BLÁZQUEZ; ALEGRE, 2010). Em seis árvores emergentes de *Stewartia monadelphica* de 50 anos, cercadas por floresta mista de coníferas e folhosas, o $Et_i\%$ anual variou de 3,3 a 26,0%. Em cinco espécies, no Panamá, a média de $Et_i\%$ variou entre 0,9 e 4,6% (PARK; CAMERON, 2008).

De todos os valores de $Et_i\%$ que constam da literatura, somente uma espécie (*Ochroma pyramidale*), em floresta pluvial tropical no Panamá, demonstrou eficiência média abaixo de 1% (PARK; CAMERON, 2008). Os maiores valores de $Et_i\%$ foram apresentados por duas espécies, sendo uma espécie arbórea dominante de clima temperado, *Stewartia monadelphica* (LIANG; KOSUGI; MIZUYAMA, 2009b) e a outra, *Cytisus zeelandia*, uma espécie arbustiva

mediterrânea (GARCIA-ESTRINGANA; ALONSO-BLÁZQUEZ; ALEGRE, 2010), em valores próximos a 26%.

Para as árvores do Cerrado analisadas neste estudo, apesar da presença de dois exemplares com $Et_i\%$ de 26%, cerca de metade dos indivíduos apresentaram valores inferiores a 1%, e o terceiro quartil, de 2,3%, foi inferior aos valores médios presentes na literatura. Dessa forma, é possível afirmar que, em relação às informações existentes, as árvores do Cerrado têm baixa eficiência em captar a água da chuva e direcioná-la para o seu tronco, o que pode ser explicado pela baixa área de superfície foliar da vegetação de savana, em comparação com florestas tropicais ou temperadas (LARCHER, 2001).

4.2 Escoamento pelo tronco em função do volume de chuva

A quantidade absoluta de água que escoar pelo tronco de árvores individuais, assim como para a comunidade como um todo, é diretamente proporcional ao volume da chuva (ARCOVA et al., 2003; ARCOVA; CICCIO; ROCHA, 2003; BALIEIRO et al., 2007; LIMA, 1976; MOURA et al., 2009; NALON; VELLARDI, 1992; OLIVEIRA et al., 2008; OLIVEIRA JR.; DIAS, 2005; SOUSA et al. 2011; UBARANA, 1996).

A regressão entre Et_L e volume de chuva em árvores individuais resultou em elevado coeficiente de correlação, demonstrando estabilidade da relação entre as variáveis. Resultado idêntico foi relatado por Ford e Deans (1978), em plantio de *Picea sitchensis* de 14 anos na Inglaterra, que observaram padrão e coeficiente de correlação consistentes entre Et_L e volume de chuva de árvores individuais, sendo a relação positiva e significativa por semanas sucessivas. Na Amazônia colombiana, o volume de escoamento pelo tronco aumentou gradualmente com o aumento do volume de chuva até o limite de 25 mm, a partir do qual tornou-se muito disperso (TOBÓN MARIN; BOUTEN; SEVINK, 2000).

No entanto, há grande variação entre árvores individuais no coeficiente angular da regressão entre as variáveis, reflexo das diferenças entre as árvores na sua eficiência em canalizar água para a sua base por escoamento pelo tronco ($Et_i\%$). Assim, não é possível obter uma regressão única que sirva para todas as árvores, para prever o volume de água que escoará pelo tronco em função do volume de chuva.

. A difícil previsibilidade do volume de escoamento pelo tronco foi discutida por Helvey e Patric (1965) e descrita por vários autores (PARK, CAMERON, 2008). No Brasil,

temos como exemplo Nalon e Vellardi (1992), que, ao elaborar regressões lineares para os diferentes processos hidrológicos que ocorrem na Mata Atlântica, em Cubatão, obtiveram coeficiente de determinação acima de 95% nas regressões de transprecipitação e precipitação efetiva, enquanto a relação entre volume de escoamento pelo tronco em função do volume total de chuva foi de 68%. Lima (1976), ao elaborar a regressão linear para estimar o escoamento pelo tronco em função da chuva em plantios de *Eucalyptus* e *Pinus*, aos 6 anos de idade, em Piracicaba, observou que a variação da chuva respondia por cerca de 79% e 37% da variação do escoamento pelo tronco nos plantios de *E. saligna* e *P. caribaea*, respectivamente, enquanto nas regressões de precipitação efetiva e transprecipitação os coeficientes de determinação sempre foram superiores a 98%. Esse autor concluiu, portanto, que há necessidade de considerar outros fatores, além da chuva, que podem alterar os valores de escoamento pelo tronco.

Assim, a equação obtida para uma árvore não pode ser aplicada a outra, devido a variações de tamanho e morfologia, a menos que se utilize(m) variável(is) adicional(is) que possam melhorar a previsibilidade. Os atributos frequentemente citados são a área de projeção da copa (FORD; DEANS, 1978; ABOAL et al., 1999b); textura da casca (HERWITZ, 1985; LEVIA; HERWITZ, 2005; STAN II; LEVIA Jr., 2010; STEINBUCK, 2002; TOBÓN MARIN BOUTEN; SEVINK, 2000) e arquitetura dos ramos (NAVAR, 1993; FORD; DEANS, 1978; STEINBUCK, 2002).

Se analisadas em conjunto todas as árvores amostradas, a eficácia da copa em captar água da chuva e canalizar pelo tronco aumentou logarithmicamente com o aumento do volume de chuva, com inclinação da curva acentuada até aproximadamente 60 mm. Resultado similar obteve Aboal et al. (1999b), estudando cinco espécies de árvores em floresta de louros no Tenerife, Ilhas Canárias, sendo que os valores da chuva para estabilização do $Et_{i\%}$ e o $Et_{i\%}$ após estabilização, variaram em função da espécie estudada. Por outro lado, em árvores dominantes de *Stewartia monadelphica*, em floresta mista de coníferas e folhosas no Japão, valores da chuva para estabilização do $Et_{i\%}$ e os próprios valores de $Et_{i\%}$ variaram em função da presença ou ausência de folhas (LIANG; KOSUGI; MIZUYAMA, 2009b). Considerando $Et_{i\%}$ como um índice de afunilamento, resultado semelhante obtiveram Návar (1993) no México e Li et al. (2009) na China, ambos os estudos tratando de arbustos, com aumento logarítmico da taxa de afunilamento em função do volume de chuva até atingir estabilidade com volume de chuva de aproximadamente 20 mm. O aumento do afunilamento em função do volume de chuva documentado por Wang et al. (2011), em arbustos da região desértica da

China, foi linear, mas o volume máximo de chuva registrado por esses autores não chegou a 20 mm.

O aumento de eficiência na captação da chuva ocorre em função do preenchimento da capacidade de armazenamento da parte aérea da árvore. A drenagem do excesso de água ocorre à medida que os espaços entre as folhas, cavidades e sulcos são preenchidos. Se a chuva cessar, a água armazenada será evaporada e diminuirá a eficiência da captação e, portanto a proporção de escoamento pelo tronco. Se a chuva continuar até que toda a capacidade de armazenamento seja preenchida, a drenagem se torna igual à chuva e, a partir deste ponto, a eficiência do escoamento pelo tronco atinge o máximo e se torna constante. Pelo observado na EEcA, chuvas com volume abaixo de 60 mm não são suficientes para preencher a capacidade de armazenamento da parte aérea das árvores e, após preenchimento da capacidade de armazenamento, a eficiência de captação da água pela copa tem valor de aproximadamente 2,6%, valor este próximo ao terceiro quartil do conjunto de valores medidos na EEcA.

4.3 Escoamento pelo tronco em função do porte da árvore

Em síntese, o volume de água que escoar pelo tronco da árvore (C_{Et}) está diretamente relacionado ao porte do indivíduo. Árvores maiores recebem maior quantidade de água, portanto têm maior C_{Et} (produzem mais E_{tL}) em comparação com árvores menores, sob igual volume de chuva, desde que atingidas as suas capacidades de armazenamento de água pela parte aérea (HOFHANS et al., 2012). Em comunidade vegetal de região semi-árida do México, Carlyle-Moses (2004) verificou correlação moderada entre volume de escoamento pelo tronco e o produto entre a área basal e o volume total de chuva e utilizou essa relação para estimativa da taxa de escoamento pelo tronco da parcela. Ford e Deans (1978), estudando a repartição da água de chuva em função da estrutura da copa sob plantio de *Picea sitchensis* de 14 anos na Inglaterra, determinaram que o volume do escoamento pelo tronco correlacionou-se positivamente com a área de projeção da copa em 41 das 47 semanas de observações.

Entre todas as variáveis que representam dimensões da árvore, as que exercem influência maior sobre o C_{Et} são as que se relacionam à superfície de captação da água da chuva. Árvores mais altas, cujas copas se sobressaem no dossel, e com maiores volumes de

copa, canalizam mais água de chuva para seus troncos (ABOAL et al., 1999b; LIANG; KOSUGI; MIZUYAMA, 2009b).

As dimensões do tronco, por sua vez, têm menor valor preditivo para o volume de água da chuva que escoar pela sua superfície. Apesar da área de projeção da copa ser correlacionada com o DAP e com a área basal, as correlações dessas duas variáveis com o C_{Et} foram baixas. Embora o uso de ambas as variáveis como preditoras para estimar o volume do escoamento pelo tronco da comunidade seja frequente (ABOAL et al., 1999b; DIETZ et al., 2006; CARLYLE-MOSES, 2004; HANCHI; RAPP, 1997; JORDAN; HEUVELDOP, 1981; KRÄMER; HÖLSCHER, 2009; OLIVEIRA et al., 2008; PARK; HATTORI, 2002; VERNINMEN et al., 2007), são raros os autores que explicitam os valores dos coeficientes de determinação das regressões entre o DAP e o volume de escoamento pelo tronco. Os valores dos coeficientes de determinação das regressões entre o DAP e o volume de escoamento apresentados por Dietz et al. (2006), em floresta pluvial tropical na Tailândia com diferentes manejos, foram inferiores a 0,6.

Porém, se analisada a eficiência da árvore em canalizar água para a base do tronco, avaliada pela porcentagem da água da chuva que cai sobre sua copa ($Et_i\%$), verificamos que, quanto maior a árvore, menor a sua eficiência em canalizar água pelo tronco. Esse resultado também foi registrado por Návar (2011), que observou que árvores de pequeno porte da comunidade vegetal de região semi-árida de Tamaulipan, México, geraram maior quantidade de água por unidade de projeção de copa, enquanto espécies de floresta mista de coníferas e folhosas, de maior porte, geraram maiores volume de escoamento pelo tronco. Dentro de uma mesma espécie, Návar (2011) encontrou correlação significativa entre $Et_i\%$ e área de projeção da copa e DAP, com diminuição de eficiência de captação conforme aumentou o diâmetro e a área de projeção da copa.

Dentre as variáveis representativas do porte da árvore, foi a amplitude da copa que mais influenciou negativamente a eficiência da captação da água da chuva pela copa $Et_i\%$. Ou seja, quanto mais compacta a copa, mais eficiente será a árvore em canalizar água pelo tronco. São frequentes as referências a árvores pequenas, de subosque, que transferem relativamente mais água para o solo pelo tronco, se comparadas às árvores dominantes emergentes (JORDAN, 1978; LLOYD; MARQUES FILHO, 1988; GERMER; ELSNBEER; MORAES, 2006). Em geral, os autores consideram que árvores pequenas recebem o gotejamento da água transprecipitada por exemplares do dossel superior e, pela arquitetura dos ramos e textura da casca, têm facilidade em canalizar para o tronco. Na verdade, mesmo que árvores do subosque estejam sob pontos de gotejamento, a quantidade de chuva que chega ao seu dossel é

geralmente inferior à das árvores dominantes, devido ao processo de interceptação (POPPENBORG; HÖLSCHER, 2009). Assim, a maior eficiência de captação de árvores pequenas e de copa compacta provavelmente se deve mais à arquitetura da árvore, a não ser que ela esteja situada em borda de clareira, recebendo integralmente a água da chuva, acrescida do gotejamento da extremidade dos ramos das árvores dominantes.

HERWITZ (1985), após determinar a capacidade de armazenamento da água pela copa e casca de árvores jovens de cinco espécies florestais australianas em laboratório e em campo, concluiu que tanto maior é a capacidade de armazenar água quanto maior for a copa e tronco. Porém a altura equivalente de água Et_{mm} retida pode ser maior em árvores com área de projeção da copa pequena. Árvores com menor capacidade de armazenamento iniciam rapidamente a drenagem do excedente, resultando em maior produção de escoamento pelo tronco. Árvores grandes, maduras, muitas vezes têm arquitetura com grande ângulo de inserção dos ramos no tronco e ramos longos com extremidade inclinada no sentido do solo, que não favorecem o direcionamento da água dos ramos em direção ao tronco (FORD; DEANS, 1978). Além disso, a presença de musgos, líquens e cipós, que aumentam a capacidade de armazenamento da água no tronco (PYPKER; BOND; UNSWORTH, 2004), é mais frequente em árvores de maior porte.

Apesar de inúmeras evidências sobre a existência da relação entre as variáveis de estrutura da vegetação e a repartição da água da chuva, a comparação do escoamento pelo tronco entre comunidades vegetais de características muito distintas levou Llorens e Domingo (2007) a concluir que não há relação entre o escoamento pelo tronco da comunidade e a sua densidade de árvores, DAP, idade, altura e área basal. Esses autores detectaram correlação entre o aumento da proporção do escoamento pelo tronco e o aumento do índice de área foliar, mas a relação não foi significativa. Garcia-Estringana, Alonso-Blázquez e Alegre (2010), após estudarem nove plantas jovens do mediterrâneo, concluíram que a capacidade de armazenamento de água pela copa depende menos de características silviculturais e mais de características anatômicas das árvores, sendo estas de difícil quantificação, como hidrofobicidade, rugosidade de folhas e caule, pubescência, ou ângulo de inserção de folhas, ramos ou pecíolos.

4.4 Escoamento pelo tronco em função dos atributos funcionais

A eficiência das árvores em canalizar a água da chuva pelo tronco ($Et_i\%$) é influenciada por uma série de atributos funcionais. Neste estudo, as árvores de crescimento monopodial, tronco ereto e não tortuoso foram mais eficazes para captar e canalizar a água da chuva. As árvores menos eficazes foram as de crescimento simpodial, tronco inclinado e tortuoso. O número de ramos e o volume de casca influenciaram negativamente e as variáveis densidade da copa, ângulo de inserção dos ramos, tipo e espessura de casca não influenciaram de forma significativa no $Et_i\%$.

Crescimento monopodial, tronco ereto e não tortuoso agem no sentido de diminuir a dispersão da água, evitando gotejamento pelos ramos e tronco, encaminhando-a diretamente para a base da árvore. De fato, há registros de grande volume de escoamento pelo tronco captado por palmáceas (GERMER; WERTHER; ELSENBEEER, 2010; LLOYD; MARQUES FILHO, 1988; TOBÓN MARIN; BOUTEN; SEVINK, 2000), que têm crescimento monopodial e troncos normalmente eretos e retos. Em floresta pluvial da Amazônia colombiana, quatro palmáceas foram responsáveis por 43% do volume de escoamento pelo tronco produzido por 15 indivíduos (TOBÓN MARIN; BOUTEN; SEVINK, 2000). Na floresta pluvial de terra firme próxima a Manaus, Amazonas, uma palmácea produziu 56% do volume de escoamento pelo tronco coletado em 19 indivíduos (LLOYD; MARQUES, 1988) e em floresta pluvial aberta de Rondônia, Germer, Werther e Elsenbeer (2010) alertaram para a possibilidade de subestimativa do escoamento pelo tronco devido à amostragem, que deve necessariamente incluir palmáceas e indivíduos jovens. Árvores jovens contribuem individualmente com pequena proporção de água, devido à pequena dimensão, mas, em conjunto, somariam grande volume de água devido à presença em grande quantidade em alguns ambientes.

O aumento do número de ramos implica, de um lado, em aumento de área de captação, o que poderia aumentar a quantidade de escoamento pelo tronco. Por outro lado, aumenta a capacidade de armazenamento de água pela parte aérea da árvore, o que pode ocasionar maior perda de água por evaporação e menos escoamento pelo tronco (PARK; CAMERON, 2008). O balanço entre o aumento de captação e perda por evaporação determina a quantidade de água que escorrerá pelo tronco. A relação negativa entre número de ramos e eficiência de captação de água detectada na EECa pode ser indicação de que, neste local, a influência do aumento do número de ramos nas árvores resulta em aumento da capacidade de armazenamento de água pela copa. Mas a correlação inversa entre o escoamento pelo tronco $Et_i\%$, número de ramos e volume de casca pode ser explicada, simplesmente, porque tais

variáveis são diretamente relacionadas ao porte do indivíduo que, por sua vez, influencia negativamente a eficiência do tronco para escoar a água.

A relação entre textura da casca e volume de água escoada pelo tronco foi registrada por vários autores (HORTON, 1919; LEVIA; HERWITZ, 2005; STAN II; LEVIA Jr., 2010; STEINBUCK, 2002; TOBÓN MARIN; BOUTEN; SEVINK, 2000). Herwitz (1985) determinou a relação existente entre a rugosidade da casca e a capacidade de armazenamento pela copa em árvores jovens de cinco espécies florestais australianas em laboratório e *in situ*. Stan II e Levia Jr (2010), em pesquisa sobre a relação entre o microrelevo da casca e o escoamento pelo tronco em duas espécies de folhosas de região temperada, concluíram que os diferentes microrelevos determinavam as diferenças na quantidade de água escoando pelo tronco. Em regiões tropicais, as árvores têm casca mais grossa em comparação com as árvores de regiões temperadas e, sendo mais frequentes os eventos extremos de chuva, há preenchimento dos sulcos mais profundos. Uma vez que a água aí armazenada não é espargida com facilidade, mesmo quando exposta aos ventos mais fortes, o escoamento pelo tronco é reduzido (HERWITZ, 1985). Lima (1976), quantificando a precipitação efetiva em povoamentos florestais de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus saligna* aos seis anos de idade, observou maior quantidade de escoamento pelo tronco em árvores de *Eucalyptus*, atribuindo esse resultado para a maior rugosidade da casca nas árvores de *Pinus*. Tobón Marin, Bouten e Sevink, (2000) relataram umedecimento vagaroso na base das árvores com textura fibrosa, em quatro ambientes de floresta amazônica colombiana e deduziu que esse fenômeno é devido à alta capacidade de armazenamento de água das árvores com esse tipo de textura da casca.

Para as árvores do Cerrado analisadas neste estudo, não houve correlação entre $Et_i\%$ e espessura da casca. A ausência de correlação da relação entre $Et_i\%$ e espessura da casca pode ser explicada pelos resultados obtidos por Levia e Herwitz (2005). Avaliando a relação entre a morfologia da casca e o volume total de escoamento pelo tronco em três espécies de árvores folhosas de região temperada, esses autores concluíram que a capacidade de armazenamento de água pela casca variou de forma significativa em função da espécie, porém não determinou decisivamente no volume total de água escoada pelo tronco devido a diferenças morfológicas interespecíficas da casca, tais como o padrão de repetição, profundidade e arranjo das fissuras.

Não há consenso sobre a relação entre densidade da copa e $Et_i\%$, na literatura. Há estudos que informam coeficiente angular da regressão entre escoamento pelo tronco em função do volume de chuva maior em períodos nos quais as árvores estão desfolhadas, quando as copas ficariam com menor densidade, em relação à época de árvores com folhas, quando as copas estariam com maior densidade (HELVEY; PATRIC, 1965; HERBST et al., 2008).

Entretanto, os valores de $Et_i\%$ foram maiores durante o período com folhas, em relação ao calculado para o período de desfolhamento, em árvores dominantes de *Stewartia monadelphica*, em floresta mista de folhosas e coníferas, no Japão (LIANG; KOSUGI; MIZUYAMA, 2009b). De forma diversa ao documentado na literatura, neste estudo não verificamos diferença de $Et_i\%$ em função da densidade da copa classificada categoricamente para cada árvore. A grande diversidade morfológica entre as árvores analisadas para outros atributos pode ter minimizado a influência deste atributo. Em espécies de arbustos do Mediterrâneo, diferenças na capacidade de armazenamento de água pela copa em função da sua densidade foram detectadas somente entre exemplares com áreas de copa semelhantes (GARCIA-ESTRINGANA; ALONSO-BLÁZQUEZ; ALEGRE, 2010).

A grande diversidade morfológica entre as árvores analisadas pode explicar também a baixa significância resultante da relação entre $Et_i\%$ e a inclinação dos ramos, pois há na literatura indicações de que a angulação dos ramos pode influenciar de forma positiva a quantidade de água escoada pelo tronco (STEINBUCK, 2002; THOMPSON, 1986).

Oliveira Jr. (2006) avaliou a relação entre algumas características dendrométricas e morfológicas de árvores individuais e o volume de escoamento pelo tronco e concluiu que a existência de valores similares de escoamento pelo tronco em diferentes classes de altura, qualidade do fuste, infestação de cipós, qualidade e iluminação da copa demonstra que o escoamento pelo tronco não pode ser explicado por uma só característica. Krämer e Hölscher (2009) avaliaram a repartição da água da chuva no gradiente de diversidade florestal, na Alemanha, e frisaram as dificuldades em avaliar se as variações observadas são decorrentes de características de certa espécie, da diversidade de espécies ou de outros fatores como práticas de manejo utilizadas. Métodos de regressão múltipla são frequentemente utilizados para análises dessa natureza.

Aboal et al. (1999b), após eliminar colinearidade entre 11 variáveis morfológicas, determinaram que o modelo linear múltiplo com melhor ajuste utilizou as variáveis APC, altura somada de copas acima da árvore amostrada e das árvores adjacentes e textura da casca como variáveis preditoras para o volume anual de escoamento pelo tronco. Esses autores constataram que a variação da APC foi responsável por 2,3 e 2,5 vezes mais variação do volume de água do escoamento pelo tronco em relação às demais variáveis.

Steinbuck (2002) desenvolveu modelos lineares múltiplos para três espécies de árvores na Califórnia, EUA. O modelo que explicou 88% da variação do volume de água escoada pelo tronco indicou que a quantidade de água escoada pelo tronco, em litros, tem relação positiva

com a proporção de galhos com inclinação positiva e com a APC, e relação negativa com a área da superfície do tronco.

Návar (1993) desenvolveu, para arbustos de região semi-árida no México, modelos lineares múltiplos para avaliar a relação entre volume de escoamento pelo tronco e variáveis preditoras, sendo o modelo com melhor coeficiente de determinação aquele com inclusão das variáveis “número de ramos com ângulo superior a 80° em relação ao solo” e “angulação média dos ramos”, demonstrando a importância assumida pelos ramos nesses modelos.

Ensaio com simulação de chuva para identificar a influência de variáveis morfológicas no volume de escoamento pelo tronco em arbustos de *Prosopis glandulosa*, no Texas, levaram a uma regressão múltipla considerando o volume de chuva em milímetros e a circunferência do tronco em centímetros, que explicou 80% da variação do volume do escoamento pelo tronco em mililitros, sendo que a variável “circunferência do tronco” pôde ser substituída pelas variáveis “área de projeção da copa” ou “área foliar” (ambos em cm²) com igual eficiência (THOMPSON, 1986). Sob chuva natural, porém, o valor do coeficiente de determinação diminuiu para 76%, fenômeno atribuído pelos autores à variabilidade dos fatores ambientais sob condições naturais.

A variável preditora “área de projeção da copa” foi citada em três dos quatro modelos, demonstrando a sua importância na captação e geração do escoamento pelo tronco.

4.5 Escoamento pelo tronco das árvores de diferentes espécies do Cerrado

A grande variação entre exemplares de uma mesma espécie resultou em que não existe um padrão específico de eficiência no escoamento de água da chuva pelo tronco ($Et_i\%$) para árvores do Cerrado. O valor de $Et_i\%$ nas espécies analisadas, de forma geral, foi baixo. Valores baixos também foram relatados por Návar (2011) em *Pinus pseudostrobus* e *Quercus* spp, em floresta temperada mista do norte do México. Espécies arbóreas da região semi-árida de Tamaulipan, ao contrário, apresentaram valores acima de 1%. Entre as espécies consideradas por Návar (2011), todas apresentaram grandes variações intraespecíficas, sendo que o coeficiente de variação foi maior do que 100% em três das oito espécies avaliadas.

Das 16 espécies que constam da Figura 23, somente uma espécie (*P. obovata*) apresentou valor mediano (10,4%) superior ao valor mediano de $Et_i\%$ apresentado na literatura (3,9%) (Tabela 3, página 18). O valor mediano de todas as demais espécies analisadas foi inferior a 2,7%.

O maior valor de $Et_i\%$ registrado neste estudo correspondeu a um exemplar de *Machaerium acutifolium* (26,1%). Entretanto, dos seis exemplares desta espécie, somente um exemplar alcançou valor superior a 0,6%, demonstrando que o alto $Et_i\%$ não é característica inerente à espécie. Por outro lado, dos quatro exemplares amostrados de *Pera obovata*, dois apresentaram o segundo e o terceiro maiores valores de $Et_i\%$ entre todos os 129 exemplares amostrados, sendo esses exemplares os menores da espécie. Quando jovens, exemplares de *P. obovata* têm crescimento monopodial, ramos ascendentes e copa compacta, o que pode ter conferido à espécie alto valor de $Et_i\%$ nesta etapa do desenvolvimento.

A espécie *Ocotea corymbosa* foi representada por 28 exemplares, cuja amplitude de DAP compreendeu desde exemplares pequenos até um dos maiores exemplares amostrados, de forma que é possível considerar os valores de $Et_i\%$ aqui obtidos como representativos da população. O valor $Et_i\%$ mediano dessa espécie foi de 0,9%, portanto próximo aos menores valores representados na literatura e apresentados na Tabela 3 (página 18), indicando baixa eficiência para captação de água da chuva e drenagem pelo tronco.

A espécie *Tapirira guianensis* foi representada por três exemplares, com DAP variando de pequeno (7 cm) a médio (17 cm) e valores de $Et_i\%$ que variaram de 2,3 a 3,8%, portanto, altos, em comparação às demais espécies deste estudo. Trata-se de uma espécie que, em plantio puro, localizado em Assis, apresentou valor de interceptação da chuva semelhante ao plantio de *Pinus elliottii* (GENOVA, HONDA; DURIGAN, 2007). Apesar desta característica, que a desabonaria como espécie facilitadora (PADILLA; PUGNAIRE, 2006), sob a sua copa foi registrado grande número de regenerantes (SANTOS; MELO; DURIGAN, 2007), o que pode ser atribuído à sua eficiência relativamente alta em captar a água da chuva e direcioná-la ao solo pelo tronco.

A espécie *Eriotheca gracilipes* apresentou o quinto maior valor mediano de $Et_i\%$. A espécie foi representada por seis exemplares com DAP e altura total relativamente baixos (5 a 10 cm de DAP e 3 a 4 m de altura). O $Et_i\%$ foi superior a 1% em quatro exemplares, o que a classifica como uma espécie relativamente eficiente em relação às demais espécies quantificadas na EECa. Em estudo sobre a relação raiz e parte aérea (DURIGAN; MELO; BREWER, 2012), foi constatada, nos três exemplares dessa espécie, raiz única, grossa e

profunda, provavelmente para reserva de água e nutrientes. No mesmo estudo, *Tapirira guianensis* foi a espécie que apresentou maior extensão lateral de raiz (12 m de extensão).

Krämer e Hölscher (2009) concluíram, após estudo de repartição da água da chuva entre comunidades vegetais com gradiente de diversidade de espécies, na Alemanha Central, de que não é a composição em espécies que determina a proporção dos diferentes processos de repartição, mas as características estruturais da comunidade considerada. Entretanto, as espécies que constituem a comunidade podem ter atributos funcionais que determinariam maior ou menor eficiência na captação da água da chuva e direcionamento dessa água para o tronco. Uma comunidade vegetal com composição florística semelhante à da parcela 29, com alta densidade de *Tapirira guianensis*, resulta em menor taxa de transprecipitação (Capítulo 1), porém com mais água direcionada ao solo em pontos localizados ao redor dos troncos dessa espécie, podendo modificar não somente a dinâmica da regeneração dessa comunidade (MORO et al., 1997a, b; PADILLA; PUGNAIRE, 2006), mas também as propriedades físicas e químicas do solo (BOETTCHER; KALISZ, 1990; SASSA; HASEGAWA, 1992; WHITFORD; ANDERSON; RICE, 1997; ZINKE, 1962) e a sua dinâmica hídrica (LI et al., 2009; LIANG; KOSUGI; MIZUYAMA, 2009a; SCHWÄRZEL; EBERMANN; SCHALLING, 2012; WANG et al., 2011).

4.6 Importância do escoamento pelo tronco para árvores individuais

Ao canalizar maior volume de água para sua base, em comparação com outras árvores da comunidade, um indivíduo cria um microhabitat em que a profundidade do solo que é umedecida em um evento chuvoso pequeno a médio será maior junto ao seu tronco do que na área como um todo. De fato, são abundantes na literatura relatos de aumento da quantidade de água na base da árvore devido ao grande volume do escoamento pelo tronco. Considerando somente a área ocupada pelo tronco, Wang et al. (2011) relataram que, sob arbustos de *C. korshinskii*, em região desértica da China, houve aumento de 6,4 a 168 vezes de volume de água chegando ao solo pelo tronco, em comparação com área equivalente sem vegetação. Também em área desértica da China, arbustos de *S. psammophila* e *H. scoparium*, aumentaram em média o volume de chuva a alcançar o solo em 78 e 49 vezes,

respectivamente (LI et al., 2009). As mudanças das características do solo próximas ao tronco das árvores (BOETTCHER; KALISZ, 1997) pode ser decorrente deste processo.

Aboal et al. (1999b) calcularam que a quantidade de água que se infiltra ao redor de árvores, nas Ilhas Canárias, pode ser quase 13 vezes maior em comparação com áreas adjacentes. Návar (2011) estima que o acréscimo de água infiltrado ao redor do tronco de árvores de floresta temperada e árvores de região semi-árida seja de, respectivamente, 2 a 7 vezes em relação a áreas sem árvores. Variados métodos têm sido utilizados para monitorar a quantidade, velocidade e alcance da água do escoamento pelo tronco após alcançar o solo (LI et al., 2009; LIANG; KOSUGI; MIZUYAMA, 2009a; SCHWÄRZEL; EBERMANN; SCHALLING, 2012; WANG et al., 2011). Em todos os estudos houve constatação de grande volume de água infiltrada em região adjacente ao tronco, alcançando regiões profundas do solo e grande distância horizontal a jusante, quando a árvore se encontra em vertente inclinada com camada de impedimento na subsuperfície. Houve constatação da importante função desempenhada pelas raízes, vivas ou mortas, que canalizam e direcionam a água do escoamento pelo tronco em caminhos preferenciais através do solo e podem, assim, iniciar a resposta hidrológica da bacia hidrográfica ao evento chuvoso (SCHWÄRZEL; EBERMANN; SCHALLING, 2012).

No caso do Cerrado, cujo relevo é geralmente plano, e o solo possui alta condutividade hidráulica (ASSIS, 2010), é pouco provável a ocorrência de escoamento superficial e há infiltração de toda a água do escoamento pelo tronco ao redor da base da árvore. A percolação vertical dessa água ao longo do perfil do solo pode beneficiar a própria árvore que originou o fluxo, desde que ela tenha a capacidade de explorar esta fonte de água nas camadas mais profundas. Como resultado, a profundidade do perfil do solo que pode ser umedecida após um evento chuvoso deve ser maior quando está sob uma árvore com grande eficiência em captar e escoar a água da chuva pelo tronco, se comparada a uma outra árvore de baixo $Et_i\%$.

A partir dessas observações é possível hipotetizar que árvores com baixo $Et_i\%$ tenham sistema radicular distribuído próximo à superfície, enquanto árvores com alto $Et_i\%$ podem aprofundar suas raízes junto ao tronco, onde haverá água disponível em maiores profundidades, em comparação com as áreas adjacentes (esta hipótese é representada no diagrama da Figura 24).

Figura 24 Diagrama hipotético das relações prováveis entre $Et_i\%$ e a umidade no perfil do solo sob árvores com eficiência de captação da água da chuva alta (A) e baixa (B).

5 CONCLUSÕES

Embora corresponda a uma pequena fração do balanço hídrico, a água que escoar pelos troncos desempenha importante função ecológica, ao se concentrar em uma pequena área adjacente à base das árvores, infiltrar e percolar verticalmente ao longo do perfil. A facilidade em captar e escoar a água da chuva pelo tronco varia em função de atributos da árvore, sendo que árvores mais altas e com copa volumosa escoam maior quantidade, enquanto árvores de crescimento monopodial, tronco ereto e reto e copa compacta têm maior eficiência de captação.

O espectro de $Et_i\%$ obtido para as árvores do Cerrado estudadas variou desde valores muito baixos até o valor máximo obtido na literatura. Esse amplo espectro pode ser reflexo da grande variação de porte, de atributos morfológicos e arquitetura das árvores de Cerrado, que, certamente, tem implicações sobre a diversidade de microhabitats nos ecossistemas estudados.

CAPÍTULO III

REPARTIÇÃO DA ÁGUA DA CHUVA NO GRADIENTE FISIONÔMICO DO CERRADO

1 INTRODUÇÃO

Em regiões temperadas, a repartição da água da chuva é estudada há mais de um século (HORTON, 1919). Nessas regiões, os primeiros modelos preditivos das perdas evaporativas baseados em princípios físicos foram lançados na década de 1970 e sua aplicabilidade vem sendo aprimorada desde então (MUZYLO, 2009). Em regiões tropicais, estudos hidrológicos são mais recentes, sendo concentrados em regiões com florestas (BRUIJNZEEL, 1990; KURAJI; TANAKA, 2003). Nessas regiões, os modelos para predição das perdas por evaporação da água interceptada pelo dossel, desenvolvidos originalmente para condições temperadas, têm mostrado bom desempenho, desde que adaptados às condições ambientais dos trópicos (CALDER; WRIGHT; MURDIYARSO, 1986; LLOYD et al., 1988). Para comunidades vegetais savânicas, os modelos florestais citados, quando adaptados para condições de árvores esparsas, têm gerado resultados satisfatórios (JACKSON, 2000). Entretanto, o caráter sítio-dependente dos parâmetros relativos à comunidade vegetal e a dificuldade em obtê-los continuam a limitar a aplicação destes modelos em ambientes onde são escassas as informações sobre a relação entre os processos hidrológicos e a vegetação.

Sugerimos, no Capítulo 1, o uso da área basal (AB) como variável preditiva da transprecipitação, com resultado satisfatório. Neste capítulo, prosseguimos a modelagem da repartição da água da chuva utilizando a AB da comunidade como preditora do volume de água que escoia pelos troncos das árvores da comunidade (E_t), da precipitação efetiva (P_e) e da interceptação (I), no gradiente de biomassa do Cerrado.

Este capítulo tem, em um primeiro momento, caráter descritivo, ao visar a caracterização da repartição da água da chuva pelos processos de transprecipitação, escoamento pelo tronco e interceptação no gradiente de biomassa. A partir dessa caracterização, buscamos desenvolver modelos preditivos que permitam estimar a contribuição desses processos no gradiente fisionômico do Cerrado.

Uma vez que o mapeamento da vegetação em regiões do Cerrado enquadra trechos do gradiente fisionômico em categorias cartográficas (legendas) distintas, quantificar a proporção da transprecipitação em função da fisionomia pode vir a ser uma ferramenta de grande utilidade para o gerenciamento de recursos hídricos ou para o planejamento de atividades de restauração da comunidade vegetal visando serviços ecossistêmicos. Assim, no presente capítulo, quantificamos também a repartição da água da chuva separadamente para cada fisionomia, além de analisá-la ao longo do gradiente fisionômico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Para este capítulo, utilizamos dados oriundos das 15 parcelas que foram objeto de estudo nos capítulos anteriores.

2.2 Métodos

Estimamos o valor das perdas por interceptação em cada uma das 15 parcelas a partir da regressão obtida no Capítulo 1, e os valores do escoamento pelo tronco obtidos no Capítulo 2. Com esses dados, efetuamos a análise da repartição da água da chuva no gradiente de biomassa e para cada fisionomia, pelos procedimentos apresentados a seguir.

2.2.1 Repartição da água da chuva no gradiente de biomassa

Utilizamos os valores de transprecipitação calculados pela Equação 4 (página 45) das 15 parcelas de 1.000 m², obtidos no Capítulo 1. Na parcela em que a transprecipitação medida foi eliminada por não cumprir os pressupostos da análise de regressão, calculamos o valor faltante utilizando a Equação 4.

Os valores do escoamento pelo tronco nas 15 parcelas de 1.000 m² foram obtidos a partir dos dados de E_{tIL} , apresentados no Capítulo 2, conforme os passos a seguir:

- 1) Calculamos o somatório do escoamento pelo tronco individual (ΣEt_{iL}) de todos os troncos dentro da subparcela (Equação 10) e o somatório das áreas basais individuais (ΣAB_i) das árvores na parcela;
- 2) Calculamos o valor $Et_{subp\ mm}$ dividindo ΣEt_{iL} pela área da subparcela (Equação 11);
- 3) Calculamos a proporção de escoamento pelo tronco da subparcela $Et_{subp\ \%}$ dividindo $Et_{subp\ mm}$ pelo total de volume de chuva (Equação 12);

$$Et_{subp\ L} = \Sigma Et_{iL} \dots\dots\dots (10)$$

$$Et_{subp\ mm} = \Sigma Et_{subp\ L} / A_{subp} \dots\dots\dots (11)$$

$$Et_{p\ \%} = 100\ Et_{subp\ mm} / Pt_{mm} \dots\dots\dots (12)$$

Onde:

$Et_{subp\ L}$: volume do escoamento pelo tronco da subparcela, em litros;

ΣEt_{iL} : somatório do escoamento pelo tronco de todos os indivíduos medidos da subparcela;

$Et_{subp\ mm}$: volume do escoamento pelo tronco da subparcela por unidade de área, em milímetros;

A_{subp} : área da subparcela, 100 m².

$Et_{p\ \%}$: proporção do escoamento pelo tronco na parcela, em porcentagem;

Pt_{mm} : total do volume de chuva para o período de observação, 580,2 mm.

A partir dos valores de ΣAB_i e $Et_{p\ \%}$, utilizando análise de regressão, modelamos a proporção da água da chuva que escoou pelos troncos em função da área basal da comunidade. Os valores extremos foram detectados, por meio da análise da normalidade e dos resíduos da regressão, e eliminados após avaliação da origem das suas discrepâncias.

A partir deste modelo, obtivemos o volume de escoamento pelo tronco para cada uma das 15 parcelas utilizadas para o balanço hídrico.

A proporção da precipitação efetiva $Pe_{p\ \%}$ foi obtida mediante soma dos valores de $Pi_{p\ \%}$ e $Et_{p\ \%}$ (Equação 13) e a interceptação foi obtida a partir da diferença entre o total de chuva (100%) e a $Pe_{p\ \%}$ (Equação 14).

$$Pe_{p\ \%} = Pi_{p\ \%} + Et_{p\ \%} \dots\dots\dots (13)$$

$$I_{p\ \%} = 100 - Pe_{p\ \%} \dots\dots\dots (14)$$

Onde:

- $P_{ip\%}$: proporção de transprecipitação na parcela (Capítulo 1, Equação 4, página 45);
 $P_{ep\%}$: proporção de precipitação efetiva na parcela;
 $I_{p\%}$: proporção de água interceptada na parcela.

O somatório do valor de transprecipitação ($P_{ip\%}$), obtido com a aplicação do modelo de regressão da transprecipitação em função da área basal elaborado no Capítulo 1, com o valor resultante do modelo de regressão do escoamento pelo tronco ($E_{tp\%}$) em função da área basal, forneceu a proporção da precipitação efetiva ($P_{ep\%}$). A diferença entre o total de chuva (100%) e a precipitação efetiva forneceu a quantidade de chuva evaporada pela interceptação (I) em função da área basal da parcela. Com esses valores quantificamos os processos por parcela e elaboramos um gráfico de área, para ilustrar a proporção dos diferentes componentes da repartição da água da chuva em função da área basal da parcela. O gráfico foi utilizado para avaliar a importância relativa dos diferentes processos dentro do contexto do balanço hídrico regional.

2.2.2 *Repartição da água da chuva em cada fisionomia*

A partir dos dados calculados pelo método descrito acima, quantificamos os processos hidrológicos separadamente para as fisionomias cerrado típico, cerrado denso e cerradão.

Após verificar a normalidade e homocedasticidade dos dados por fisionomia, aplicamos a análise de variância e apresentamos os resultados em boxplots.

Para as análises utilizamos o software Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

3 RESULTADOS

3.1 **Repartição da água da chuva no gradiente de biomassa do Cerrado**

A área basal da comunidade variou de 7,5 a 27 m² ha⁻¹ (APÊNDICE C) e, acompanhando essa variação, a transprecipitação variou de 77 a 96% (Figura 25A), o

escoamento pelo tronco variou de 0,5 a 2,6% (Figura 25B) e a interceptação, de 3,6 a 20,4% (Figura 25C). As Equações 15 e 16 representam, respectivamente, os modelos de regressão para o escoamento pelo tronco e para a interceptação, ambos em função da área basal da comunidade vegetal.

Figura 25 Repartição da água da chuva em função da área basal da comunidade na Estação Ecológica de Assis. A) transprecipitação (P_{ip}), B) escoamento pelo tronco (E_{tp}), C) interceptação.

$$Et_p\% = -2,73 + 1,61 \ln(AB) \quad (r^2=0,90; p<0,001) \dots\dots\dots(15)$$

$$I_{\%} = -3,32 + 0,87 AB \quad (r^2=0,724; p<0,001) \dots\dots\dots(16)$$

A precipitação efetiva foi composta, predominantemente, pela transprecipitação (Figura 26).

Figura 26 Proporção da repartição da água da chuva em função da área basal da vegetação de Cerrado na Estação Ecológica de Assis. $I_{\%}$: proporção da água da chuva que é retida pela interceptação; $Et_p\%$: proporção da água da chuva que chega ao solo por escoamento pelo tronco; $Pi_p\%$: proporção da água da chuva que chega ao solo por transprecipitação; $Pe_p\%$ = precipitação efetiva (proporção de água da chuva que atinge o solo).

3.2 Repartição da água da chuva nas diferentes fisionomias do Cerrado

A repartição da água da chuva foi distinta entre as fisionomias. O valor médio ($\pm$ erro padrão) de transprecipitação foi de 95 ($\pm 1,2$)%, 89 ($\pm 0,9$)% e 80 ($\pm 1,1$)%, respectivamente, no cerrado típico, no cerrado denso e no cerradão (FIGRA 27A). A proporção de água escoando pelo tronco foi, em média ($\pm ep$) de 0,7 ($\pm 0,2$)% para o cerrado típico, 1,5 ($\pm 0,1$)% para o cerrado denso e 2,4 ($\pm 0,1$)% para o cerradão, e a interceptação média ($\pm ep$), de 5 (± 1)% para o

cerrado típico, $9 (\pm 0,8)\%$ para o cerrado denso e $18 (\pm 1,0) \%$ para o cerradão (Figuras 27B e 27C).

Separadas as parcelas de diferentes fisionomias, houve diferença para todos os processos considerados ($p < 0,001$).

Figura 27 Repartição da água das chuvas em diferentes fisionomias do Cerrado na Estação Ecológica de Assis. A) transprecipitação; B) escoamento pelo tronco; C) interceptação. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas por Kruskal Wallis ($p < 0,05$).

4 DISCUSSÃO

4.1 Proporção de escoamento pelo tronco das árvores na comunidade

O escoamento pelo tronco das árvores nas diferentes fisionomias do Cerrado, na Estação Ecológica de Assis, correspondeu a uma proporção relativamente pequena dentro da repartição da água das chuvas, conforme largamente conhecido, em várias condições (CARLYLE-MOSES, 2004; FUJIEDA et al., 1997; GASH; STEWART, 1977; GERMER; ELSENBEEER; MORAES, 2006; LEOPOLDO; CONTE 1985; LIMA, 1976; OLIVEIRA et al., 2008; OLIVEIRA Jr.; DIAS, 2005; SOUSA et al. 2011; UBARANA, 1996; VERNIMMEN et al., 2007). Entretanto, são poucos os autores que utilizaram o método mais

indicado para a quantificação do escoamento pelo tronco, ou seja, escolha de uma área representativa e medição em todos os indivíduos (HANCHI; RAPP, 1997). Seja pela dificuldade em quantificar o escoamento pelo tronco em todas as árvores em uma parcela, ou pela dificuldade em definir corretamente a “área representativa”, os autores têm baseado a determinação do escoamento pelo tronco aplicando variados métodos de amostragem e escalonamento, cada qual sujeito a vantagens e falhas (ABOAL et al., 1999b). Assim, é necessário considerar com ressalva os valores de escoamento pelo tronco apresentados na literatura para diferentes comunidades vegetais. A mediana dos valores de escoamento pelo tronco na comunidade vegetal $Et_p\%$ apresentados na Tabela 3 (página 18) foi de 1,6%. Tradicionalmente, são atribuídas menores proporções de escoamento pelo tronco a comunidades vegetais de regiões tropicais (KURAJI; TANAKA, 2003).

Valores de proporção de escoamento pelo tronco da comunidade vegetal obtidos na literatura, no Brasil, variaram de 0,1% até 33,4%, obtidos, respectivamente, por Sousa et al. (2011), em *Araucaria angustifolia* plantada na Serra do Mar, e por Balieiro et al. (2007), em plantio de *Acacia mangium* em Seropédica, RJ.

Os valores medidos em Cunha, SP, em plantio de *Araucaria angustifolia* (SOUZA et al., 2011) e em floresta pluvial tropical secundária (ARCOVA, CICCIO; ROCHA), figuram entre os menores valores mencionados na literatura. Pode-se atribuir esses resultados ao método de seleção dos indivíduos utilizados. Arcova, Cicco e Rocha (2003) amostraram todas as árvores com DAP superior a 10 cm em parcela de 400 m². Nalon e Vellardi (1992) amostraram todas as árvores com DAP superior a 20 cm nas três parcelas estudadas. Sousa et al. (2011) amostraram todas as árvores de *Araucaria angustifolia* com DAP de 9 a 47 cm dentro da parcela de 400 m². Nesses três estudos, a medição foi efetuada em todos os indivíduos, o que afasta a possibilidade de erro no escalonamento. Pelo discutido no Capítulo 2, sabe-se que em árvores pequenas o volume de água escoada pelo tronco, individualmente, é pequeno. Entretanto, a presença de indivíduos jovens em grande quantidade pode totalizar elevado montante de água escoada pelos troncos, montante este que frequentemente é ignorado, uma vez que é usual a amostragem somente de indivíduos maiores (GERMER; WERTHER; ELSENBEER, 2010). Esse pode ser o caso de áreas com vegetação em fase de regeneração, onde a presença de indivíduos jovens em grande número é frequente.

Os valores de proporção de escoamento pelo tronco nas diferentes fisionomias observados no presente estudo variaram entre 0,5% e 2,6%, o que faz com que estejam dentro da faixa de resultados obtidos pelos estudos no Brasil. Ressaltamos o valor apresentado por Leopoldo e Conte (1985), em São Manoel, SP, em vegetação classificada como “cerradão”,

após quantificar todas as árvores em parcela de 201 m². Os autores não especificaram as características dendrométricas das árvores medidas, mas a proporção de escoamento pelo tronco resultou em 2,9%, pouco superior ao valor obtido para cerradão no presente estudo. Os valores de escoamento pelo tronco estimados por Lima (1976), de 3,0 e 4,2%, em plantios de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus saligna* aos 6 anos de idade, respectivamente, são maiores que os obtidos para o Cerrado no presente estudo. Por terem sido quantificados em árvores jovens, cuja arquitetura favoreceria a captação da água pela copa e drenagem pelo tronco e pelas diferenças intrínsecas das espécies, os valores podem ter sido superiores nessas plantações florestais.

4.2 Proporção de precipitação efetiva ($Pe_{\%}$) no gradiente de biomassa do Cerrado

A $Pe_{\%}$ variou de 80 a 96%, ao longo do gradiente cerrado *strictu sensu* – cerrado denso – cerradão, sendo em grande parte composta pela $Pi_{\%}$. Apesar da importância crescente do escoamento pelo tronco dentro da composição da $Pe_{\%}$ conforme houve diminuição de $Pi_{\%}$, a importância relativa do escoamento pelo tronco não passou de 3,2% da composição da $Pe_{\%}$. Assim, não houve efeito compensatório entre $Pi_{p\%}$ e $Et_{p\%}$.

O efeito compensatório entre Pi e Et foi sugerido por Krämer e Hölscher (2009), em estudo sobre efeito do gradiente em espécies na repartição da água da chuva, na Alemanha. Nesse estudo, parcelas dominadas por *Fagus sylvatica* produziram valores intermediários de transprecipitação, mas geraram sempre os maiores valores de escoamento pelo tronco, de forma a aparentar efeito nivelador entre a transprecipitação e o escoamento pelo tronco, resultando em valores de precipitação efetiva semelhantes entre as parcelas estudadas.

No gradiente fisionômico de Cerrado que foi objeto deste estudo, o aumento de $Et_{p\%}$ não foi proporcional à diminuição de $Pi_{p\%}$ a ponto de nivelar a entrada de água ao solo no gradiente de biomassa. Dessa forma, podemos afirmar que a quantidade de água que alcança o solo, no gradiente fisionômico entre o cerrado típico e o cerradão, é governada pela transprecipitação.

4.3 Proporção de interceptação ($I_{\%}$) no gradiente de biomassa do Cerrado

Valores de interceptação mencionados na literatura (Tabela 1, página 7) variaram desde virtualmente zero, em área sob regime agroflorestal, na Indonésia, com área basal de $8,6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ (DIETZ et al., 2006), até 53%, também na Indonésia, sob floresta pluvial tropical natural, com área basal de $69 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ (DIETZ et al., 2006). No Brasil, os valores mínimo e máximo já mencionados foram ambos registrados em floresta pluvial tropical amazônica, sendo de, respectivamente, 5% (JORDAN; HEUVELDOP, 1981) e 20% (FRANKEN et al., 1982).

Em estudo comparativo da transprecipitação sob diferentes modelos de plantio de mata ciliar, Genova, Honda e Durigan (2007) obtiveram, na região de Assis, valores de transprecipitação entre 69 e 88%.

Lima e Nicolielo (1983) quantificaram a transprecipitação em cerradão e em plantio de *Pinus oocarpa* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, obtendo valores de transprecipitação de 73% para a cerradão e de 88% para as florestas de *Pinus*, respectivamente. Como não houve quantificação do escoamento pelo tronco nesse estudo, os autores estimaram que os valores de interceptação seriam de 27% e 12%, respectivamente, para a reserva de cerradão e para os plantios. A interceptação calculada por Leopoldo e Conte (1985) em vegetação com características típicas de cerradão, em Agudos, SP, foi de 17%.

A proporção de água que evaporou sem alcançar o solo no gradiente de biomassa que foi objeto deste estudo, variou de 4 a 20%. O valor mínimo observado, portanto, foi maior somente em relação ao cultivo agroflorestal da Indonésia, com área basal de $8,6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ (DIETZ et al., 2006). O valor máximo foi próximo ao determinado por Leopoldo e Conte (1985) em Agudos e equivalente ao valor máximo obtido mediante quantificação de transprecipitação e escoamento pelo tronco em floresta pluvial tropical amazônica (FRANKEN et al., 1982), mas inferior ao estimado por Lima e Nicolielo (1983) para cerradão.

É possível, portanto, estimar pelo modelo representado pela Equação 16, linear e com bom coeficiente de determinação, a quantidade de água das chuvas que evapora das copas na vegetação de Cerrado ou comunidades vegetais com estrutura semelhante, a partir da obtenção da área basal da comunidade e dos dados de precipitação pluviométrica anual de qualquer localidade, desde que a área basal da comunidade vegetal esteja entre $7,5$ e $27 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$.

4.4 A água da chuva que chega ao solo nas diferentes fisionomias do Cerrado

Apesar da variação de biomassa formar um continuum no Cerrado, a divisão em fisionomias é usual especialmente em mapeamento da vegetação, em que os trechos do gradiente são tratados como categorias cartográficas distintas (legendas). Verificamos ampla diferença entre as parcelas ocupadas por diferentes fisionomias, uma vez que havia grandes diferenças estruturais entre elas. As parcelas com fisionomia classificada como cerrado típico apresentaram os maiores valores médios de transprecipitação, que corresponderam a 95% da precipitação total a céu aberto no período de estudo. Grande parte dos valores intermediários foram obtidos nas parcelas de cerrado denso, com $Pi_{\%}$ médio de 89%. Os menores valores foram registrados nas parcelas de cerradão, com $Pi_{\%}$ médio de 80%. Assim, na região do presente estudo, onde a precipitação total anual é de 1.400 mm (Capítulo Introdutório, p. 31), há entrada de água em forma difusa de 1.330 mm, 1.250 mm e 1.120 mm, respectivamente, em solo sob as fisionomias cerrado típico, cerrado denso e cerradão. A diferença entre a entrada de água sob a fisionomia mais densa e a fisionomia menos densa seria de 210 mm, correspondente a 15% do volume total de chuva medida no período.

No caso da Estação Ecológica de Assis, cuja vegetação vem passando por um adensamento fisionômico desde 1959, quando passou a ser protegida contra incêndios e pastoreio (PINHEIRO; DURIGAN, 2009), é possível estimar as consequências do adensamento sobre a entrada de água. Com base na proporção da transprecipitação que ocorre em cada fisionomia e na área ocupada por cada fisionomia em 1962 e em 2006 (Figura 28) (PINHEIRO; DURIGAN, 2009), e considerando a área total de 1.312 ha e precipitação média histórica anual de 1.400 mm, estimamos que houve redução de 1.579.883 m³ (125 mm) de água da chuva chegando, de forma difusa, ao solo da unidade de conservação por ano, com fortes implicações sobre a produção de água, que é um dos principais objetivos conservacionistas da Estação Ecológica de Assis. A redução do volume corresponde ao consumo anual de água de 21.600 habitantes, ou seja, 20 % da população de Assis.

Figura 28 Adensamento na vegetação da EECa de 1962 a 2006 (Pinheiro e Durigan, 2009).

Esta análise pode conduzir a números alarmantes se considerada apenas a água excedente, ou seja, acima da evapotranspiração. Por não dispormos da evapotranspiração real para o Cerrado de Assis, utilizaremos o balanço hídrico do município de Cândido Mota, cidade distante de Assis cerca de 20 km, do período entre 1941 e 1970 (EMBRAPA, 2013). Para essa localidade, o valor fornecido de evapotranspiração potencial, é de aproximadamente 1.100 mm. A diferença entre o volume anual de chuva e a evapotranspiração potencial é de 300 mm, valor da quantidade mínima suposta de água que reabastece os aquíferos superficiais e subterrâneos a cada ano. Esta quantidade provavelmente é maior, pois a evapotranspiração real é geralmente inferior à potencial, a menos que haja entrada adicional de energia no sistema, o que muitas vezes é proporcionado pelo aumento da rugosidade aerodinâmica quando a vegetação se torna mais alta (MONTEITH, 1973; CALDER, 1998).

A redução de 125 mm na chegada de água ao solo entre 1962 e 2006 correspondeu à redução, em 41%, no volume mínimo de água da chuva que abasteceu os aquíferos superficiais e subterrâneos da EECa, no último ano em relação ao primeiro. Considerando o avanço do adensamento, até que as formas mais densas (cerradão e mata ciliar) passem a ocupar 99,2% da área, a estimativa para a redução da produção hídrica passa a ser de 1.764.800 m³ (140 mm).

A diminuição da quantidade de água que alcança o solo, decorrente do aumento da perda pela interceptação, ocasionada pelo adensamento da vegetação pode implicar, portanto, em diminuição da recarga da água do solo e comprometimento de um dos mais importantes serviços ambientais da Estação Ecológica de Assis para a comunidade local, a produção hídrica.

O adensamento da vegetação savânica tem sido registrado por vários autores, em diferentes regiões do mundo, (ARCHER, 1995; CARDOSO et al., 2009; EDDLEMAN; MILLER, 1991). No Brasil, há relatos da evolução estrutural de fisionomias mais abertas do Cerrado para outras mais fechadas em diferentes regiões (DURIGAN; RATTER, 2006; GOODLAND; FERRI, 1979; RATTER et al., 1988), de forma que deve ter ocorrido diminuição da quantidade de água que chega ao solo ao longo dos anos em todas essas regiões. Por outro lado, a conversão da vegetação original em culturas agrícolas fatalmente acarreta mudanças nas propriedades do solo, o que pode levar a modificações das proporções dos processos hidrológicos. Processos de superfície, como escoamento direto, seriam favorecidos, em detrimento dos processos de infiltração e percolação, resultando em menor recarga de água subterrânea.

Entender, prever e gerenciar as modificações do regime hidrológico de rios em função de mudanças no uso da terra é um dos principais objetos de estudo dos hidrólogos. A cobertura vegetal determina de forma decisiva a repartição da água da chuva que chega à superfície terrestre, sendo que ocorre tanto o aumento da produção hídrica em função da supressão da cobertura florestal e substituição por outros usos (BOSCH; HEWLETT, 1982), quanto a diminuição de deflúvio em função do adensamento da vegetação (BROWN et al., 2005; CORNISH; VERTESSY, 2001). Se, por um lado, há situações em que a diminuição da transprecipitação é desejada (FORD; DEANS, 1978; MITCHELL et al., 2009), por outro lado, o seu aumento pode acarretar conflitos de uso da água, com a redução da oferta hídrica (JACKSON et al., 2005) ou até impactos na regeneração de espécies vegetais, chegando a afetar a biodiversidade local (EDDLEMAN; MILLER, 1991; WELTZIN; MCPHERSON, 2000). Nesses casos, o controle de biomassa é indicado como método eficaz para o gerenciamento de recursos hídricos, tanto superficiais como subsuperficiais (BALL; TAYLOR, 2003; COUTINHO, 1990).

5 CONCLUSÕES

No gradiente de biomassa da Estação Ecológica de Assis, a proporção de água que chega ao solo em forma de escoamento pelo tronco é crescente e previsível em função do aumento da área basal da comunidade, mas a sua proporção como componente do balanço hídrico continua pequena, de forma que a proporção de água que efetivamente alcança o solo é governada pela transprecipitação, que é linear e negativamente relacionada ao aumento de biomassa do Cerrado.

O agrupamento das parcelas em diferentes fisionomias resultou em diferenças significativas nas taxas de precipitação efetiva e interceptação, indicando que elas devem ser caracterizadas hidrologicamente como ambientes distintos, onde há gradação na quantidade de água que chega ao solo em função do gradiente de biomassa. A transição é crescente e contínua em entrada de água ao solo, desde as comunidades menos densas (cerrado típico) até as comunidades mais densas (cerradão). É como se no cerradão a precipitação fosse menor e isso pode exercer influência negativa sobre a regeneração das espécies vegetais, especialmente em eventos chuvosos pouco volumosos na estação seca. Entretanto, as consequências mais relevantes podem estar relacionadas com a recarga dos aquíferos, uma vez que o adensamento da vegetação do Cerrado que vem ocorrendo em muitas regiões leva à redução do volume de água da chuva que atinge o solo pode infiltrar e reabastecer as reservas subterrâneas.

CAPÍTULO IV

A UMIDADE DO SOLO NO GRADIENTE DE BIOMASSA DO CERRADO

1. INTRODUÇÃO

Entre os fatores que influenciam a distribuição da vegetação do Cerrado, o solo tem importância primordial, pois dele depende a disponibilidade de nutrientes e água, que, por sua vez, definirá a variação florística da comunidade vegetal, a ponto de ser possível determinar, em função das características do solo em determinada região climática, qual é a fisionomia vegetal que poderá ser sustentada por ela (ROSSI et al., 2005). Estudos recentes têm apontado a disponibilidade hídrica do solo como um dos fatores decisivos para o estabelecimento das diferentes fisionomias do Cerrado (ASSIS et al., 2011; ROSSI et al., 2005). Segundo esses estudos, se as fisionomias mais densas necessitam de mais água para seu estabelecimento e manutenção, é o solo o agente controlador do período de déficit hídrico anual, em função da sua capacidade de armazenamento e liberação de água. Em última análise, é a quantidade de água disponível que determina a biomassa da vegetação.

No Capítulo 1 demonstramos que, pelo fato da vegetação estar presente, há redução da água que chega ao solo, sendo menor a entrada de água quanto mais densa for a vegetação. A diminuição da água por perda evaporativa é, em uma pequena proporção, compensada pelo escoamento pelo tronco, que é maior quanto maior a biomassa. Na Estação Ecológica de Assis (EEcA), o escoamento pelo tronco pode atingir, individualmente, grande volume de água (Capítulo 2), mas não chega a ter volume suficiente para contrabalançar as perdas evaporativas (interceptação) que ocorrem durante e logo após as chuvas (Capítulo 3). Dessa forma, na EEcA, a quantidade de água que chega ao solo é governada, predominantemente, pela transprecipitação. Se o aumento da biomassa da vegetação leva à diminuição da quantidade de água que chega ao solo, é possível que haja influência dessa biomassa na umidade do solo, de forma que esta seria decrescente em função do aumento daquela. A mesma hipótese pode ser levantada partindo-se da premissa de que as perdas evaporativas (interceptação e transpiração) são maiores à medida que aumenta a biomassa, o que levaria o solo das fisionomias menos densas a ter mais umidade. Quando localizados sob formações

vegetais com diferenças em biomassa, solos com propriedades físicas iguais demonstram padrões de marcha anual de umidade semelhante. Porém, o conteúdo volumétrico de água nem sempre é igual (BRUNO, 2009; LIMA; FREIRE, 1976; LIMA; NICOLIELO, 1981; ZAKIA, 1987), o que pode ser decorrente de diferenças nas entradas de água (precipitação efetiva, ascensão capilar) ou nas saídas (drenagem, transpiração).

Segundo Walter (1986), numa área floristicamente uniforme, a estrutura da vegetação é determinada pelo ambiente e principalmente pelo clima e solo. No Cerrado, a pluviosidade assegura disponibilidade de água para o estrato arbustivo-arbóreo durante todo o ano para espécies de maior porte e raízes mais profundas (CAMARGO, 1963; ADÁMOLI et al., 1987). Assim, o Cerrado brasileiro é classificado como savana edáfica, cujas características dependeriam dos fatores inerentes ao solo e não ao clima (WALTER, 1986). Porém, o resultado da análise de correspondência canônica realizada por Ruggiero et al. (2002) entre o gradiente fisionômico existente no local e 15 variáveis caracterizando o solo, na Reserva Pé de Gigante, Santa Rita do Passo Quatro, SP, levou os autores à conclusão de que as variáveis edáficas consideradas explicavam apenas parte da variação, e que alguma variável ambiental importante estaria ausente. Os autores sugeriram que essa variável seria a dinâmica da água do solo. Marimon Jr. e Haridasan (2005) comprovaram que, em áreas adjacentes com fertilidade de solo uniformemente baixa, no leste de Mato Grosso, não é a fertilidade, mas a disponibilidade hídrica do solo que determina a coexistência de cerrado *stricto sensu* e cerradão. Toppa (2004), assim como Rossi et al. (2005), assinalaram as características granulométricas como sendo variáveis ambientais importantes para distinguir o tipo de vegetação que se instala no local. Assis et al. (2011) também concluíram que, não é a variação da fertilidade que define a fisionomia, mas a disponibilidade hídrica do solo, condicionada pelo conteúdo de argila. A vegetação com maior biomassa, o cerradão, está presente em solos com maior teor de argila e microporosidade, o que confere a esses solos maior capacidade de retenção de água. Nos solos mais bem drenados, predomina o cerrado *stricto sensu* (ASSIS et al., 2011; JUHÁSZ et al., 2006; MARIMON; HARIDASAN, 2005). Entretanto, no Capítulo 1 desta tese, comprovamos que fisionomias mais densas têm menor aporte de água. Mesmo sendo a pluviosidade uniforme, há, nessa área, um gradiente no total de água que chega ao solo, o que deve tornar mais complexo o balanço entre os fatores que determinam as fisionomias do Cerrado aí existentes.

A questão a ser respondida, neste capítulo, é: a influência dos atributos da comunidade vegetal na proporção dos processos hidrológicos chegaria a modificar o conteúdo de água do solo? Para responder a essa questão, determinamos a umidade na camada superficial do solo

em diferentes situações após eventos de chuva, no gradiente fisionômico do Cerrado, e analisamos as relações entre a área basal da vegetação e o conteúdo de água do solo. Optamos pela determinação da umidade na camada superficial do solo por serem as variações de umidade mais intensas e frequentes próximo à superfície (BRUNO et al., 2006; FERREIRA, 2006; JUHÁSZ et al. 2006, 2007; LIMA, 1983) e correlacionamos com a área basal, por ser esta variável estrutural da vegetação que mais se correlaciona significativamente com o solo (ASSIS et al., 2008), além das vantagens enumeradas no Capítulo 1 para esta variável preditora (página 38).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Coletamos amostras para determinar a umidade da camada superficial do solo (0-15 cm), nas 15 parcelas de 1.000 m² descritas na Introdução Geral (Figura 2, página 32 e Figura 6, página 34).

Estudos prévios dos perfis do solo adjacente a cada uma das 15 parcelas determinaram solos do tipo Neossolo Quartzarênico Órtico nas parcelas 1, 2, 3 e 5; Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico nas parcelas 7, 8 e 13; Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico húmico nas parcelas 16 e 18; Latossolo Vermelho Distrófico típico nas parcelas 6, 29 e 26; Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico argissólico na parcela 34 e Latossolo Vermelho Distrófico argissólico nas parcelas 32 e 33 (ASSIS, 2010).

2.2 Métodos

Determinamos a umidade do solo em 21 ocasiões, no período entre 01/01/2011 e 31/10/2012, para representar amplo espectro de condições de umidade do solo em função do regime de chuvas, desde a condição imediatamente após evento chuvoso até a condição após ...dias sem chuva.

Coletamos, em cada parcela, uma amostra composta por dez amostras simples, sendo cada amostra simples proveniente de uma subparcela. Realizamos a coleta com uso de trado de copo até a profundidade de 15 cm (EMBRAPA, 2009), sendo as amostras de solo acondicionadas em embalagens plásticas logo após a tradagem e homogeneizadas. A embalagem, por sua vez, foi hermeticamente fechada após finalização da coleta em cada parcela. A operação de coleta em todas as parcelas foi efetuada dentro de um intervalo de tempo de quatro horas no período da manhã, para minimizar o efeito de eventuais alterações de umidade que pudessem acontecer em função de diferenças no horário de coleta.

Pesamos as alíquotas úmidas, em triplicata por parcela, em balança analítica eletrônica imediatamente após a abertura de cada embalagem. Secamos as amostras em estufa aquecida a $102 \pm 3^\circ\text{C}$ e calculamos as umidades gravimétrica e volumétrica conforme o método descrito no Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 1997), em triplicata por parcela.

Para o cálculo da umidade gravimétrica utilizamos a Equação 17.

$$\text{Umidade gravimétrica} = \frac{P_u - P_s}{P_s} \dots\dots\dots(17)$$

Onde: P_u = Massa da amostra úmida (g);

P_s = Massa da amostra seca (g).

Para determinar a umidade volumétrica a partir da umidade gravimétrica utilizamos a Equação 18.

$$\text{Umidade volumétrica} = \text{Umidade gravimétrica} \times d \dots\dots\dots(18)$$

Onde: d = densidade do solo (g cm^{-3}).

Utilizamos os valores de densidade do solo fornecidos por Assis (2010) para a camada superficial (0-20 cm de profundidade) das respectivas parcelas.

2.3 Análise dos dados

Sendo a umidade volumétrica uma variável com grande amplitude entre as coletas, uma vez que estas foram realizadas em períodos de duração distinta após evento chuvoso,

utilizamos como variável resposta, para cada parcela em cada coleta, a umidade padronizada pelo menos valor (U).

Para obter a umidade padronizada, identificamos o menor valor de umidade volumétrica obtido em cada coleta e, a seguir, calculamos os valores para as demais parcelas pela proporção entre o valor de umidade volumétrica obtido para cada parcela em relação ao menor valor. A partir da padronização, cada coleta foi tratada como réplica, totalizando 21 réplicas. Analisamos os dados de umidade padronizada 1) no gradiente de biomassa e 2) em função das características do solo.

2.3.1 Umidade padronizada do solo no gradiente de biomassa do Cerrado

Para a análise, utilizamos para representar cada parcela o valor mediano das 21 coletas e empregamos análise de regressão para modelar a umidade padronizada ao longo do gradiente fisionômico. Para tanto, usamos como variável explanatória a área basal da vegetação em cada uma das 15 parcelas. Na regressão, os valores extremos foram detectados e eliminados por meio da análise da normalidade dos resíduos da regressão, após verificar a origem da sua discrepância.

2.3.2 Umidade padronizada em função das características do solo do Cerrado

Mediante os resultados da análise baseada nos atributos da comunidade vegetal, que contrariou as expectativas (a umidade foi maior quanto maior a biomassa), testamos a hipótese *a posteriori* de que atributos edáficos e não a estrutura da vegetação é que explicariam as diferenças de umidade do solo no gradiente fisionômico do Cerrado. Para esta análise utilizamos como variáveis explanatórias a granulometria e a água disponível, a partir de dados secundários das mesmas parcelas (ASSIS, 2010).

Para a análise individual das variáveis contínuas, elaboramos matriz de ranqueamento de correlações de Spearman entre as variáveis preditoras e as variáveis resposta. Nos casos em que foi detectada correlação, em uma segunda etapa utilizamos análise de regressão para

esclarecer as relações entre a variável-resposta e a variável preditora. Para as análises foi utilizado o software Statistica 7.0 (STATSOFT, 2004).

3. RESULTADOS

3.1. Variação da umidade padronizada no gradiente de biomassa

A umidade padronizada mediana variou de 1,0 a 1,7, o que significa que a parcela mais úmida tinha, em média, 70% a mais de umidade em relação à menos úmida. (Figura 29 e Equação 19). A umidade do solo foi maior nas parcelas com maior biomassa, refutando a hipótese baseada na premissa inicial de que a quantidade de água no solo seria maior em fisionomias menos densas, com menor área basal, onde maior quantidade de chuva chega ao solo (menor interceptação pelas copas).

$$U = 0,843 + 0,03 AB \quad (r^2 = 0,767; p < 0,001) \dots\dots\dots(19)$$

Figura 29 - Umidade padronizada do solo em função da área basal da vegetação do Cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP.

3.2. Umidade padronizada em função das características do solo

Uma vez refutada a hipótese de trabalho, testamos, *a posteriori*, a hipótese de que a umidade do solo é determinada pela capacidade de armazenamento de água do solo, representada pela sua textura. O ranqueamento de Spearman entre os valores de umidade padronizada e as características do solo resultou em correlação significativa entre umidade padronizada e conteúdos de areia grossa e de argila no solo das parcelas (Tabela 8). A relação mais forte entre as variáveis foi a correlação negativa entre a umidade do solo e o conteúdo de areia grossa (Equação 20, Figura 30), sendo que a variação do conteúdo de areia grossa explicou 90% da variação da umidade padronizada. Segundo a regressão, com o aumento de cerca de 10 pontos percentuais na porcentagem da massa de areia no solo, a umidade padronizada do solo tende a diminuir em 20 pontos percentuais. Ou seja, entre dois solos que diferem em 10% no teor de areia, a diferença de umidade deve ser de 20% sob as mesmas condições de chuva.

Tabela 8 Ranqueamento de Spearman entre conteúdo de areia grossa (AG), areia fina (AF), silte (S), argila (A), água disponível (AD) e umidade padronizada mediana (U) do solo na Estação Ecológica de Assis, SP. Valores em negrito: $p < 0,05$.

	AG	AF	S	A	AD	U
Conteúdo de areia grossa(g kg ⁻¹)	1					
Conteúdo de areia fina(g kg ⁻¹)	-0,85	1				
Conteúdo de silte(g kg ⁻¹)	-0,46	0,33	1			
Conteúdo de argila(g kg ⁻¹)	-0,56	0,07	0,35	1		
Água disponível (m ³ m ⁻³)	-0,19	0,18	0,16	0,05	1	
Umidade padronizada mediana	-0,74	0,49	0,43	0,64	0,30	1

$$U = 2,00 + 0,002 \text{ AG} \quad (r^2 = 0,904; p < 0,001) \dots\dots\dots(20)$$

Figura 30 Umidade do solo padronizada em função do conteúdo de areia grossa no solo da Estação Ecológica de Assis, SP.

4 DISCUSSÃO

4.1 Variação da umidade do solo no gradiente de biomassa

A umidade do solo não refletiu a diferença do volume de água que alcança o solo no gradiente fisionômico, determinada pela biomassa da vegetação. Fisionomias mais densas nunca apresentaram valores de umidade do solo mais baixos, nem mesmo imediatamente após chuvas de pequeno montante subsequentes a longos períodos de estiagem. Nessas ocasiões, era esperado que a vegetação mais densa interceptasse maior proporção de chuva, o que levaria à menor umidade no solo sob as suas copas em relação à vegetação mais aberta. Em toposequência recoberta por vegetação com fisionomia de cerradão, na EECA, Juhász et al. (2006) verificaram reações distintas do solo sob chuvas com volumes diferentes. Chuvas com volume inferior a 4 mm não causaram modificações na umidade do solo; chuvas com volume de 4 a 10 mm causaram picos de elevação pequenos e rápidos, enquanto chuvas com volume superior a 10 mm foram capazes de produzir alterações de umidade em toda a toposequência. Dessa forma, na fisionomia cerradão, somente chuvas com montante superior a 10 mm são capazes de causar alterações significativas no perfil do solo, enquanto eventos chuvosos inferiores a 4 mm provavelmente não chegam a ultrapassar as copas das árvores nessa fisionomia, ao passo que poderiam alcançar o solo nas fisionomias menos densas, causando alterações no seu conteúdo de umidade.

Bruno (2009) acompanhou a variação do conteúdo volumétrico de água no solo durante período de cinco anos, no início do qual houve colheita florestal de eucalipto (espécie não identificada pelo autor). Sob as mesmas condições ambientais, foi monitorado o solo sob vegetação de Cerrado. No início do período de estudo, a umidade volumétrica em ambas as comunidades vegetais foi similar, com distanciamento progressivo dos valores, passando a ser o conteúdo de umidade cada vez menor conforme houve o crescimento do eucalipto.

O monitoramento da variação da água do solo, até 2,2 m de profundidade, sob plantio de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea*, entre três e cinco anos após plantio, em Piracicaba, SP, resultou em valores mensais de armazenamento de água no solo ligeiramente superiores sob *Pinus caribaea* em comparação com o solo sob *Eucalyptus saligna*. A área basal das florestas comparadas era de 13 e 15 m² ha⁻¹, respectivamente, no início do estudo (LIMA; FREIRE, 1976). A interceptação, no decorrer do estudo, foi de 7% e 12% para *P. caribaea* e *E. saligna*, respectivamente (LIMA, 1976) .

Em estudo de regime hídrico do solo realizado em Agudos, SP, Lima (1983a) constatou que o solo sob cerrado permaneceu mais úmido do que o solo sob plantio de *Pinus caribaea*, e *P. oocarpa* entre os 11 e 13 anos após plantio e, entre as duas espécies de *Pinus*, a umidade do solo sempre foi menor sob *P. caribaea*, cujo DAP e volume de madeira eram superiores aos da outra espécie. O estudo foi conduzido sob a premissa de que o solo é homogêneo, sendo detectada diferença significativa nos valores mensais de umidade da camada superficial do solo entre a vegetação de cerrado e o talhão de *P. caribaea*. Apesar de não terem sido mencionadas as características da vegetação de cerrado, O DAP e a altura das árvores de *Pinus* era superior a 20 m e 19 m, respectivamente, o que permite concluir que a biomassa dos plantios era superior à da vegetação natural, visto que a fisionomia cerradão tem altura média de 8 a 15 m (RIBEIRO; WALTER, 2008).

Os estudos de Bruno (2009), Lima e Freire (1976) e Lima (1983a) foram efetuados em solos com características semelhantes entre as unidades amostrais, de forma que a umidade do solo foi influenciada pelo tipo de vegetação existente na sua superfície. Entretanto, na EECA, os solos são heterogêneos em sua textura e capacidade de água disponível. Assim, o conteúdo de água do solo sob as diferentes fisionomias não foi explicado pela quantidade de água da chuva que entra no sistema, pois a baixa capacidade de retenção de água nos solos sob fisionomias menos densas é um fator muito mais forte e determina que estas sejam sempre menos úmidas em relação aos solos sob fisionomias mais densas. Assim, é possível concluir que, na EECA, não é a quantidade de água que entra no sistema que define a disponibilidade de água para as plantas, mas os atributos do solo. Esta conclusão nos reporta à teoria dos

filtros ecológicos e às regras de montagem das comunidades vegetais (HOBBS; NORTON, 2004). Ou seja, a textura do solo atua como um filtro ecológico muito mais forte do que a biomassa da vegetação na determinação da água disponível para a germinação, o estabelecimento e o crescimento das plantas.

4.2 O solo como fator condicionante da vegetação do Cerrado

Ruggiero et al. (2006), utilizando análises multivariadas e dados secundários, concluíram que a hierarquia dos fatores condicionantes do Cerrado pode mudar entre locais e Durigan et al. (2003), após análise de similaridade florística entre 202 fragmentos de Cerrado remanescentes no estado de São Paulo e estados adjacentes, concluíram que, dentro da região analisada, o clima (temperatura e duração da estação seca) exerce maior influência, seguido das propriedades dos solos. Considerando o clima como sendo homogêneo, dentro da EEcA, a umidade do solo, condicionada pelas suas propriedades e não pela vegetação, é que determina as fisionomias de Cerrado (ASSIS et al., 2011) e até mesmo a composição florística da comunidade (PINHEIRO; DURIGAN, 2012).

A matriz de correlações indicou que o atributo do solo com relação mais estreita com a sua umidade é o conteúdo de areia grossa, sendo a correlação linear e negativa. No presente estudo, não foi o solo da fisionomia a receber maior quantidade de água da chuva o que apresentou maior conteúdo de água, mas sim o solo com menor quantidade de areia, ou seja, o fator com influência mais forte na umidade do solo, na EEcA, foi a granulometria. Esse fato indica uma alteração na hierarquia dos filtros ecológicos em relação às regras de montagem das comunidades vegetais em regiões com clima homogêneo.

Características do solo podem, com frequência, derrubar conceitos pré-existentes. Partindo da premissa de que a umidade do solo seria decrescente do vale ao topo, Helvey e Patric (1984) determinaram, em Coweeta, EUA, a umidade ao longo do perfil topográfico. Ao verificarem que a umidade do solo foi maior no topo, concluíram que não é a posição na topossequência que determina a umidade do solo, mas o teor de argila, que por sua vez determina a capacidade de retenção de água do solo. Partindo da premissa de que o crescimento da vegetação é fortemente relacionado à produção hídrica, Cornish e Vertessy (2001) monitoraram a produção hídrica por 16 anos em talhões em regeneração de *Eucalyptus saligna*, na Austrália. Os autores constataram ser a profundidade do solo a variável preditora

principal das modificações que ocorreram na produção hídrica, ao passo que a área basal e a cobertura de copas foram menos importantes.

Em estudos onde a granulometria do solo é analisada junto com outras características edáficas, a proporção de argila frequentemente tem destaque como variável do solo mais relacionada com a fisionomia (ASSIS, 2010; ASSIS et al., 2011; JUHÁSZ et al., 2006, 2007; MARIMON JR.; HARIDASAN, 2005; ROSSI et al., 2005; RUGGIERO et al., 2002; TOPPA, 2004). Certamente, além do aspecto hídrico, a granulometria influencia outros processos ecossistêmicos.

Em alguns estudos, o fator determinante para a diferenciação de fisionomias foi o teor de argila (MARIMON JR.; HARIDASAN, 2005; ROSSI et al., 2005; RUGGIERO et al., 2002). O resultado de análise multivariada que utilizou 15 variáveis relacionadas às características do solo indicou ausência de um fator importante para determinar o gradiente de fisionomia da vegetação em Santa Rita do Passo Quatro, SP. Porém, possibilitou identificar decréscimo do conteúdo de argila acompanhando o gradiente de fisionomias, de floresta semidecídua até campo cerrado (RUGGIERO et al., 2002). Com base nesse resultado, os autores sugerem que o fator ausente na análise seria a dinâmica da água do solo.

Marimon Jr. e Haridasan (2005) chegaram a conclusão semelhante, ao comparar dez características do solo sob duas fitofisionomias distintas de Cerrado no leste de Mato Grosso. Diferenças relevantes entre o solo sob ambas as fisionomias foram relativas à composição granulométrica e o solo sob cerradão foi mais argiloso ao longo de todo o perfil. Com base nessa informação, os autores sugeriram verificar o comportamento da água em ambos os solos e as relações hídricas das principais espécies arbóreas.

Rossi et al. (2005), após verificarem a relação entre a características dos solos e a vegetação no Parque Estadual de Porto Ferreira, SP, sugeriram que a diferenciação da vegetação entre Floresta Estacional Semidecidual e Cerrado expressa diferenças de água retida no solo em potenciais inferiores a -1,5 MPa. Solos mais bem drenados e com baixa retenção hídrica favoreceriam o desenvolvimento de vegetação de Cerrado de baixa biomassa, enquanto a vegetação de porte mais alto ocorreria associada aos teores mais elevados de argila em todo o perfil e de umidade retida em baixos potenciais de água do solo.

Por outro lado, outros estudos apontam o teor de areia como determinante da diferenciação entre fisionomias. Talvez isso ocorra porque não basta a argila estar presente para determinar maior capacidade de retenção de água, mas é necessária estrutura do solo adequada (JUHÁSZ et al., 2007). Toppa (2004), em estudo realizado na Estação Ecológica de Jataí, em Luiz Antonio, SP, sobre a estrutura e diversidade florística do Cerrado e a sua

relação com as características do solo, assinalou as características granulométricas como as variáveis ambientais mais importantes para distinguir entre as fisionomias cerrado *stricto sensu* e cerradão, sendo a variável argila mais associada ao cerradão, enquanto a areia fina está associada ao cerrado *stricto sensu*. Nesse caso, a biomassa aumentou à medida que aumentou o teor de argila. O aumento na proporção de areia resultou em decréscimo de biomassa e, neste ponto, o autor ressalta que o aumento de areia implica em diminuição da água disponível no solo.

Juhász et al. (2006), acompanhando a dinâmica da água no solo em toposequência com vegetação com fisionomia de cerradão, comprovaram, mesmo sob essa fisionomia, cujo conteúdo de argila é maior em todo o perfil do solo em comparação com os solos sob fisionomias com menor biomassa, que a baixa disponibilidade de água no solo ocorre por um período relativamente extenso e contínuo na época seca e de maneira descontínua durante a estação chuvosa.

Assis et al. (2011) apresentaram tabela de correlação entre a área basal e as características do solo nas mesmas parcelas do presente estudo e demonstraram que, das 25 variáveis do solo estudadas, a variável com maior correlação com a área basal foi a proporção de areia grossa. Mesmo considerando a alta correlação entre área basal e conteúdo de areia grossa, o uso da classificação americana de solos (US Soil Taxonomy) para solos de baixo conteúdo de argila não foi adequada para diferenciar os solos sob cerradão e cerrado *stricto sensu*, apesar de apropriada para distinguir solos sob fisionomias com diferentes biomassas. Assis et al. (2011) concluíram que, na EECA, o adensamento da vegetação e a substituição de espécies ocorrem associadas às propriedades do solo, especialmente àquelas que descrevem ou influenciam a disponibilidade de água para as plantas, como a sua estrutura, conteúdo de argila, microporosidade e umidades residual e de saturação.

Em revisão da literatura sobre gradientes espaciais na estrutura da vegetação lenhosa associados à disponibilidade de água, Ferreira (2006) concluiu que, em escala continental, na África, a disponibilidade de água limita a cobertura lenhosa da vegetação. Stephenson (1990) partiu de premissa semelhante quando utilizou o balanço hídrico para analisar a distribuição da vegetação nos Estados Unidos. É possível aplicar essa regra à EECA, resguardada a diferença de escala, onde a vegetação de maior porte ocupa solos com maior disponibilidade hídrica e a vegetação de menor porte fica restrita a solos com melhor drenagem. As parcelas 26 e 16 foram retiradas da análise por possuir área basal maior do que a estimada pela regressão. Esse maior crescimento pode ser creditado à maior proporção de argila nos horizontes subsuperficiais nessas parcelas, em relação às demais (ASSIS, 2010). Conforme

discutido por outros autores, maiores proporções de argila permitem maior retenção de água, que por sua vez condiciona vegetação de maior porte (ASSIS, 2010; JUHÁSZ et al., 2007; MARIMON JR.; HARIDASAN, 2005; ROSSI et al., 2005; RUGGIERO et al., 2002; TOPPA, 2004).

As perturbações, por outro lado, podem manter a cobertura e a biomassa da vegetação abaixo do máximo que seria determinado pela disponibilidade de água (DURIGAN et al., 2011; FERREIRA, 2006). A parcela 8, também retirada da análise por possuir área basal inferior ao previsto na análise, está localizada em área de baixada e é submetida com frequência a episódios de geadas (BRANDO; DURIGAN, 2004), o que pode estar dificultando o crescimento da vegetação até o nível previsto pelo modelo.

5 CONCLUSÕES

A quantidade de água que chega ao solo é definida pelo filtro biótico estabelecido pela biomassa da vegetação. Porém, este não é o principal fator a influenciar o conteúdo de água do solo, quando existe variação textural. A dinâmica e a disponibilidade de água são mais influenciadas pelas propriedades do solo do que pela cobertura vegetal, quando ambos os fatores são variáveis.

Pesquisas recentes indicam cada vez mais a relação estreita existente entre solo e vegetação. No futuro, o avanço do conhecimento das relações entre características do solo e estrutura da vegetação fornecerá subsídios para planejar e direcionar a restauração de ecossistemas, facilitando a seleção de espécies e contribuirá nas decisões sobre práticas de manejo mais apropriadas a ser aplicadas em uma dada localidade, visando à conservação da biodiversidade e dos serviços ecossistêmicos, entre os quais destaca-se a produção de água.

REFLEXÕES SOBRE A HIDROLOGIA DO CERRADO E IMPLICAÇÕES SOBRE SEU MANEJO E CONSERVAÇÃO

A falta de conhecimento sobre a influência do gradiente fisionômico da vegetação do Cerrado na repartição da água da chuva e a variação da umidade do solo decorrente desse gradiente foi a principal motivação para a pesquisa desenvolvida nesta tese. Os resultados obtidos forneceram dados inéditos sobre a relação entre estrutura da vegetação do Cerrado, representada pela área basal da comunidade vegetal, e a variação das proporções dos processos hidrológicos relativos à entrada de água nesse ambiente. Permanecem lacunas no conhecimento sobre os caminhos percorridos pela água no solo, até que seja captada pelas plantas para a transpiração, que ressurja na superfície, para fazer parte dos recursos hídricos superficiais ou que atinja o aquífero, compondo os recursos subterrâneos.

Em conformidade com o que ocorre com as demais formações vegetais, o aumento da densidade da vegetação do Cerrado leva à redução da entrada de água no sistema em decorrência da evaporação da água que interage com as copas e troncos das árvores. Embora o conteúdo de umidade do solo tenha se mostrado mais dependentes das características texturais do solo do que da biomassa da vegetação da superfície, o gradiente fisionômico ainda é fundamental para o balanço hídrico, pois ao decréscimo da entrada de água decorrente do aumento da biomassa é necessário somar a demanda para a transpiração da comunidade vegetal, que aumenta com o acréscimo de densidade (BUCCI et al., 2008; GIAMBELLUCA et al., 2009). Em fisionomias mais densas, há maior perda evaporativa pela interceptação e também maior demanda para a transpiração. Sob condições de solo homogêneas, a influência da estrutura da vegetação sobre a disponibilidade hídrica é bastante forte.

A recarga da água do subsolo em solos cuja composição textural permite maior retenção de água será, naturalmente, menor, em comparação com solos com menor retenção de água. Esse é o fenômeno que permite maior disponibilidade de água para as plantas do deserto quando instaladas sobre solos de textura arenosa (WALTER, 1986). Quando a água da chuva atinge solos com maior capacidade de armazenamento, acaba sendo retida nas camadas superficiais, de forma que pode ser assimilada pela vegetação ou evaporada. Já quando em solos com baixa capacidade de retenção, a água infiltra e atinge camadas mais profundas, de forma a impossibilitar a evaporação, mas permitir a captação pelas plantas com sistema radicular capazes de atingir regiões mais profundas do solo (JACKSON et al., 1999; ROSSATO et al., 2012; SCHOLZ et al., 2002) ou reabastecer os reservatórios subterrâneos.

Assim, solos com maior capacidade de armazenamento de água comportam vegetação com maior biomassa, que têm perdas evaporativas pela interceptação ou transpiração maiores em comparação com vegetação de menor porte. Solos com textura mais arenosa, por sua vez, podem, com a presença da vegetação e supressão das perturbações naturais ou antrópicas, acumular matéria orgânica de forma a melhorar a fertilidade e capacidade de retenção de água (ASSIS, 2010) e, gradativamente, permitir a presença de vegetação de maior porte.

O adensamento da vegetação savânica é um fenômeno que tem sido observado em diferentes regiões do mundo (ARCHER, 1995; CARDOSO et al., 2009; DURIGAN; RATTER, 2006; EDDLEMAN; MILLER, 1991). Pinheiro e Durigan (2009) estimaram que, no estado de São Paulo, em 1962, 91% das áreas de Cerrado eram ocupadas por fisionomias abertas de cerrado e que, se todas essas áreas tivessem sido protegidas contra as pressões antrópicas, em 2009 as fisionomias abertas teriam diminuído para 15% do Estado, com o restante sendo ocupado por cerradão. De fato, Ratter, Bridgewater e Ribeiro (2006) avaliaram que o cerradão seria o clímax da vegetação do Cerrado em grande parte da área do bioma no estado de São Paulo, o que significa que, antes da ocupação humana, a entrada de água no solo nessa região era menor. Com a diminuição da biomassa da vegetação decorrente das perturbações, houve aumento da quantidade de água chegando ao solo. Entre 1962 e 1992, a diminuição da área ocupada por vegetação de Cerrado no Estado de São Paulo foi de 87% (KRONKA et al., 1998), c grande parte convertida em usos agropecuários. São formas de uso em que há relativamente pouca perda por evaporação, mas que induzem modificações na estrutura do solo, de forma a favorecer os processos de superfície e diminuir a infiltração (BRUIJNZEEL, 1990; HAMILTON, 2008; SALEMI et al., 2011; SWANK; SWIFT; DOUGLASS, 1984). Em decorrência dessas alterações, Brannstrom e Oliveira (2000) documentaram, em bacias hidrográficas pequenas do oeste paulista, erosão do solo e indícios de modificações no regime de fluxo dos rios, com formação de depósitos aluviais nos canais e alterações das características dos leitos e implicações ambientais, econômicas e sociais. É necessário advertir que o adicional de água obtido após conversão de uso é associado a eventos de curta duração, com prejuízo da qualidade e, normalmente, este excesso é indisponível para uso, pois deixa a bacia hidrográfica em curto espaço de tempo, na forma de enchentes, sem alimentar as reservas subterrâneas.

Trata-se, portanto, não somente de um “tradeoff” entre produção hídrica e densidade da vegetação (JACKSON et al., 2005), mas também entre produção hídrica e qualidade ambiental. Quanto maior a densidade da vegetação, menor a produção hídrica. Porém, quanto maior a produção hídrica associada à menor cobertura vegetal, menor a proteção oferecida ao

solo. Brannstrom e Oliveira (2000) atribuem a recente situação dos depósitos aluviais em fundos de vale no oeste paulista não somente à remoção da vegetação original, mas ao uso e manejo a que foram submetidos esses solos, o que possibilita identificar mais um “tradeoff”, entre produtividade agrícola e qualidade ambiental.

À exceção de situações em que a diminuição da quantidade de água subterrânea é desejável (FORD; DEANS, 1978; MITCHELL et al., 2009), normalmente esforços são dedicados para a manutenção dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais ou até mesmo aumentá-los. Baker-Pilgrim (2009), embora sem evidência científica, registrou relatos culturais de manejo do fogo entre os aborígenes australianos para aumentar a produção de água. Ball e Taylor (2003) indicam o uso do fogo para controle de biomassa, em regiões específicas e sob condições pluviométricas específicas, para aumentar a disponibilidade de água.

A história da convivência da vegetação de Cerrado com o fogo é antiga, pois há evidências de sua evolução sob a influência do fogo e de que deste fator depende a manutenção dos processos ecológicos do Cerrado (FIDELIS; PIVELLO, 2011). A supressão do fogo em comunidades adaptadas à sua presença pode modificar a composição e a estrutura dessas comunidades, de forma a acarretar perdas de biodiversidade (PINHEIRO; DURIGAN, 2009; PIVELLO, 2005, 2011). Assim, o uso do fogo é defendido como estratégia de manejo para a conservação das fisionomias mais abertas de Cerrado (FIDELIS; PIVELLO, 2011; PIVELLO, 2005, 2011; PIVELLO; NORTON, 1996; RAMOS-NETO; PIVELLO, 2000). A aplicação da técnica permitiria a manutenção das fisionomias mais abertas do Cerrado com suas espécies endêmicas e, também, dos serviços ecossistêmicos a elas associados, inclusive a produtividade hídrica. A legislação brasileira, por meio do artigo 38 da Lei Federal nº 12.651/12, de 25/05/2012, permite o “emprego da queima controlada em Unidades de Conservação (...), visando ao manejo conservacionista da vegetação nativa, cujas características ecológicas estejam associadas evolutivamente à ocorrência do fogo” (BRASIL, 2012b). Ainda que o uso do fogo para manutenção da biodiversidade do Cerrado e dos ecossistemas a ela associados esteja assentado em bases científicas sólidas, ainda pouco se conhece sobre a hidrologia do Cerrado, o que torna necessários estudos multi e interdisciplinares, acompanhando as modificações acarretadas pelo uso do fogo no regime hídrico e na vegetação ao longo do tempo.

Também são insuficientes estudos que dêem suporte ao uso do fogo como prática de manejo conservacionista, fundamentais para que a lei seja eficaz.

No Estado de São Paulo, o bioma Cerrado ocupava originalmente cerca de 14%, tendo grande parte da sua vegetação substituída por outros usos. Atualmente, as áreas com vegetação de Cerrado ocupam menos que 1% do estado, de forma fragmentada e esparsa (DURIGAN et al., 2004). Pela Lei Federal nº 9985 de 15/07/2000, as Estações Ecológicas têm destaque pela proteção integral dos ecossistemas, mas com possibilidade de manejo experimental de 3% da área (BRASIL, 2000). Assim, estações ecológicas que preservam o Cerrado são os locais ideais para a realização desses estudos que possibilitarão avaliar a eficácia do manejo do fogo para a manutenção biológica, o monitoramento dos processos ecológicos relacionados com a evolução dos tipos fisionômicos (PINHEIRO; DURIGAN, 2009) e o reflexo do manejo sobre as características do solo e sobre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Outro aspecto altamente relevante que emerge desta pesquisa é a elevada eficiência das fisionomias abertas do Cerrado para a produção de água, em comparação com formações florestais, uma vez que a perda de água pela interceptação é tanto maior quanto maior a biomassa aérea. No entanto, as leis ambientais historicamente atribuíam maior valor aos tipos de vegetação com maior biomassa. Exemplo disso é a Lei 13.550, de 02/06/2009, que protege os remanescentes de Cerrado no Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2009), que torna praticamente imunes de supressão as fisionomias mais fechadas, mas admite a supressão das fisionomias abertas, como se fossem menos importantes.

Em regiões nas quais a água é um recurso escasso, a valoração dos ecossistemas naturais deveria incorporar a função hidrológica da vegetação pela perspectiva dos serviços ecossistêmicos. Por este ponto de vista, o cerrado *stricto sensu* e as fisionomias de menor biomassa teriam reconhecido, talvez, o seu merecido valor.

REFERÊNCIAS

- ABOAL, J.R. et al. (1999a). Rainfall interception in laurel forest in the Canary Islands. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, n.2, p. 73-86.
- _____. (1999b). The Measurement and modelling of the variation of stemflow in a laurel forest in Tenerife, Canary Islands. **Journal of Hydrology**, v. 221, n.3-4, p. 161-175.
- ADÂMOLI, J. et al. (1987). Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W.J. (Ed.) **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel; Brasília: EMBRAPA, CPAC. p.33-98.
- ANDRADE, G.C. et al. (1995). Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutrientes minerales para *Eucalyptus grandis*. **Revista Bosque**, v.46, n.1, p. 47-51.
- APARECIDO, L.M.T. et al. (2011). Relação entre atributos físicos de árvores do cerrado e o escoamento da chuva pelo tronco. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 10., 2011, São Lourenço. **Anais...** São Lourenço: SEB. Disponível em: <www.seb-ecologia.org.br/xceb/resumos/1320.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2012.
- ARCHER, S. (1995). Tree-grass dynamics in a *Prosopis*-thornscrub savanna parkland: reconstructing the past and predicting the future. **Ecoscience**, v. 2, n. 1, p. 83-99.
- ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V. (1987). Fluxo de nutrientes através da precipitação, precipitação interna e escoamento pelo tronco em floresta natural secundária do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha – SP. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, v.41, n.1, p. 37-58.
- ARCOVA, F. C.S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. (2003). Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha - SP. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 257-262.
- ASSAD, E. D. et al. (1994). Chuvas extremas na região dos cerrados. In: ASSAD, E.D. (Coord.) **Chuva nos cerrados: análise e espacialização**. Brasília: EMBRAPA. p.49-58.
- ASSIS, A.C.C. (2010). **Parâmetros e classes de solos na diferenciação das fisionomias de cerrado em Assis, SP**. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2010.
- ASSIS, A.C.C. et al. (2008). Associação solo-fisionomias de cerrado em Assis, SP. In: FERTBIO 2008: desafios para o uso do solo com eficiência e qualidade ambiental, 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa/IAPAR/UEL.
- _____. (2009a). Associação entre variáveis de solo e distribuição de espécies arbóreas em diferentes fisionomias de cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 9., 2009, São Lourenço. **Anais...** São Paulo: Sociedade de Ecologia do Brasil. p. 1-4.

_____. (2009b). Variáveis de solo como determinantes do gradiente fisionômico do cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32, 2009, Fortaleza. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 244-249.

_____. (2011). Water availability determines physiognomic gradient in an area of low-fertility soils under Cerrado vegetation. **Plant Ecology**, v. 212, p. 1135-1147.

ASTON, A.R. (1979). Rainfall interception by eight small trees. **Journal of Hydrology**, v. 42, n.3-4, p 383-396.

BAKER-PILGRIM, A. (2009). Associação water can hear. In: CONFERENCE OF THE SOCIETY FOR ECOLOGIAL RESTORATION – making change in a changing world, 19., 2009, Perth. **Proceedings...** Perth: The Society for Ecological Restoration.

BALIEIRO, F.C. et al. (2007). Evaluation of the throughfall and stemflow nutrient contents in mixed and pure plantations of *Acacia mangium*, *Pseudosamanea guachapele* and *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, v.31, n.2, p.339-346.

BALL, L.; TAYLOR, M. (2003). **Brush management: myths and facts**. Disponível em: <http://www.texaswatermatters.org/pdfs/brush_management.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2012.

BARTELINK, H.H. (1997). Allometric relationships for biomass and leaf area of beech (*Fagus sylvatica* L). **Annals of Forest Science**, v.54, n.1, p. 39-50.

BOETTCHER, S.E.; KALISZ, P.J. (1990). Single-tree influence on soil properties in the mountains of faster Kentucky. **Ecology**, v.71, n.4, p. 1365-1372.

BOSCH, J.M.; HEWLETT, J.D. (1982). A Review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, n.1-4, p.3-23.

BRANDO, P.M.; DURIGAN, G. (2004). Changes in cerrado vegetation after disturbance by frost (São Paulo State, Brazil). **Plant Ecology**, v. 17, p. 205-215.

BRANNSTROM, C.; OLIVEIRA, A.M.S. (2000). Human modification of stream valleys in the Western Plateau of São Paulo, Brazil: implications for environmental narratives and management. **Land Degradation & Development**, v. 11, n.6, p. 535-548.

BRASIL. (2000). Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm>. Acesso em: 11 outubro de 2013.

BRASIL. (2007). **Mapeamento de cobertura vegetal do bioma cerrado**: relatório final. Brasília: Ministério do Meio Ambiente.

BRASIL. Ministério do Meio ambiente. (2012a). **Sumário executivo da 107ª reunião ordinária do Conama**, 12 e 13 de setembro de 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 14 nov. 2012.

BRASIL. (2012b). Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651compilado.htm>. Acesso em: 11 outubro de 2013.

BRÉDA, N.; GRANIER, A.; AUSSENAC, G. (1994). Effects of thinning on soil and tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). **Tree Physiology**, v.15, p. 295-306.

BROWN, A.E. et al. (2005). A Review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology**, v. 310, n.1-4, p.28-61.

BROWN, J.R.; ARCHER, S. (1990). Water relations of a perennial grass and seedlings VS adult woody plants in a subtropical savanna, Texas. **Oikos**. v. 57, p. 366-374.

BRUIJNZEEL, L.A. (1990). **Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review**. Amsterdam: Free University.

BRUIJNZEEL, L.A. (2001). Hydrology of tropical montane cloud forests: a reassessment. **Land Use and Water Resources Research**. v.1, p.1-18.

BRUNINI, O.; PRELA, A. (2007). O Clima da região do Médio Paranapanema. In: DUARTE, A.P. (Ed.) **Duas décadas da estação experimental de agronomia- apta Médio Paranapanema: histórico, presente e perspectivas**. Campinas: Instituto Agrônômico. p 29-36.

BRUNO, R.D. (2009). **Balanço de água em microbacias de cerrado restrito e eucalipto: um estudo de caso com medidas observacioais**. 90 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BRUNO, R.D. et al. (2006). Soil moisture dynamics in na eastern Amazonian tropical forest. **Hydrological Processes**, v.20, n.12, p. 2477-2489.

BUCCI, S. et al. (2008a). Controls on stand transpiration and soil water utilization along a tree density gradient in a Neotropical savanna. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n. 6-7, p. 839-849.

_____. (2008b). Water relations and hydraulic architecture in cerrado trees: adjustments to seasonal changes in water availability and evaporative demand. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 20, n.3, p. 233-245.

BUTTLE, J.M.; FARNSWORTH, A.G. (2012). Measurement and modeling of canopy water partitioning in a reforested landscape: The Ganaraska Forest, southern Ontario, Canada. **Journal of Hydrology**, v. 466-467, p.103-114.

CALDER, I.R. (1990). **Evaporation in the uplands**. New York: Willey.

_____. (1998). Water use by forests, limits and controls. **Tree Physiology**. v. 18, p. 625-631.

CALDER, I.R.; WRIGHT, I.R.; MURDIYARSO, D. (1986). A Study of evaporation from tropical rain forest – West Java. **Journal of Hydrology**, v. 89, n.1-2, p. 13-31.

CALDER, I.R. et al. (1997). Eucalyptus water use greater than rainfall input- a possible explanation from Southern Índia. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.1, n.2, p. 249-256.

CAMARGO, A.P. (1963). Clima do cerrado. São Paulo: EDUSP. p.95-113.

CARDOSO, E. et al. (2009). Mudanças fitofisionômicas no cerrado: 18 anos de sucessão ecológica na estação ecológica do Panga, Uberlândia - MG. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 10, n.32, p. 254-268.

CARLYLE-MOSES, D.E. (2004). Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. **Journal of Arid Environments**, v.58, n.2, p. 181-202.

CARVALHO, D. A. et al. (2005). Distribuição de espécies arbóreo-arbustivas ao longo de um gradiente de solos e topografia em um trecho de floresta ripária do Rio São Francisco em Três Marias, MG, Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v.28, n.2, p.329-345.

CENTRO INTEGRADO DE INFORMAÇÕES AGROMETEOROLÓGICAS. **Dados diários de chuva no período de 01/01/1991 a 31/12/2010**. Disponível em:<<http://www.ciiagro.sp.gov.br>>. Acesso em: 9 abr. 2012.

CICCO, V. (2009). **Determinação da evapotranspiração pelos métodos dos balanços hídrico e de cloreto e a quantificação da interceptação das chuvas na Mata Atlântica: São Paulo, SP e Cunha, SP**. 138 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CICCO, V. et al. (1986/1988). Interceptação das chuvas por floresta natural secundária de mata atlântica. **Silvicultura em São Paulo**, v. 20/22, p. 25-30.

CORNISH, P.M.; VERTESSY, R.A. (2001). Forest age-induced changes in evapotranspiration and water yield in a eucalypt forest. **Journal of Hydrology**, v. 242, n.1-2, p. 43-63.

COUTINHO, L.M. (1982). Ecological effects of fire in Brazilian cerrado. In: HUNTLEY, B.J.; WALKER, B.H. (Ed.). **Ecology of tropical Savannas**. Berlin: Springer-Verlag. p.272-291. DOI 10.1007/978-3-642-68786-0_13. Online ISBN 978-3-642-68786-0. (**Ecological Studies**, n.42).

_____. (1990). Fire in the ecology of Brazilian cerrado. In: GOLDAMMER, J.G. (Ed.). **Fire in the tropical biota**. Berlin: Springer-Verlag. p.82-105.

DAWSON, T.E. (1996). Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift. **Tree Physiology**, v.16, p. 263-272.

DERRY, J.F.; RUSSELL, G.; LIEDLOFF, A.C. **Review of soil water models with respect to savanna hydrology**. Disponível em:<<http://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/1380>>. Acesso em: 13 jan. 2009.

DIETZ, J. et al. (2006). Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, v. 237, n.1-3, p. 170–178.

DOMINGO, F. et al. (1998). Measurement and modelling of rainfall interception by three semi-arid canopies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 91, n.3-4, p. 275-292.

DOURADO-NETO, D. et al. (2000). Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n.1. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162000000100031&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 24 Sept. 2012.

DURIGAN, G.; RATTER, J.A. (2006). Successional changes in cerrado and cerrado/forest ecotonal vegetation in western São Paulo State, Brazil, 1962-2000. **Edinburgh Journal of Botany**, v.63. n.1, p.119-130

DURIGAN, G; MELO, A.C.; BREWER, J.S. (2012). The Root to shoot ratio of trees from open- and closed-canopy cerrado in south-eastern Brazil. **Plant Ecology & Diversity**, v.1, p. 1-11. DOI:10.1080/17550874.2012.691564.

DURIGAN, G. et al. (1987). Fitossociologia e evolução da densidade da vegetação de cerrado em Assis, SP. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, v.41, p.59-78.

_____. (2003). Padrões fitogeográficos do cerrado paulista sob uma perspectiva regional. **Hoenea**, v.30, n.1, 39-51.

_____. (2004). **Plantas do cerrado paulista: imagens de uma paisagem ameaçada**. São Paulo: Páginas & Letras.

_____. (2011). **Manual para recuperação da vegetação de cerrado**. 3.ed. São Paulo: SMA.

EDDLEMAN, L.E.; MILLER, P.M. (1991). Potential impacts of western Juniper on the hydrologic cycle. In: ECOLOGY AND MANAGEMENT OF RIPARIAN SHRUB COMMUNITIES, 1991, Sun Valley. **Proceedings...** USDA: Forest Service. p.176-180.

EITEN, G. (1970). A Vegetação do Estado de São Paulo. **Boletim do Instituto de Botânica**. v. 7, p.1-77.

_____. (1972). The cerrado vegetation of Brazil. **Botanical Reviews**, n.38, p.201-341.

_____. (1994). Vegetação do cerrado. In: PINTO, M.N. (Coord.). **Cerrado - caracterização e perspectivas**. 2.ed. Brasília: UnB/SEMATEC. p.9-65.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. (1997). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

_____. (2013). **Balanco hídrico de Cândido Mota no período entre 1941 e 1970.** Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/balanco.php>>. Acesso em: 1 jul. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA Mandioca E Fruticultura Tropical. (2009). **Amostragem de solo para recomendação de calagem e adubação:** folheto. Cruz das Almas: EMBRAPA. Folheto explicativo.

FELFILI, J.M. et al. (1994). Projeto biogeografia do bioma cerrado: vegetação e solos. **Caderno de Goeciências do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, Brasília, v. 12, p.75-166.

FERREIRA, J.N. (2006). **Padrões de estrutura e diversidade da vegetação lenhosa relacionados à heterogeneidade espacial de água no solo em cerrado do Brasil Central.** 146 f. Tese (Doutorado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

FERRI, M.G. (1963). Histórico dos trabalhos botânicos sobre o cerrado. In: FERRI, M.G. (Ed.). **SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO.** São Paulo: EDUSP. p.19-50.

FIDELIS, A.; PIVELLO, V.R. (2011). Deve-se usar o fogo como instrument de manejo no cerrado e campos sulinos?. **Biodiversidade Brasileira**, v.1, n.2, p.12-25.

FORD, E.D.; DEANS, J.D. (1978). The Effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka Spruce plantation. **Journal of Applied Ecology**, v.15, n.3, p.905-917.

FRANCO, A.C.; HARIDASAN, M.; FERREIRA, C.S. (2008). Physiological ecology of cerrado plants: new insights and new approaches. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.20, p.165-166.

FRANCO, A.C.; NARDOTO, G.B.; SOUZA, M.P. (1996). Patterns of soil water potential and seedling survival in the cerrados of central Brazil. In: **SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, 8./ INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, 1996. Proceedings...** Planaltina: EMBRAPA. p.277-280.

FRANKEN, W. et al. (1982). Estudo da interceptação da água de chuva em cobertura vegetal amazônica do tipo terra firme. **Acta Amazônica**, v.12 n.2, p.327-331.

FUJIEDA, M. et al. (1993). Hydrological processes in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **IAHS Publications**, n.216, p.43-51.

_____. (1997). Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology**, v.196, p.26-46.

GARCIA-ESTRINGANA, P.; ALONSO-BLÁZQUEZ, N.; ALEGRE, J. (2010). Water storage capacity, stemflow and water funneling in mediterranean shrubs. **Journal of Hydrology**, v.389, p.363-372.

GARRIDO, M.A.O. [1970?]. **A Pesquisa e a experimentação na Estação Experimental de Assis.** São Paulo: SCTC-Instituto Florestal. (Série Manejo Florestal, 1).

GASH, J.H.C. (1979). An Analytical model of rainfall interception by forests. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v.105, p.43-55.

GASH, J.H.C.; STEWART, J.B. (1977). The Evaporation from Thetforf forest during 1975. **Journal of Hydrology**, v.35, p.385-396.

GENOVA, K.B.; HONDA, E.A.; DURIGAN, G. (2007a). Processos hidrológicos em diferentes modelos de plantio de restauração de mata ciliar em região de cerrado. **Revista do Instituto Florestal**, v.19, p.189-200, dez.

_____. (2007b). Intercepção da chuva em diferentes modelos de plantio de restauração de mata ciliar em região de cerrado. **Revista do Instituto Florestal – Série Registros**, v.31, p.281-285, jul.

GERMER, S.; ELSENBEER, H.; MORAES, J.M. (2006). Throughfall and temporal trends of rainfall redistribution in an open tropical rainforest, south-western Amazonia (Rondônia, Brazil). **Hydrology and Earth System Sciences**, v.10, p.383-393.

GERMER, S.; WERTHER, L.; ELSENBEER, H. (2010). Have we underestimated stemflow? Lessons from an open tropical rainforest. **Journal of Hydrology**, v.395, p.169-179.

GHAZOUL, J.; SHEIL, D. (2010). Processes and cycles. In: _____. **Tropical rain forest ecology, diversity, and conservation**. Oxford: Oxford University Press. p.179-195.

GIAMBELLUCA, T.W. et al. (2009). Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.839-849.

GÓMEZ, J.A.; GIRÁLDEZ, J.V.; FERERES, E. (2001). Rainfall interception by olive trees in relation to leaf area. **Agricultural Water and Management**, v.49, p.65-76.

GOODLAND, R.A.; FERRI, M.G. (1979). **Ecologia do cerrado**. Belo Horizonte: Itatiaia. (Reconquista do Brasil, 52).

HAMILTON, L.S. (2008). **Forests and water: a thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005**. Roma: FAO. (FAO Forestry Paper, 155).

HANCHI, A; RAPP, M. (1997). Stemflow determination in forest stands. **Forest Ecology and Management**, v.97, p.231-235.

HELVEY, J.D.; PATRIC, J.H. (1965). Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States. **Water Resources Research**, v.1, p.193-206.

_____. (1984). Interception loss and soil moisture relationships. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY, JR., D.A. **Forest hydrology and ecology at coveeta**. New York: Springer-Verlag. Cap.9, p.129-137. (Ecological Studies, 66).

HERBST, M. et al. (2008). Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.1655-1667.

HERWITZ, S.R. (1985). Interception storage capacities of tropical rainforest canopy trees. **Journal of Hydrology**, v.77, p.237-252.

HEW LETT, J.D. (1969). **Forest hydrology**. Georgia: The University of Georgia Press.

HOBBS, R.J.; NORTON, D.A. (2004). Ecological filters as a form of assembly rule. In: TEMPERTON, V.M. et al. (Ed.). **Assembly rules and restoration ecology**: bridging the gap between theory and practice. Washington: Island Press. p.72-95.

HOFHANSL, F. et al. (2012). Controls of hydrochemical fluxes via stemflow in tropical lowland rainforests: Effects of meteorology and vegetation characteristics. **Journal of Hydrology**, v.452-453, p.247-258.

HOLWERDA, F.; SCATENA, F.N.; BRUIJNZEEL, L.A. (2006). Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: a comparison of sampling strategies. **Journal of Hydrology**, n.327, p.592-602.

HONDA, E.A.; GENOVA, K.B. (2006). Aporte de sólidos dissolvidos, nutrientes e DBO em função do uso do solo em bacias hidrográficas do Oeste Paulista. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 5., Porto Alegre, 2006. **Anais....** Porto Alegre: ABRH.

HORTON, R.E. (1919). Rainfall interception. **Monthly Weather Review**, v.47, n.9, p.608-623.

JACKSON, L.J. (1971). Problems of throughfall and interception assessment under tropical forest. **Journal of Hydrology**, v.12, p.234-254.

_____. (1975). Relationships between rainfall parameters and interception by tropical forest. **Journal of Hydrology**, v.24, p.215-238.

JACKSON, N.A. (2000). Measured and modelled rainfall interception loss from an agroforestry system in Kenya. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.100, p.323-336.

JACKSON, P.C. et al. (1999). Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian cerrado ecosystem. **Tree Physiology**, v.19, p.717-724.

JACKSON, R.B. et al. (2005). Trading water for carbon with biological carbon sequestration. **Science**, v.30, p.1944-1947.

JORDAN, C.F. (1978). Stem flow and nutrient transfer in a tropical rain forest. **Oikos**, v.31, p.257-263.

JORDAN, C.F.; HEUVELDOP, J. (1981). The Water budget of an Amazonian rain forest. **Acta Amazonica**, v.11, p.87-89.

- JORDAN, C.F.; KLINE, J.R. (1972). Mineral cycling: some basic concepts and their applications in a tropical rain forest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v.3, p.33-50.
- JUHÁSZ, C.E.P. et al. (2006). Dinâmica físico-hídrica de uma topossequência de solos sob savanna florestada (cerradão) em Assis, SP. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.30, p.401-412.
- _____. (2007). Savanna woodland soil micromorphology related to water retention. **Scientia Agricola**, v.64, p.344-354.
- KITAHARA, H. et al. (1995). Effects of vegetation for surface erosion. In: INTERNATIONAL SABO SYMPOSIUM, 1995, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: Japan Sabo Society. p.355-360.
- KOMATSU, H. (2007). Relationship between stem density and interception ratio for coniferous plantation forests in Japan. **Journal of Japanese Forestry Society**, v.89, p.217-220.
- KOMATSU, H.; KUME, T.; OTSUKI, K. (2009). Effects of coniferous plantation thinning on annual interception evaporation: model verification. **Journal of Japanese Forestry Society**, v.91, p.94-103.
- KRÄMER, I.; HÖLSCHER, D. (2009). Rainfall partitioning along a tree diversity gradient in a deciduous old-growth forest in Central Germany. **Ecohydrology**, v.2, p.102-114.
- KRONKA, F.N. et al. (1998). **Áreas de domínio do cerrado no Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente.
- KURAJI, K.; TANAKA, M. (2003). Rainfall interception studies in the tropical forests. **Journal of Japan Forest Society**, v.85, p.18-28.
- LARCHER, W. (2001). **Physiological plant ecology**: ecophysiology and stress physiology of functional groups. 4th ed. Berlin: Springer Verlag.
- LEONARD, R.E. (1961). **Interception of northern hardwoods**. Upper Darby: USDA. (Northeastern Forest Experiment Station Paper, 159).
- LEOPOLDO, P.R.; CONTE, M.L. (1985). Repartição da água de chuva em cobertura vegetal com características de cerradão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 6., 1985, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH. v.3, p.212-220.
- LEVIA, D.F.; FROST, E.F. (2003). A Review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forestes and agricultural ecosystems. **Journal of Hydrology**, v.274, p.1-29.
- LEVIA, D.F.; HERWITZ, S.R. (2005). Interspecific variation of bark eater storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soil. **Catena**, v.64, p.117-137.

LI, X. et al. (2009). Connecting ecohydrology and hydropedology in desert shrubs: stemflow as a source of preferential flow in soils. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.13, p.1133–1144.

LIANG, W.; KOSUGI, K.; MIZUYAMA, T. (2009a). A Three-dimensional model of the effect os stemflow on soil water dynamics around a tree on a hillslope. **Journal of Hydrology**, v.366, p.62-75.

_____. (2009b). Characteristics of stemflow for tall stewartia (*Stewartia monadelpha*) growing on a hillslope. **Journal of Hydrology**, v.378, p.168-178.

LIKENS, G.E.; EATON, J.S. (1970). A Polyurethane stemflow collector for trees and shrubs. **Ecology**, v.51, n.5, p.938-939.

LIMA, J.E.F.W; SILVA, E.M. (1998). Recursos hídricos do bioma cerrado: importância e situação. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC. p.91-106.

_____. (2007). Estimativa da contribuição hídrica superficial do cerrado para as grandes regiões hidrográficas brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais ...** Porto Alegre: ABRH.

_____. (2008). Análise da situação dos recursos hídricos do cerrado com base na importância econômica e socioambiental de suas águas. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CERRADO, 9./ SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE SAVANAS TROPICAIS, 2., 2008, Brasília. **Anais ...** PlanaltinaEMBRAPA Cerrados.

LIMA, W.P. (1976). Interceptação da chuva em povoamentos de eucalipto e pinheiro. **Revista do IPEF**, v.13, p.75-90.

_____. (1983a). Soil moisture regime in tropical pine plantations and in “cerrado” vegetation in the state of São Paulo, Brazil. **Revista do IPEF**, v.23, p.5-10.

LIMA, W.P. (1983b). Precipitação efetiva e interceptação em florestas de pinheiros tropicais e em reserva de cerradão. **Revista do IPEF**, n.24, p.43-46.

_____. (2008). **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2.ed. Piracicaba: Departamento de Ciências Florestais.

LIMA, W.P.; FREIRE, O. (1976). Evapotranspiração em plantações de eucalipto e pinheiro, e em vegetação herbácea natural. **Revista do IPEF**, v.12, p.103-117.

LIMA, W.P.; NICOLIELO, N. (1983). Precipitação efetiva e interceptação em florestas de pinheiros tropicais e em reserve de cerradão. **Revista do IPEF**, n.24, p.43-46.

LIMA, W.P. et al. (1990). Comparative evapotranspiration of *Eucalyptus*, pine and natural “cerrado” vegetation measure by the soil water balance method. **IPEF International**, v.1, p.5-11.

LINK, T.E.; UNSWORTH, M.; MARKS, D. (2004). The Dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.124, p.171-191.

LLORENS, P.; DOMINGO, F. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under mediterranean conditions. A review of studies in Europe. **Journal of Hydrology**, v.335, p.37-54.

LLORENS, P.; GALLART, F. (2000). A Simplified method for forest water storage capacity measurement. **Journal of Hydrology**, v.240, p.131-144.

LLOYD, C.R.; MARQUES-FILHO, A.O. (1988). Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.42, p.63-73.

LLOYD, C.R. et al. (1988). The Measurement and modelling of rainfall interception by Amazonian Rain Forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.43, p. 277-294.

LOURENÇÃO, A.; HONDA, E.A. (2007). Influência do reflorestamento com essências nativas sobre a infiltração da água e a velocidade do escoamento superficial. **Revista do Instituto Florestal Série Registros**, n.31, p.33-37.

MARIMON JUNIOR, B.H.; HARIDASAN, M. (2005). Comparação da vegetação arbórea e características edáficas de um cerradão e um cerrado *sensu stricto* em áreas adjacentes sobre solo distrófico no leste do Mato Grosso, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v.19, n.4, p.913-926.

MITCHELL, P.J. et al. (2009). Partitioning of evapotranspiration in a semi-arid eucalyptwoodland in south-western Australia. **Agricultural and forest meteorology**, v.149, p.25-37.

MOLINA, A.J.; CAMPO, A.D. (2012). The Effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: a contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations. **Forest Ecology and Management**, v.269, p.206-213.

MONTEITH, J.L. (1973). **Principles of environmental physics**. London: Edward Arnold.

MORO, M.J. et al. (1997a). Effect of the canopy of *Retama sphaerocarpa* on its understorey in a semiarid environment. **Functional Ecology**, v.11, n.4, p.425-431.

MORO, M.J. et al. (1997b). Mechanisms of interaction between a leguminous shrub and its understorey in a semi-arid environment. **Ecography**, v.20, p.175-184.

MOURA, A.E.S.S. et al. (2009). Interceptação das chuvas em um fragmento de floresta da Mata Atlântica na bacia do Prata, Recife, PE. **Revista Árvore**, v.33, n.3, p.461-469.

MUZYLO, A. et al. (2009). A Review of rainfall interception modeling. **Journal of Hydrology**, v.370, p.191-206.

NAKAKITA, O. et al. (1984). On The Rainfall pattern under the crown. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE FLORESTAL JAPONESA, 95., 1984. **Resumos...** Tokyo: Sociedade Florestal Japonesa, 1984. p.517. (Em japonês).

NALON, M.A.; VELLARDI, A.C. (1992). Interceptação na floresta secundária das encostas da Serra do Mar, região de Cubatão, SP. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, 2., 1992. **Anais...** [S.l.:s.n.]. p.894-899.

NANKO, K. et al. (2011). Spatial variability of throughfall under a single tree: experimental study of rainfall amount, raindrops, and kinetic energy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p. 1173–1182.

NÁVAR, J. (1993). The Causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. **Journal of Hydrology**, v.145, p.175-190.

_____. (2011). Stemflow variation in Mexico's northeastern forest communities: Its contribution to soil moisture content and aquifer recharge. **Journal of Hydrology**, v.408, p.35-42.

NÁVAR, J.; BRYAN, R. (1990). Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in Northeastern Mexico. **Journal of Hydrology**, v.115, p.51-63.

OCHIAI, H.; NAKAMURA, S. (2004). A Função da camada de serapilheira no controle da erosão do solo. In: BOAS, O.V.; DURIGAN, G. (Org.). **Pesquisas em conservação e recuperação ambiental no Oeste Paulista**: resultados da cooperação Brasil - Japão. São Paulo: Páginas & Letras. p.169-177.

OLIVEIRA, L.L. et al. (2008). Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia Oriental. **Acta Amazônica**, v.35, n.4, p.723-732.

_____. (2011). Sazonalidade e interceptação da chuva na Floresta Nacional em Caxiuanã, - Amazônia Oriental. **Scientia Plena**, v.7, n.10, p.1-14.

OLIVEIRA, R.S. et al. (2005a). Hydraulic redistribution in three amazonian trees. **Oecologia**, v.145, p.354-363.

OLIVEIRA, R.S. et al. (2005b). Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. **Functional Ecology**, v.19, p.574-581.

OLIVEIRA FILHO, A.T.; RATTER, J.A. (2002). Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado Biome. In: OLIVEIRA, P.S.; MARQUIS, R.J. (Org.). **The Cerrados of Brazil**: ecology and natural history of neotropical savanna. New York: Columbia University Press. p.91-120.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.C. (2006). **Precipitação efetiva em floresta estacional semidecidual na Reserva Mata do Araújo, Viçosa, Minas Gerais**. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

OLIVEIRA JÚNIOR, J.C.; DIAS, H.C.T. (2005). Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. **Revista Árvore**, v.29, n.1, p.9-15.

PADILLA, F.M.; PUGNAIRE, F. (2006). The Role of nurse plants in the restoration of degraded environments. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v.4, n.4, p.196–202.

PARK, A.; CAMERON, J.L. (2008). The Influence of canopy traits on throughfall and stemflow in five tropical trees growing in a Panamanian plantation. **Forest Ecology and Management**, v.255, p.1915–1925.

PINHEIRO, E.S. (2008). **Análises ecológicas e sensoriamento remoto aplicados à estimativa de fitomassa de cerrado na Estação Ecológica de Assis, SP**. 200 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

PINHEIRO, E.S.; DURIGAN, G. (2009). Dinâmica espaço-temporal (1962-2006) das fitofisionomias em unidade de conservação do cerrado no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v.32, n.3, p.441-454.

_____. (2012). Diferenças florísticas e estruturais entre fitofisionomias do cerrado em Assis, SP, Brasil. **Revista Árvore**, v.36, n.1, p.181-193.

PIVELLO, V.R. (2005). Manejo do fragmentos de cerrado: princípios para a conservação da biodiversidade. In: SCARIOT, A.; SILVA, J.C.S.; FELFILI, J.M. (Org.). **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação**. Brasília: MMA. p.401-413.

_____. (2011). The Use of fire in the cerrado and amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire Ecology**, v.7, n.1, p.24-39.

PIVELLO, V.R.; COUTINHO, L.M. (1996). A Qualitative successional model to assist in the management of Brazilian cerrados. **Forest Ecology and Management**, n.87, p.127-138.

PIVELLO, V.R.; NORTON, G.A. (1996). Firetool: an expert system for the use of prescribed fires in Brazilian savannas. **Journal of Applied Ecology**, v.33, p.348-356.

POPPENBORG, P.; HÖLSCHER, D. (2009). The Influence of emergent trees on rainfall distribution in a cacao agroforest (Sulawesi, Indonesia). **Flora**, v.204, p.730-736.

PORPORATO, A.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. (2002). Ecohydrology - a challenging multidisciplinary research perspective. **Hydrological Sciences Journal**, v.47, n.5, p.811-821.

PYPKER, T.G.; BOND, B.J.; UNSWORTH M.H. (2004). The Role of epiphytes in the interception and evaporation of rainfall in old-growth douglas-fir forests in the pacific northwest. In: CONFERENCE ON AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY, 26., 2004. **Proceedings...** Vancouver: [s.n.].

RAMOS-NETO, M.B.; PIVELLO, V.R. (2000). Lightning fires in a Brazilian Savanna National Park: rethinking management strategies. **Environmental Management**, v.26, n.6, p.675-684.

RATTER, J.A.; DARGIE, T.C.D. (1992). An Analysis of the floristic composition of 26 cerrado areas in Brazil. **Edinburg Journal of Botany**, v.49, p.235-250.

RATTER, J.A.; BRIDGEWATER, S.; RIBEIRO, F. (2006). Biodiversity patterns of the woody vegetation of the Brazilian Cerrado. In: PENNINGTON, R.T.; LEWIS, G.P.;

RATTER, J.A. (Ed.). **Neotropical savannas and seasonally dry forests**: plant diversity, biogeography and conservation London: Taylor & Francis. p.31-65.

RATTER, J.A. et al. (1988). Floristic composition and community structure of a southern cerrado area in Brazil. **Notes of Royal Botanic Garden**, v.45, p.137-151.

RAWITSCHER, F.K. (1948). The Water economy of the vegetation of the campos cerrados in southern Brazil. **Journal of Ecology**, n.26, p.237-268.

RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. (1998). Fitofisionomias do bioma cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. (Ed.). **Cerrado**: ecologia e flora. Planaltina: EMBRAPA-CPAC. p.89-166.

_____. (2008). As Principais fitofisionomias do bioma cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P.; RIBEIRO, J.F. (Ed.). **Cerrado**: ecologia e flora. Planaltina: EMBRAPA-CPAC. p.151-212.

ROCHA, H.R. et al. (2005). Caracterização física do cerradão Pé-de-Gigante e uso das terras na região. 4. Ciclo hidrológico e microclima. In: PIVELLO, V.; VARANDA, E.M. (Org.). **O Cerrado Pé-de-Gigante**: ecologia e conservação – Parque Estadual de Vassununga. São Paulo: SMA. Parte I, Cap.4, p.51-60.

RODRIGUES, V.A. (2009). Redistribuição das chuvas pelas copas de um povoamento de seringueira, José Bonifácio, SP. **Revista do Instituto Florestal**, v.21, p.19-26.

ROSSATO, D.V. et al. (2012). Depth of water uptake in woody plants relates to groundwater level and vegetation structure along a topographic gradient in a neotropical savanna. **Environmental and Experimental Botany**, v.77, p.259-266.

ROSSI, M. et al. (2005). Relação solos/vegetação em área natural no Parque Estadual de Porto Ferreira, São Paulo. **Revista do Instituto Florestal**, v.17, p.45-61.

RUBIN FILHO, C.D.; MORAES, J.A.P.V. (1998). Variação do potencial hídrico foliar e do crescimento em plantas jovens de espécies do cerrado. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ECOLOGIA, 8., 1998, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar. p.1047-1055.

RUGGIERO, P.G.C. et al. (2002). Soil-vegetation relationships in cerrado (Brazilian savanna) and semideciduous forest, Southeastern Brazil. **Plant Ecology**, v.160, p.1-16.

_____. (2006). Relação entre solo, vegetação e topografia em área de cerrado (Parque Estadual de Vassununga, SP): como se expressa em mapeamentos?. **Acta Botanica Brasilica**, v.20, p.383-394.

RUTTER, A.J. (1963). Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions 1: measurements of rainfall and interception. **Journal of Ecology**, v.51, p.191-203.

RUTTER, A.J.; MORTON, A.J.; ROBINS, P.C. (1975). A Predictive model of rainfall interception in forests II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. **Journal of Applied Ecology**, v.12, p.367-380.

RUTTER, A.J. et al. (1971). A Predictive model of rainfall interception in forests. I. derivation of the model of Corsican Pine. **Agricultural Meteorology**, v.9, p.367-384.

SALEMI, L.F. et al. (2011). Aspectos hidrológicos da recuperação florestal de áreas de preservação permanente ao longo dos corpos d'água. **Revista do Instituto Florestal**, v.23, n.1, p.69-80.

SAMBA, S.A.N.; CAMIRÉ, C.; MARGOLIS, H.A. (2001). Allmetry and rainfall interception of *Cordyla pinnata* in a semi-arid agroforestry parkland, Senegal. **Forest Ecology and Management**, v.154, p.277-288.

SANTOS, F.F.M.; MELO, A.C.G.; DURIGAN, G. (2007). Regeneração natural sob diferentes modelos de plantio de mata ciliar em região de cerrado, no município de Assis (SP). **Revista do Instituto Florestal, Série Registros**, v.31, p.225-228.

SÃO PAULO (Estado). (2009). Lei nº 13.550, de 02 de junho de 2009. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Cerrado no Estado. Disponível em < www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/lei>. Acesso em: 11 outubro de 2013.

SASSA, T.; HASEGAWA, K. (1992). Supression os soil acidification by the stem flow of some tree species: he case of yellow-poplar (tulip tree, *Liriodendron tulipifera*). **Journal of Japanese Forestry Society**, v.74, p.437-440.

SCHOLZ, F.G. et al. (2002). Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees. **Tree Physiology**, v.22, p.603-612.

SCHWÄRZEL, K.; EBERMANN, S.; SCHALLING, N. (2012). Evidence of double-funneling effect of beech trees by visualization of flow pathways using dye tracer. **Journal of Hydrology**, v.170-471, p.184-192.

SHINZATO, E.T. et al. (2011). Escoamento pelo tronco em diferentes povoamentos florestais na Floresta Nacional de Ipanema em Iperó, Brasil. **Scientia Forestalis** v.39, n.92, p.395-402.

SOUSA, R.S. et al. (2011). Redistribuição das chuvas pelas copas das árvores em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (Araucariaceae) no Parque Estadual da Serra do Mar, Cunha – SP. **Revista do Instituto Florestal**, v.23, p.27-28.

ŠRAJ, M.; BRILLY, M.; MIKOŠ, M. (2008). Rainfall interception by two deciduous mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.121–134.

STAN II, J.T.; LEVIA JR., D.F. (2010). Inter- and intraspecific variation of stemflow production from *Fagus grandifolia* Ehrh. (American beech) and *Liriodendron tulipifera* L. (yellow poplar) in relation to bark microrelief in the eastern United States. **Ecohydrology**, v.3, p.11–19.

STATSOFT INC. (2004). **Statistica**: data analysis software system - version 7.0.61. Tulsa.

STEINBUCK, E. (2002). **The Influence of tree morphology on stemflow in a redwood region second-growth forest**. 54 f. Dissertation (Master of Science) -Faculty of California State University, Chico, 2002.

STEPHENSON, N.L. (1990). Climatic control of vegetation distribution: the role of water balance. *The American Naturalist*, v.135, n.5, p.649-670.

SWANK, W.T.; SWIFT JR., L.W.; DOUGLASS, J.E. (1984). Streamflow changes associated with forest cutting, species conversion and natural disturbances. In: SWANK, W.T.; CROSSLEY JR., D.A. (Ed.). **Forest hydrology and ecology in Coweeta**. New York: Springer-Verlag. Cap.22, p.297-312.

THOMPSON, G.L. (1986). **Rainfall interception by Mesquite on the rolling plain of Texas**. 61 f. These (Ph.D.) - Texas Technology University, Texas, 1986.

TOBÓN MARIN, C.; BOUTEN, W.; SEVINK, J. (2000). Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*, v.237, p.40-57.

TOPPA, R.H. (2004). **Estrutura e diversidade florística das diferentes fisionomias de cerrado e suas correlações com o solo na Estação Ecológica de Jataí, Luis Antônio, SP**. 127 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

UBARANA, V.N. (1996). Observations and modelling of rainfall interception at two experimental sites in Amazonia. In: GASH, J.H. et al. (Ed.). **Amazonian deforestation and climate**. Chichester: John Wiley. p.151-162.

VERBEECK, H. et al. (2007). Stored water use and transpiration in scots pine: a modeling analysis with ANAFORE. *Tree Physiology*, v.27, p.1671-1685.

VERNIMMEN, P.R.E. et al. (2007). Rainfall interception in three contrasting lowland rain forest types in Central Kalimantan, Indonesia. *Journal of Hydrology*, v.340, p.217-232.

WALTER, B.M.T. et al. (2014). Fitofisionomias do cerrado: classificação, métodos e amostragens fitossociológicas. In: FELFILI, J.M. et al. (Ed.). **Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de casos**. Viçosa: Ed.UFV. v.2. Previsão de publicação: 2014.

WALTER, B.N.M.; CARVALHO, A.M.; RIBEIRO, J.F. (2008). O conceito de savana e de seu componente Cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. (Ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Planaltina: EMBRAPA-CPAC. p.21-45.

WALTER, H. (1986). **Vegetação e zonas climáticas: tratado de ecologia global**. São Paulo: Pedagógica e Universitária.

WANG, X.P. et al. (2011). Desert shrub stemflow and its significance in soil moisture replenishment. *Hydrology and Earth System Science*, v.15, p.561-567.

WARING, R.H.; RUNNING, S.W. (2007). **Forest Ecosystems**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier.

WARMING, E. (1973). Lagoa Santa. In: WARMING, E.; FERRI, M.G. **Lagoa Santa** - a vegetação de cerrados brasileiros. São Paulo: EDUSP; Belo Horizonte: Itatiaia. p.1-284.

WELTZIN, J.F.; MCPHERSON, G.R. (2000). Implications of precipitation redistribution for shifts in temperate savanna ecotones. **Ecology**, v.81, n.7, p.1902-1913.

WHELAN, M.J.; ANDERSON, J.M. (1996). Modelling spatial patterns of throughfall and interception loss in a Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale. **Journal of Hydrology**, v.186, p.335-354.

WHITFORD, W.G.; ANDERSON, J.; RICE, P.M. (1997). Stemflow contribution to the 'fertile island' effect in creosotebush, *Larrea tridentate*. **Journal of Arid Environments**, v.35, p.451-457.

WILM, H.G. (1943). Determining net rainfall under a conifer forest. **Journal of Agricultural Research**, v.67, n.12, p.501-512.

ZAKIA, M.J.B. (1987). **O Balanço hídrico, levando-se em conta o sistema solo-planta-atmosfera, de quatro tipos de coberturas vegetais na região de Grão Mogol, MG**. 1365 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

ZAR, J.H. (1999). **Biostatistical analysis**. 4thed. London: Prentice-Hall.

ZARNOCH, S.J.; ABRAHAMSON, D.A.; DOUGHERTY, P.M. (2002). **Sampling throughfall and stemflow in young loblolly pine plantations**. Asheville: United States Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. Research Paper SRS-27.

ZIEGLER, A.D. et al. (2009). Throughfall in an evergreen-dominated forest stand in northern Thailand: comparison of mobile and stationary methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.149, p.373-384.

ZINKE, P.J. (1962). The Pattern of influence of individual trees on soil profiles. **Ecology**, v.43, p.130-133.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Resumo das coletas e das características das chuvas envolvidas nas coletas registradas na estação meteorológica automatizada da APTA – Médio Paranapanema, no período compreendido entre outubro de 2010 a janeiro de 2012. Transprecipitação em mm correspondente a 908,5 mm de chuva. N: número de pluviômetros; ep: erro padrão; Imax e Imed: intensidade máxima e média das chuvas consideradas; tempo: somatório do tempo de duração de cada evento chuvoso envolvido na coleta; UR: umidade relativa do ar; T: temperatura do ar. (Continua)

características micrometeorológicas													
média dos dias considerados													
Velocidade													
características da chuva					Radição			T		Pi			
Data da coleta		média ± eP (mm)	n	Imax (mm h ⁻¹)	Imed (mm h ⁻¹)	tempo (horas)	média do vento (m s ⁻¹)	solar total (w m ⁻²)	UR (%)	(°C)	(mm)	(%)	
4	10	2010	44,4 ± 1,7	5	13,2	2,6	18	1,59	1.083,1	91,9	18,5	40,6	91,4
18	10	2010	36,2 ± 2,4	4	10,4	2,0	18	2,12	4.643,6	78,7	21,3	33,5	92,6
14	12	2010	41,8 ± 1,7	6	23,1	3,1	10	1,94	4.491,8	84,3	23,6	40,2	96,3
20	12	2010	23,5 ± 1,3	5	2,3	0,4	48	1,73	3.273,6	87,7	19,9	19,2	81,7
14	1	2011	13,8 ± 0,5	5	10,4	0,8	14	1,47	4.417,0	87,6	23,3	12,1	87,8
18	1	2011	23,7 ± 1,6	5	15,8	2,1	12	1,57	4.224,9	88,2	22,1	20,6	86,9
24	1	2011	78,5 ± 3,7	6	21,1	4,0	22	1,05	6.425,1	83,5	23,5	67,0	85,3
27	1	2011	22,4 ± 0,4	4	14,5	2,6	13	na	na	na	na	18,6	83,2
7	2	2011	41,4 ± 1,7	5	16,0	4,4	10	0,89	6.019,1	83,4	23,4	34,7	83,8
4	3	2011	29,2 ± 1,1	7	3,3	0,7	33	2,19	2.144,5	90,8	19,5	21,8	74,8
4	4	2011	29,6 ± 1,4	8	8,6	1,2	22	0,83	2.647,4	90,3	20,9	27,1	91,6
14	4	2011	74,1 ± 3,1	8	15,0	2,8	25	1,57	1.663,2	92,1	18,1	66,7	89,9
26	4	2011	12,9 ± 0,7	9	6,9	1,4	8	2,02	1.297,9	89,7	18,1	11,0	85,0
2	5	2011	5,8 ± 0,2	9	2,0	0,5	11	2,29	3.398,1	86,1	17,2	4,4	75,6
8	6	2011	16,9 ± 0,9	7	5,6	1,9	8	2,80	806,0	84,2	16,2	13,9	82,4

APÊNDICE A - Resumo das coletas e das características das chuvas envolvidas nas coletas registradas na estação meteorológica automatizada da APTA – Médio Parapanema, no período compreendido entre outubro de 2010 a janeiro de 2012. Transprecipitação em mm correspondente a 908,5 mm de chuva. N: número de pluviômetros; ep: erro padrão; Imax e Imed: intensidade máxima e média das chuvas consideradas; tempo: somatório do tempo de duração de cada evento chuvoso envolvido na coleta; UR: umidade relativa do ar; T: temperatura do ar. (Conclusão)

características da chuva					características micrometeorológicas				
					média dos dias considerados				
					Velocidade	Radiação		Pi	
					média do vento	solar total	UR	T	
					(m s ⁻¹)	(w m ⁻²)	(%)	(°C)	(mm) (%)
Data da coleta	média ± eP (mm)	n	Imax (mm h ⁻¹)	Imed tempo (horas)					
10 6 2011	32,8 ± 1,3	6	11,9	3,5	9	1,16	402,6	94,4	12,4 26,1 79,7
25 7 2011	12,6 ± 0,6	9	4,8	1,0	10	1,65	2.004,7	81,3	19,4 11,9 94,5
3 8 2011	15,6 ± 0,6	9	4,8	0,6	22	1,31	1.988,8	86,0	16,1 12,8 82,0
24 8 2011	15,3 ± 0,7	7	4,6	0,5	23	2,12	2.014,8	83,4	16,5 13,5 87,8
10 10 2011	35,8 ± 0,9	6	5,8	2,4	13	1,99	2.926,3	79,6	21,5 35,3 98,5
13 10 2011	35,8 ± 0,0	3	7,6	1,9	17	1,77	4.323,4	83,8	22,2 35,1 97,9
26 10 2011	22,2 ± 1,1	6	16,0	2,3	9	1,66	2600,8	86,7	20,0 19,0 86,0
16 11 2011	69,7 ± 2,3	7	9,9	1,4	56	1,95	2564,0	88,4	19,4 49,7 71,3
23 11 2011	9,4 ± 0,2	6	4,1	1,3	7	2,63	5747,6	76,0	22,1 8,7 93,5
2 1 2012	99,3 ± 5,5	7	9,9	2,2	33	1,08	4883,7	87,0	22,0 84,8 85,4
26 1 2012	66,1 ± 1,7	6	8,6	2,2	27	-	-	-	50,4 76,3
total	908,5								778,5

APÊNDICE B -- Transprecipitação medida em 15 parcelas com diferentes fisionomias de cerrado na Estação Ecológica de Assis no período de outubro de 2010 a janeiro de 2012 para uma precipitação total correspondente de 908,5 mm. ct: cerrado típico; cd: cerrado denso; C:cerradão. Em negrito: menor e maior valores.

Parcela	fisionomia	transprecipitação	
		(mm)	(%)
1	cd	789,8	87,0
2	cd	793,3	87,4
3	ct	872,8	96,1
5	ct	882,1	97,2
6	cd	805,3	88,7
7	cd	837,1	92,2
8	cd	831,0	91,5
13	cd	855,5	94,2
16	cd	789,4	87,0
18	cd	722,3	79,6
26	C	786,8	86,7
29	C	591,7	65,2
32	C	736,7	81,1
33	C	682,5	75,2
34	C	701,6	77,3

APÊNDICE C- Caracterização estrutural da comunidade vegetal em 15 parcelas ao longo do gradiente fisionômico do Cerrado, nas quais foi realizada a quantificação da transprecipitação. ct: cerrado típico; cd: cerrado denso; C: cerradão. *dg**: diâmetro equivalente.

Parcela	fisionomia	Densidade de árvores (ind ha ⁻¹)	média	Área basal (m ² ha ⁻¹)	Biomassa aérea Mg ha ⁻¹
			altura ± erro (m)		
3	ct	1090	5,4±0,17	7,5	1,76
5	ct	1040	5,4±0,17	9,9	2,34
2	cd	1370	7,2±0,20	11,0	3,27
13	cd	1190	5,1±0,16	11,4	2,51
16	cd	1280	5,8±0,17	12,9	3,26
7	cd	1870	7,0±0,14	13,3	3,83
6	cd	1570	6,5±0,18	15,5	4,18
8	cd	2080	6,9±0,14	16,1	4,46
1	cd	1990	6,0±0,16	16,5	4,48
18	cd	1580	7,6±0,16	18,0	5,28
29	C	1850	9,8±0,20	21,5	10,58
26	C	1360	10,6±0,24	22,6	12,29
32	C	2150	10,9±0,16	22,8	11,78
33	C	1840	11,2±0,27	26,4	15,94
34	C	2120	10,4±0,23	26,9	14,87

APÊNDICE D - -Espécies arbóreas e número de indivíduos amostrados para quantificação de escoamento pelo tronco na Estação Ecológica de Assis, SP. (Continua)

FAMÍLIA espécie	fisionomia			total
	c. típico	c. denso	cerradão	
ANACARDIACEAE				
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.			3	3
ANNONACEAE				
<i>Annona crassiflora</i> Mart.	1			1
<i>Xylopia aromatica</i> (Lam.) Mart.	2	1	2	5
ARECACEAE				
<i>Syagrus romanzoffiana</i> (Cham.) Glassman			1	1
ASTERACEAE				
<i>Gochnatia polymorpha</i> (Less.) Cabrera	3			3
BIGNONIACEAE				
<i>Tabebuia aurea</i> (Silva Manso) Benth & Hook.f. ex S.Moore	1			1
<i>Tabebuia ochracea</i> (Cham.) Standl	4			4
BOMBACACEAE				
<i>Eriotheca gracilipes</i> (K.Schum.) A.Robyns	3	3		6
BURSERACEAE				
<i>Protium heptaphyllum</i> (Aubl.) Marchand			9	9
COMBRETACEAE				
<i>Terminalia glabrescens</i> Mart.			1	1
EUPHORBIACEAE				
<i>Mabea fistulifera</i> Mart.			4	4
<i>Maprounea guianensis</i> Aubl.			1	1
<i>Pera obovata</i> (Klotzsch) Baill.	2		2	4
FABACEAE				
<i>Acosmium subelegans</i> (Mohlenbr.) Yakovlev	1			1
<i>Anadenanthera falcata</i> (Benth.) Speg.	1		2	3
<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.			5	5
<i>Dimorphandra mollis</i> Benth.	2			2
<i>Machaerium acutifolium</i> Vogel	4		2	6
<i>Stryphnodendron obovatum</i> Benth.	1	1		2
LAURACEAE				
<i>Ocotea corymbosa</i> (Meisn.) Mez.	18	5	5	28
MONIMIACEAE				
<i>Siparuna guianensis</i> Aubl.			2	2
MYRTACEAE				
<i>Myrcia guianensis</i> (Aubl.) DC.	2			2
<i>Myrcia lingua</i> (O. Berg) Mattos & D. Legrand	2			2
<i>Myrcia multiflora</i> (Lam.) DC.			2	2
<i>Myrciaria delicatula</i> (DC.) O. Berg	1			1
<i>Psidium firmum</i> O. Berg	1			1
OCHNACEAE				
<i>Ouratea spectabilis</i> (Mart. ex Engl.) Engl.	1			1

APÊNDICE D - -Espécies arbóreas e número de indivíduos amostrados para quantificação de escoamento pelo tronco na Estação Ecológica de Assis, SP. (Conclusão)

FAMÍLIA <i>espécie</i>	fisionomia			total
	c. típico	c. denso	cerradão	
RUBIACEAE				
<i>Amaioua intermedia</i> Mart.			5	5
<i>Faramia montevidensis</i> (Cham. & Schltdl) DC.			4	4
SAPOTACEAE				
<i>Pouteria laurifolia</i> (Gomes) Radlk			1	1
SYMPLOCACEAE				
<i>Symplocos mosenii</i> Brand	1			1
VOCHYSIACEAE				
<i>Psychotria</i> sp			1	1
<i>Qualea grandiflora</i> Mart.	2		1	3
<i>Vochysia tucanorum</i> Mart.	13			13
Total geral	66	10	53	129