

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS

RAUL SAMPAIO DE LIMA

**FATORES DE VARIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO INTERNA  
EM UMA FLORESTA SECUNDÁRIA**

São Carlos/SP

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS

**FATORES DE VARIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO INTERNA  
EM UMA FLORESTA SECUNDÁRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais.

Orientação: Prof. Dr. Marcel Okamoto Tanaka  
Co-orientação: Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt

São Carlos/SP

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

---

Folha de Aprovação

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Raul Sampaio de Lima, realizada em 05/07/2017:

---

Prof. Dr. Marcel Okamoto Tanaka  
UFSCar

---

Profa. Dra. Kelly Cristina Tonello  
UFSCar

---

Prof. Dr. Robson Willians da Costa Silva  
EEP

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Elaine e Sergio, e a minha irmã, Karina, pelo apoio e incentivo para completar (sem maiores prejuízos psicológicos) mais essa etapa.

Aos meus orientadores, Marcel Tanaka e Vandoir Bourscheidt, pelo apoio e incentivo durante a realização da pesquisa e, principalmente, pela paciência com as frequentes dúvidas e correções de textos.

À Secretaria e aos docentes do Programa de Pós-Graduação de Ciências Ambientais pelos ensinamentos e apoio durante esse período.

A todos os que contribuíram de alguma forma nas saídas de campo, em especial ao Alexandre, Camila, Dani, Gabriel (Doidinho), Liseth, Lu, Nicolas, Rai e Roger, com contribuições, inclusive, aos finais de semana.

Aos amigos da Pós, Ana Elisa, Ana Marotti, Cris, Fabíola, Ivo, Jana, Luiza, Mari e Thaísa, além daqueles que ajudaram em campo, pelo convívio, descontração e aprendizado.

À Turma de “Ecologia de Ecossistemas para Gestão Ambiental” do 2º semestre de 2015, Catarina e Alexandre pelos materiais e ajuda na montagem do experimento.

Aos Profs. Juliano Gonçalves, Patrícia Falco e Renata Peres pela disponibilidade, participação e contribuições na Banca da Aula de Qualificação.

Aos Profs. Valdir de Cicco, pelas críticas e sugestões na pré-banca, e Kelly Tonello, Robson Silva, pela participação na banca de defesa, auxiliando a qualificação da pesquisa.

Por fim, à CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

## RESUMO

A precipitação interna (PI) é afetada por diferentes fatores bióticos e meteorológicos que podem interagir entre si, resultando numa elevada variabilidade em suas estimativas, aumentando a incerteza em modelos hidrológicos e na previsão de impactos ambientais em bacias hidrográficas. A compreensão da relação entre a precipitação em aberto (PA) e a PI é importante para a definição de estratégias de amostragem com limiares de erros aceitáveis. Portanto, o objetivo geral deste estudo foi analisar os fatores de variação da PI em uma floresta secundária, localizada no sudeste brasileiro, a fim de compreender o comportamento desse processo em função de diferentes fatores ambientais e de estratégias de amostragem. Para isto, foram analisadas as influências da PA, das estratégias de amostragem e da estrutura da vegetação sobre a PI. Os resultados indicaram influência significativa da PA sobre as variáveis resposta [volume de PI ( $PI_{mm}$ ), fração de PI ( $PI_{\%}$ ) e coeficiente de variação da PI ( $CV_{PI}$ )]. Enquanto o modelo linear apresentou o melhor ajuste para  $PI_{mm}$ , os modelos não lineares tiveram melhores ajustes para  $PI_{\%}$  e  $CV_{PI}$  em função de PA. Quanto à influência das estratégias de amostragem, não houve efeitos significativos sobre as estimativas médias de  $PI_{mm}$  e  $CV_{PI}$ . Com base na magnitude do erro, apenas tratamentos com 16 pluviômetros fixos e nove rotativos foram capazes de fornecer estimativas com erros inferiores a 10%, tanto para o conjunto completo de dados quanto para chuvas superiores a 10,44 mm (valor mediano). Os resultados sugerem que diferentes estruturas da vegetação afetam a  $PI_{mm}$  em diferentes escalas espaciais. Por exemplo, foi verificado efeito significativo da cobertura do dossel sobre as estimativas pontuais de  $PI_{mm}$ . No entanto, não foram verificadas influências da vegetação sobre esta variável na escala da parcela. Em relação à variabilidade temporal, verificaram-se efeitos significativos nas duas escalas: da distância para o tronco mais próximo na pontual; e de métricas de árvores maiores que 20 m na escala parcela. Por fim, verificou-se que os efeitos combinados do tamanho das árvores e da cobertura do dossel influenciaram  $CV_{PI}$ , indicando que essas variáveis refletem a complexidade da vegetação. Em geral, os resultados sugerem que PA é a principal fonte de variabilidade de PI na área estudada. Portanto, é necessário considerar características meteorológicas e dos eventos de chuva para amostrar a PI com precisão adequada. Contudo, as interações entre fatores bióticos e meteorológicos afetam suas influências relativas sobre a PI, destacando a necessidade de mais pesquisas nessa área.

**Palavras-chave:** desenho experimental; ecossistema tropical; estabilidade temporal; pluviômetros rotativos; variabilidade espacial.

## ABSTRACT

Throughfall (TF) is affected by different biotic and meteorological factors that can interact, resulting in high variability in estimates, increasing the uncertainty in hydrological models and the forecast of environmental impacts in watersheds. The knowledge of the relationship between rainfall (RF) and TF is a key factor for the definition of sampling strategies that result within commonly accepted error thresholds. Therefore, the main objective of this study was to analyze sources of TF variability in a secondary forest in SE Brazil, in order to understand the response of TF in function of different environmental drivers and sampling strategies. To attain these objectives, the influences of RF, sampling strategies, and stand structure on TF were analysed. The results indicated significant influence of RF on the response variables [TF volume ( $TF_{mm}$ ), TF fraction ( $TF_{\%}$ ), and coefficient of variation of TF ( $CV_{TF}$ )]. Whereas the linear model showed the best fit for  $TF_{mm}$ , nonlinear models presented better fits for  $TF_{\%}$  and  $CV_{TF}$  in response to RF. Regarding the influence of sampling strategies, there were no significant effects on average estimates of  $TF_{mm}$  and  $CV_{TF}$ . Based on the magnitude of the error, only treatments with 16 fixed gauges and nine roving gauges were able to provide estimates with errors smaller than 10%, both for all rainfall events and for those higher than 10.44 mm (median value). The results suggest that different vegetation structures affect  $TF_{mm}$  at different spatial scales. For instance, a significant effect of canopy cover was observed on the point estimates of  $TF_{mm}$ . However, no vegetation influences on this variable were observed at the plot scale. Regarding the temporal variability, significant effects were verified at two scales: distance to the nearest trunk at the point scale; and metrics of trees greater than 20 m at the plot scale. Finally, it was verified that combined effects of tree sizes and canopy cover influenced  $CV_{TF}$ , indicating that these variables reflect vegetation complexity. In general, the results suggest that RF is the main source of TF variability in the studied area. Therefore, it is necessary to consider both meteorological factors and characteristics of rainfall events to sample TF with adequate accuracy. Nevertheless, the interactions between biotic and meteorological factors affect their relative influences on TF, highlighting the need for further research in this area.

**Keywords:** experimental design; roving gauges; spatial variability; temporal stability; tropical ecosystem.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo e distribuição das parcelas de monitoramento de precipitação interna (PI) e pluviômetros de precipitação em aberto (PA). .....	10
Figura 2: Representação esquemática da distribuição dos pluviômetros no interior das parcelas para testar a influência da precipitação em aberto sobre as estimativas de precipitação interna .....	12
Figura 3: Histograma dos valores de precipitação em aberto (PA) amostrados pelos pluviômetros de polietileno tereftalato. ....	15
Figura 4: Gráfico de dispersão dos dados registrados de precipitação em aberto (PA) pelos pluviômetros de polietileno tereftalato (eixo X) e pela estação automática do município (eixo Y). ....	16
Figura 5: Regressão linear da $PI_{mm}$ em função da precipitação em aberto, utilizando os dados médios por parcela. ....	17
Figura 6: Regressão linear da $PI_{\%}$ em função da precipitação em aberto, utilizando os dados médios por parcela. ....	17
Figura 7: Regressão linear do $CV_{PI}$ em função da precipitação em aberto, utilizando os dados médios por parcela. ....	18
Figura 8: Representação gráfica dos modelos ajustados para a relação entre a precipitação em aberto (PA) e o volume de precipitação interna [ $PI(mm)$ ]. ....	25
Figura 9: Representação gráfica dos modelos ajustados para a relação entre a precipitação em aberto (PA) e a fração de precipitação interna [ $PI(\%)$ ]. ....	27
Figura 10: Representação gráfica dos modelos ajustados para a relação entre a precipitação em aberto (PA) e o coeficiente de variação da precipitação interna (CV). ....	29
Figura 11: Representação esquemática da distribuição dos pluviômetros usada para avaliar os efeitos da quantidade de pluviômetros sobre as estimativas de precipitação interna .....	39
Figura 12: Exemplo de seleção aleatória de nove pluviômetros para o arranjo rotativo (direita) a partir das 16 posições possíveis (esquerda), derivadas do Tratamento C para o teste da Questão 1. ....	40
Figura 13: Representação esquemática da distribuição dos pluviômetros para avaliar o efeito do tamanho das parcelas sobre as estimativas de precipitação interna .....	40
Figura 14: Localização das parcelas de amostragem da precipitação e de levantamento da estrutura da vegetação na área de estudo. ....	54
Figura 15: Distribuição espacial dos pluviômetros utilizados para a estimativa da estabilidade temporal da precipitação interna .....	56
Figura 16: Distribuição espacial dos pluviômetros para a obtenção da estimativa média da precipitação interna para as análises na escala da parcela. ....	56
Figura 17: Exemplo do procedimento de processamento das fotografias para a estimativa da fração de cobertura do dossel. ....	57
Figura 18: Exemplo do procedimento de processamento das fotografias do dossel registradas pelo Solar Pathfinder para a estimativa da fração de cobertura do dossel. ....	58
Figura 19: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 1 .....	62
Figura 20: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 2 .....	62

Figura 21: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 3 .....	63
Figura 22: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 4 .....	63
Figura 23: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 5 .....	64
Figura 24: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 6 .....	64
Figura 25: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna nas Parcelas .....	65
Figura 26: Ordenação das parcelas de amostragem de precipitação interna em relação aos dois primeiros eixos ( $E1_T$ e $E2_T$ ) da ACP baseada nos dados completos de estrutura da vegetação .....	69
Figura 27: Ordenação das parcelas de amostragem de precipitação interna em relação aos dois primeiros eixos ( $E1_{<20}$ e $E2_{<20}$ ) da ACP baseada nos dados de árvores menores que 20 m. ...	69
Figura 28: Ordenação das parcelas de amostragem de precipitação interna em relação aos dois primeiros eixos ( $E1_{>20}$ e $E2_{>20}$ ) da ACP baseada nos dados de árvores maiores que 20 m. ....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo dos modelos ajustados à relação entre precipitação em aberto (PA), volume de precipitação interna ( $PI_{mm}$ ), fração de precipitação interna ( $PI_{\%}$ ) e seu coeficiente de variação ( $CV_{PI}$ ). .....	8
Tabela 2: Valores de volume d'água (mm) referentes à precipitação em aberto (PA) e à precipitação interna (PI) por parcela.....	14
Tabela 3: Resultado do ajuste e parâmetros estimados dos modelos para as relações entre os dados de precipitação interna e precipitação em aberto.....	19
Tabela 4: Resumo das estimativas médias ( $PI_{\%}$ ) e de variabilidade ( $CV_{PI}$ ) da precipitação interna obtidas em pesquisas científicas. ....	22
Tabela 5: Resumo das estratégias de amostragem utilizadas para a medição da precipitação interna em estudos tropicais .....	34
Tabela 6: Resumo dos resultados da ANCOVA para avaliar o efeito das diferentes estratégias de amostragem sobre as estimativas de precipitação interna de acordo com as diferentes questões (definidas anteriormente) .....	42
Tabela 7: Descritores dos conjuntos de dados obtidos para as estratégias com diferentes tamanhos amostrais.....	43
Tabela 8: Descritores dos conjuntos de dados obtidos para as estratégias com diferentes arranjos espaciais .....	44
Tabela 9: Descritores dos conjuntos de dados obtidos para as estratégias com parcelas de diferentes tamanhos .....	44
Tabela 10: Resumo das variáveis de estrutura da vegetação das parcelas de amostragem da precipitação interna.....	66
Tabela 11: Resultados da ACP avaliando os dados completos de estrutura da vegetação na área de estudo. ....	67
Tabela 12: Resultados da ACP avaliando os dados de estrutura da vegetação na área de estudo, estimados a partir de indivíduos menores que 20 m de altura.....	67
Tabela 13: Resultados da ACP avaliando os dados de estrutura da vegetação na área de estudo, estimados a partir de indivíduos maiores que 20 m de altura. ....	68

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL .....	1
2	INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO EM ABERTO SOBRE A VARIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO INTERNA .....	6
2.1	Introdução.....	6
2.2	Material e métodos .....	10
2.2.1	Área de estudo .....	10
2.2.2	Amostragem .....	11
2.2.3	Análise de dados.....	12
2.3	Resultados.....	14
2.4	Discussão .....	19
2.5	Conclusão .....	31
3	INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS DE AMOSTRAGEM SOBRE A VARIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO INTERNA .....	33
3.1	Introdução.....	33
3.2	Material e métodos .....	38
3.2.1	Área de estudo .....	38
3.2.2	Amostragem .....	38
3.2.3	Análise de dados.....	41
3.3	Resultados.....	41
3.4	Discussão .....	45
3.5	Conclusão .....	49
4	INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO SOBRE A VARIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO INTERNA .....	51
4.1	Introdução.....	51
4.2	Material e métodos .....	54
4.2.1	Área de estudo .....	54
4.2.2	Amostragem .....	55
4.2.3	Análise de dados.....	59
4.3	Resultados.....	61
4.4	Discussão .....	73
4.5	Conclusão .....	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	82
6	REFERÊNCIAS .....	85

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As florestas tropicais são ecossistemas dinâmicos, que respondem de maneira complexa às influências de distúrbios naturais (e.g. erupções, enchentes, tempestades) e antrópicos (e.g. cultivo agrícola, extração de madeira, desflorestamento), alterando suas características estruturais e composicionais de acordo com a magnitude destes fenômenos. As florestas secundárias são áreas afetadas intensamente por distúrbios, porém com capacidade para recuperação natural. Estas florestas se desenvolvem após remoção da vegetação original, ocorrendo, posteriormente, sua regeneração. Em contraposição às florestas primárias, que são relativamente estáveis em termos estruturais e de composição, as florestas secundárias estão em processo de desenvolvimento estrutural e funcional, não apresentando o mesmo grau de complexidade e resiliência de florestas em estágios mais avançados (CHAZDON, 2014).

Os distúrbios que ocorrem nessas áreas modificam a estrutura da vegetação e a cobertura do solo, afetados pela mortalidade de árvores nesses ecossistemas. Apesar de ser um processo intrínseco de áreas florestais, a magnitude dos distúrbios pode aumentar consideravelmente a quantidade e distribuição espacial de clareiras, a ponto de alterar o funcionamento do ecossistema, com implicações no microclima e na hidrologia (SCATENA; PLANOS-GUTIERREZ; SCHELLEKENS, 2005).

A influência das florestas sobre o ciclo hidrológico ocorre a partir das interações entre a estrutura da floresta e componentes das plantas (caules, ramos, raízes, folhas) e do meio físico (margem do corpo hídrico, substrato), modificando, principalmente, a forma em que processos como precipitação, infiltração e escoamento se desenvolvem (BALBINOT et al., 2008; NAIMAN; DÉCAMPS, 1997; TABACCHI et al., 2000).

Numa escala regional, a cobertura florestal é capaz de alterar a vazão de bacias hidrográficas. A influência desse tipo de cobertura é atribuída ao consumo de água por esse tipo de vegetação (BALBINOT et al., 2008; LIMA, 2008), à alteração de outros processos hidrológicos (e.g. evapotranspiração; WANG et al., 2011), assim como a mudanças nas características do solo, que incrementam os processos de infiltração, de percolação e de armazenamento de água no solo (ÁVILA et al., 2014).

Em escalas locais, a vegetação tem influência na repartição da água da chuva em interceptação, escoamento pelo tronco e precipitação interna (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006), influenciando, assim, as taxas de infiltração e

escoamento superficial (OLIVEIRA et al., 2008). A precipitação interna constitui a fração da precipitação em aberto que alcança o piso florestal, entrando em contato ou não com os componentes da vegetação. Este componente do ciclo hidrológico apresenta elevado grau de variabilidade temporal e espacial (BALBINOT et al., 2008; LIMA, 2008), devido à interação de fatores bióticos e meteorológicos, que atuam mutuamente sobre a partição da precipitação (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006).

Os fatores meteorológicos determinam como a precipitação em aberto é iniciada e repartida em precipitação interna e nos demais processos (STAELENS et al., 2008). Crockford e Richardson (2000) destacam que o volume precipitado, a duração e intensidade dos eventos de chuva, a temperatura e umidade do ar, e a velocidade e direção dos ventos são os principais fatores meteorológicos que afetam a precipitação interna. Por exemplo, o volume de precipitação em aberto determina a proporção de água que permanece retida nas superfícies vegetais durante os eventos de chuva (AHMADI; ATTAROD; BAYRAMZADEH, 2013), afetando a distribuição de água.

Simultaneamente, os fatores bióticos influenciam a precipitação interna pela alteração da distribuição de superfícies vegetais com potencial para interceptar uma quantidade da precipitação em aberto (CHAPPELL; BIDIN; TYCH, 2001). Em termos espaciais, a principal influência da vegetação é atribuída às diferenças na capacidade de armazenamento do dossel (CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE, 2014), resultando em locais com diferentes níveis de saturação e afetando a passagem de água da atmosfera para o piso florestal. Entre os fatores bióticos que influenciam a precipitação interna, destacam-se a arquitetura e estrutura do dossel, e a composição de espécies (ÁVILA et al., 2014; CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006).

Estes fatores afetam a variação da precipitação interna em escalas temporais e espaciais distintas. Por exemplo, os fatores meteorológicos podem afetar a variabilidade da precipitação interna dentro de um mesmo evento de chuva, atuando em escalas temporais e espaciais reduzidas (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000). Por exemplo, a variação da velocidade do vento em um evento de chuva pode gerar a liberação diferenciada da água retida nas superfícies vegetais, aumentando a contribuição para a precipitação interna (VAN STAN; GAY; LEWIS, 2016). Já os fatores biológicos, como a cobertura do dossel, apresentam mudanças sazonais em função de alterações climáticas, influenciando a variação da precipitação interna nessa mesma escala temporal (ÁVILA et al., 2014; STAELENS et al.,

2008), e apresentando, portanto, maior estabilidade do que fatores meteorológicos (LEVIA; FROST, 2006; WULLAERT et al., 2009).

A variabilidade promovida por fatores naturais também pode afetar a precisão das estimativas de precipitação interna, propagando erros continuamente nas estimativas derivadas desses dados (CARLYLE-MOSES; LISHMAN, 2015). Nesse sentido, a minimização dos erros relacionados às estratégias de amostragem é um fator chave para a obtenção de estimativas de maior qualidade (RODRIGO; ÀVILA, 2001). Desta forma, a seleção de uma estratégia de amostragem apropriada envolve o conhecimento da complexidade da estrutura da vegetação e das características meteorológicas da região estudada (RITTER; REGALADO, 2014; ZIMMERMANN et al., 2016).

Devido à sua variação espacial e temporal, a precipitação interna também contribui para a ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais. A influência desse processo sobre esses ciclos pode se desenvolver pela deposição direta da precipitação no solo e pela lixiviação de compostos presentes nos troncos e nas copas (KOWALSKA et al., 2016; OZIEGBE; MUOGHALO; OKE, 2011; PEREZ-MARIN; MENEZES, 2008). Além disso, o gradiente de umidade no solo gerado pela heterogeneidade espacial desse processo promove o aumento da biodiversidade microbiana do solo (ROSIER et al., 2015), afetando indiretamente outros processos nesse compartimento.

As atividades antrópicas (e.g. produção agrícola, expansão de centros urbanos, queimadas, introdução de espécies exóticas) possuem potencial para impactar negativamente a qualidade ambiental de ecossistemas naturais, prejudicando o desempenho de vários processos e ciclos (e.g. ciclo hidrológico, ciclo de nutrientes). O recente crescimento da população tem intensificado a degradação desses ecossistemas, afetando o desempenho de suas funções ecológicas (CHAZDON, 2014; HOLANDA et al., 2005; TABACCHI et al., 2000; VOGEL; ZAWADSKI; METRI, 2009).

Os efeitos dessas alterações sobre a composição e estrutura de florestas influenciam significativamente a distribuição da precipitação em aberto nesses ecossistemas. A perturbação desses ambientes reduz a quantidade de água que penetra o dossel, por mudar a capacidade armazenamento de água no dossel e no sub-bosque. Dessa forma, florestas degradadas tendem a produzir menor quantidade de água do que florestas conservadas (CHAPPELL; BIDIN; TYCH, 2001).

Diante deste cenário de degradação, há necessidade de estudos para compreender a estrutura e o funcionamento de ecossistemas naturais, e para subsidiar estratégias para a recuperação e o manejo dessas áreas (PALMER; FILOSO; FANELLI, 2014). A compreensão e entendimento da relação entre a precipitação interna e os fatores que afetam sua variabilidade têm papel fundamental para a gestão de bacias hidrográficas, controle da erosão do solo e da ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005; LEVIA; FROST, 2006; RODRIGO; ÀVILA, 2001; SOUSA et al., 2016). Quando estabelecidas as interações entre essas variáveis, é possível modelar outros processos hidrológicos associados (i.e. interceptação pelo dossel; PYPKER et al., 2005; ZOU et al., 2015), a partir de estimativas com o nível de precisão necessário, facilitando a adoção de ações de manejo mais efetivas.

Dessa forma, o manejo da precipitação interna em ecossistemas florestais constitui uma importante ferramenta de manejo hidrológico de bacias hidrográficas (SOUSA et al., 2016). Alterações em ecossistemas naturais afetam esses processos, gerando implicações na quantidade e qualidade da água disponível (BALBINOT et al., 2008; CHUAN, 2003; NAIMAN; DÉCAMPS, 1997; TABACCHI et al., 2000). Portanto, o conhecimento das características e dinâmicas dos processos hidrológicos em ecossistemas florestais pode fornecer subsídios para uma gestão mais eficiente de bacias hidrográficas, de modo a garantir o fornecimento de água em quantidade e qualidade necessárias para o abastecimento de atividades humanas.

Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo foi analisar os fatores de variabilidade da precipitação interna em uma floresta secundária dominada por *Pinus elliottii* var. Engelm. no sudeste brasileiro, a fim de compreender o comportamento desse processo em função de diferentes fatores e fornecer subsídios para o manejo e conservação de áreas florestais.

O Capítulo 2 teve como objetivo analisar a influência da precipitação em aberto sobre a variação das estimativas de precipitação interna, buscando associar o a distribuição da precipitação interna ao padrão de chuvas típico da região. Especificamente, se propõe a responder: (1) qual o padrão de distribuição espacial e temporal da precipitação em aberto na área de estudo? (2) o volume de precipitação em aberto influencia o volume de precipitação interna e sua fração em relação à precipitação em aberto? (3) a variabilidade espacial da precipitação interna é influenciada pela precipitação em aberto? e (4) qual modelo melhor descreve a relação entre as variáveis da precipitação interna e a precipitação em aberto?

O Capítulo 3 analisou, com base em dados empíricos, a influência de estratégias de amostragem sobre as estimativas de precipitação interna, discutindo as implicações da utilização de diferentes estratégias e buscando fornecer subsídios para a seleção de uma estratégia mais eficiente e precisa para a estimativa desta variável em áreas semelhantes à estudada. Nesse contexto, foram formulados os seguintes questionamentos: (1) a quantidade de pluviômetros influencia as estimativas de precipitação interna? (2) o arranjo dos pluviômetros influencia as estimativas de precipitação interna? (3) o tamanho da parcela influencia as estimativas de precipitação interna? e (4) diferenças nas estratégias de amostragem influenciam a precisão das estimativas de precipitação interna?

Por fim, o Capítulo 4 teve como objetivo avaliar a influência da estrutura da vegetação sobre a variabilidade das estimativas de precipitação interna, a fim de identificar características da vegetação que afetam o desenvolvimento desse processo, fornecendo subsídios para ações de manejo hidrológicamente mais eficientes. Desta forma, as questões a seguir foram discutidas: (1) como ocorre a variação temporal da precipitação interna entre os eventos de chuva? (2) a estrutura da vegetação tem efeito sobre as estimativas de precipitação interna? (3) a estrutura da vegetação tem efeito sobre a variabilidade temporal da precipitação interna? e (4) a estrutura da vegetação tem efeito sobre a variabilidade espacial da precipitação interna?

## **2 INFLUÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO EM ABERTO SOBRE A VARIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO INTERNA**

### **2.1 Introdução**

Os processos hidrológicos em ecossistemas florestais são compostos, principalmente, por precipitação interna, escoamento pelo tronco e interceptação pela copa, e possuem forte relação com os fatores meteorológicos que acompanham os eventos de chuva. Nesses ecossistemas, tais fatores exercem controle tanto no fluxo da água, por meio do controle da partição e do armazenamento de frações da água precipitada (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000), quanto no de nutrientes, através da lixiviação, dissolução e transporte de compostos presentes na atmosfera e superfícies vegetais (LEVIA; FROST, 2006; OZIEGBE; MUOGHALU; OKE, 2011). Dessa maneira, as características meteorológicas dos eventos de chuva definem a variabilidade espacial e temporal dos processos hidrológicos (LEVIA; FROST, 2006; ZIMMERMANN et al., 2008).

A precipitação interna constitui a fração da precipitação em aberto que alcança o piso florestal, entrando em contato ou não com os componentes da vegetação. Os fatores meteorológicos que a influenciam são o volume precipitado (i.e. altura pluviométrica), a duração e intensidade dos eventos de chuva, a temperatura e umidade do ar, e a velocidade e direção dos ventos (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000). Eles influenciam a forma como a partição da precipitação em aberto se inicia e se desenvolve em precipitação interna, escoamento pelo tronco ou perdas por interceptação (STAELENS et al., 2008), afetando a contribuição relativa de cada processo em função desses fatores.

Staelens et al. (2008) discutem que, em um primeiro momento, o volume precipitado, a intensidade e duração do evento, assim como as características dos ventos, são os principais fatores que controlam a variação da precipitação interna. Por exemplo, em eventos de chuva considerados leves, menores porções da precipitação em aberto resultam em precipitação interna devido a taxas maiores de interceptação pelo dossel, que retém uma parcela considerável desse volume, sendo posteriormente evaporado (AHMADI; ATTAROD; BAYRAMZADEH, 2013). Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014) sugerem que, nesses eventos, a principal via de entrada de água no ecossistema é a precipitação interna livre, na qual a água precipitada não entra em contato com a vegetação, alcançando diretamente a superfície do solo em ecossistemas florestais. Em eventos mais fortes, o dossel florestal alcança a capacidade máxima de armazenamento de água, fazendo com que uma proporção

maior da precipitação em aberto seja convertida em precipitação interna (SIEGERT et al., 2016), reduzindo as perdas por interceptação. Por outro lado, Manfroi et al. (2006) sugerem que eventos de longa duração e de pequena intensidade têm maior interceptação pelo dossel do que eventos de curta duração com alta intensidade, devido às perdas por evaporação que ocorrem nestes últimos.

Além disso, determinadas características de ventos (e.g. direção e velocidade; CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006) podem controlar a porção da precipitação em aberto que alcança o solo, mesmo após o fim dos eventos. Nesse sentido, Van Stan, Gay e Lewis (2016) afirmam que a influência do vento ocorre de duas maneiras principais na precipitação interna: na variação da superfície de contato com a vegetação, que altera as taxas de interceptação; e na liberação diferencial da água interceptada no dossel, gerando pontos com diferentes taxas de precipitação interna (em inglês, *released throughfall*). Após o término dos eventos, a taxa evaporação da água interceptada nas folhas, galhos e troncos também passa a ser controlada pela variação dos fatores meteorológicos (STAELENS et al., 2008). Por exemplo, Staelens et al. (2008) verificaram que ventos em alta velocidade média aumentam as taxas de evaporação, restabelecendo, portanto, a capacidade de armazenamento do dossel e reduzindo a contribuição da precipitação interna no balanço hídrico do evento seguinte.

Além da interação entre os fatores meteorológicos, há a influência simultânea de fatores bióticos (e.g. estrutura da vegetação, composição de espécies, traços funcionais) sobre a variabilidade da precipitação interna (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006; CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE, 2014). Ahmadi, Attarod e Bayranzadeh (2013) destacam que a partição da precipitação em aberto ocorre de maneira semelhante em diferentes formações vegetais. No entanto, a associação entre os fatores meteorológicos e bióticos pode elevar ainda mais a heterogeneidade espacial da precipitação interna, uma vez que formações florestais dificilmente são homogêneas, especialmente em regiões tropicais (CHAZDON, 2014). Nesse sentido, a variação em pequena escala da estrutura florestal pode influenciar a quantidade de água que alcança o solo das florestas (SHACHNOVIC; BERLINER; BAR, 2008), assim como a concentração de nutrientes depositada (KOWALSKA et al., 2016).

No que se refere à representação da interação entre fatores meteorológicos e processos hidrológicos, diversos estudos em hidrologia florestal verificaram que a relação

entre o volume de precipitação em aberto e de precipitação interna ( $PI_{mm}$ ) segue tendência linear (Tabela 1), influenciando positivamente a variação da precipitação interna. Em contrapartida, quando a precipitação interna é considerada em termos de porcentagem da precipitação em aberto ( $PI_{\%}$ ), foi verificado que a relação entre as variáveis não é linear (ZOU et al., 2015). Fan et al. (2015) verificaram que o aumento da precipitação em aberto afeta de maneira positiva a  $PI_{\%}$  até um patamar no qual esse valor se torna praticamente estável.

Tabela 1: Resumo dos modelos ajustados à relação entre precipitação em aberto (PA), volume de precipitação interna ( $PI_{mm}$ ), fração de precipitação interna ( $PI_{\%}$ ) e seu coeficiente de variação ( $CV_{PI}$ ).

<b>Autor(es)</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Modelo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Arcova, Cicco e Rocha (2003)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,913 – 0,993
Ávila et al. (2014)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,849 – 0,895
Carlyle-Moses, Flores Laureano e Price (2004)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,998
	PA, $CV_{PI}$	Exponencial	0,860
Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,910
Fan et al. (2015)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,996
Ferreira, Luizão e Dallarosa (2005)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,819 – 0,989
Gasparoto et al. (2014)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,740 – 0,900
Gênova, Honda e Durigan (2007)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,985 – 0,993
Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,970 – 0,990
Limin et al. (2015)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,948
Lorenzon, Dias e Leite (2013)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,988 – 0,992
Moura et al. (2009)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,985
Oliveira et al. (2008)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,956
Oliveira Júnior e Dias (2005)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,988
Perez-Marin e Menezes (2008)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,936
Pérez-Suárez et al. (2014)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,980
Shachnovich, Berliner e Bar (2008)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,996
Shinohara et al. (2010)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,990
Staelens et al. (2008)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,990
Teale et al. (2014)	PA, $CV_{PI}$	Linear	0,230
Thomaz (2005)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,953 – 0,972
Togashi, Montezuma e Leite (2012)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,945 – 0,992
Wullaert et al. (2009)	PA, $PI_{mm}$	Linear	0,800 – 0,840
Zou et al. (2015)	PA, $PI_{\%}$	Logarítmico	0,150 – 0,770

Da mesma maneira, a relação entre o coeficiente de variação da precipitação interna ( $CV_{PI}$ ), que descreve o grau de variabilidade espacial desse processo (FAN et al., 2015; HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; KOWALSKA et al., 2016; LEVIA; FROST, 2006; STAELENS et al., 2006; SIEGERT et al., 2016; ZIEGLER et al., 2009),

apresenta relação inversa ao volume de precipitação em aberto. Segundo alguns estudos (CARLYLE-MOSES; FLORES LAUREANO; PRICE, 2004; CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE, 2014; FAN et al., 2015; STAELENS et al., 2006), o  $CV_{PI}$  diminui assintoticamente com o aumento do volume de precipitação em aberto, até determinado patamar onde essa variável praticamente se estabiliza, mesmo com o acréscimo do volume precipitado, indicando que a relação entre essas variáveis também apresenta um comportamento não linear.

De forma geral, o conhecimento e quantificação da relação entre a precipitação em aberto e a precipitação interna são importantes para a modelagem de parâmetros hidrológicos de áreas florestais (PYPKER et al., 2005; ZOU et al., 2015), que são aplicados na modelagem de perdas por interceptação nesses ecossistemas, e para a definição de estratégias para a amostragem desses processos com limiares de erros aceitáveis (CARLYLE-MOSES; FLORES LAUREANO; PRICE, 2004; CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE, 2014; HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; RITTER; REGALADO, 2014; RODRIGO; ÀVILA, 2001; ZIEGLER et al., 2009), possibilitando a obtenção de estimativas mais precisas para diversas aplicações. Além disso, foram identificados poucos estudos que avaliassem o ajuste de modelos não lineares para a descrição da relação entre a precipitação em aberto e as estimativas referentes à precipitação interna, apesar da observação desses padrões em estudos empíricos, indicando a necessidade de estudos que preencham essa lacuna, tornando possível compreender com maior aprofundamento como essas variáveis interagem entre si.

Nesse sentido, este capítulo teve como objetivos avaliar a influência da precipitação em aberto sobre a precipitação e descrever o comportamento dessas variáveis em uma área de floresta secundária com predominância de *Pinus elliottii* var. Engelm. no sudeste brasileiro. Para isso, foram estabelecidas as seguintes questões:

- 1) Qual o padrão de distribuição espacial e temporal da precipitação em aberto na área de estudo?
- 2) O volume de precipitação em aberto influencia o volume de precipitação interna e sua fração em relação à precipitação em aberto?
- 3) A variabilidade espacial da precipitação interna é influenciada pela precipitação em aberto?
- 4) Qual modelo melhor descreve a relação entre as variáveis da precipitação interna e a precipitação em aberto?

## 2.2 Material e métodos

### 2.2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em uma área de vegetação localizada na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus São Carlos (21°59'3,9"S, 47°53'37,5"O; Figura 1). A área se caracteriza por apresentar predominância de *Pinus elliottii* var. Engelm. no estrato arbóreo e sub-bosque em regeneração com espécies nativas da região.

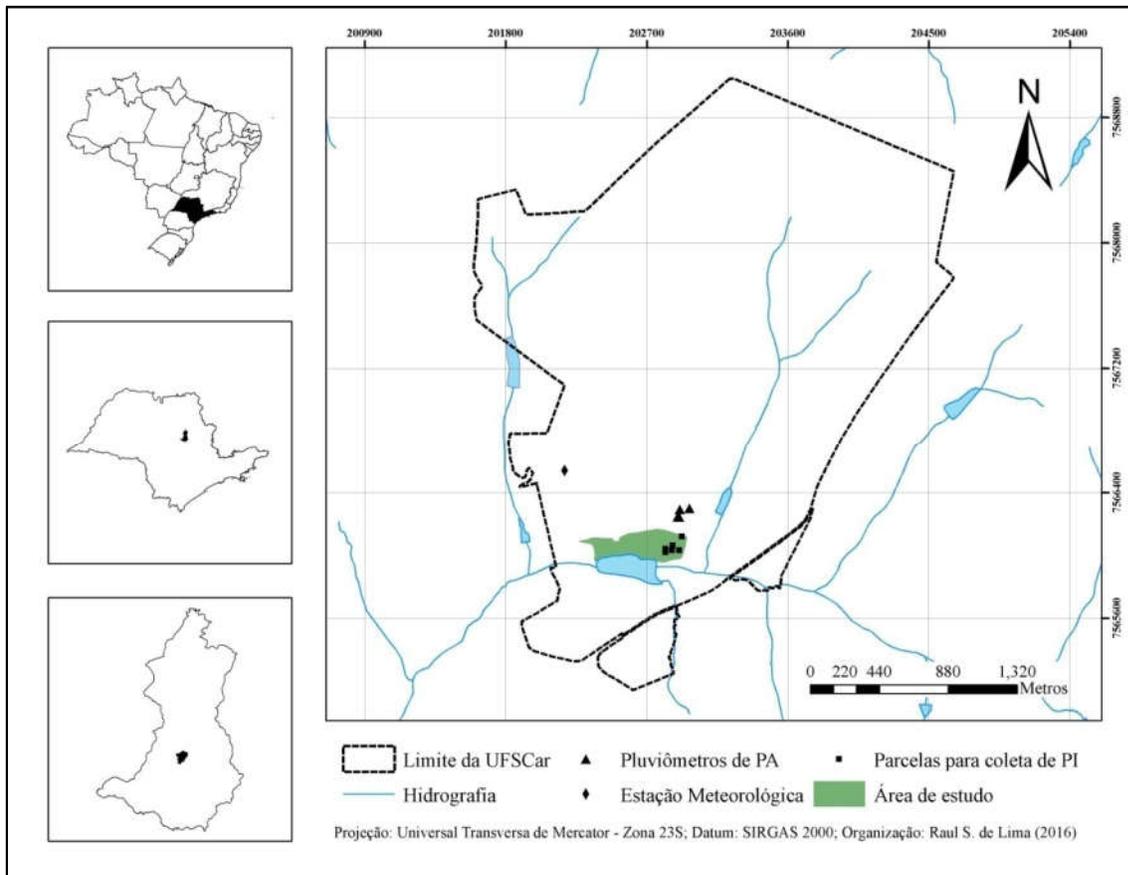


Figura 1: Localização da área de estudo e distribuição das parcelas de monitoramento de precipitação interna (PI) e pluviômetros de precipitação em aberto (PA).

O clima local é classificado como tropical de altitude, com verão chuvoso e inverno seco (Cwa, segundo a classificação de Köppen). A temperatura média do município é 21,2°C, com as médias mensais variando entre 18 e 23°C (CEPAGRI, 2016).

A precipitação média acumulada anual da região varia de 1423 mm (CEPAGRI, 2016) a 1538 mm (SANCHES, 2015). O período chuvoso se concentra entre outubro e março, com contribuição média de 82% para o total médio anual (CEPAGRI, 2016).

Em estudo desenvolvido por Sanches (2015), ao analisar dados de precipitação no período de 1993 e 2014, foi verificado que os dias mais chuvosos da região apresentam volume médio de 79,8 mm.dia<sup>-1</sup>. O autor destaca que, em intervalos anuais, os maiores eventos registrados não são inferiores a 45 mm.dia<sup>-1</sup>. Além disso, foi verificado que os dias de maior acumulação de precipitação concentram-se no período de outubro a março.

Considerando os valores máximos anuais de dias consecutivos sem chuva, Sanches (2015) observou o valor médio de 42 dias na região de São Carlos. Entre 1994 e 2007, foi verificado um período de 80 dias sem chuva; e, entre 2004 e 2009, não foram verificados períodos superiores a 25 dias sem chuva. Em contrapartida, foi obtido um valor médio de nove dias consecutivos com precipitação, também considerando os valores máximos anuais desse indicador.

### **2.2.2 Amostragem**

Os dados para este estudo foram coletados entre os dias 13/10/2015 e 26/02/2016 em seis parcelas com dimensões de 10 m x 10 m instaladas na área de floresta secundária (Figura 1), com distanciamento entre elas variando de 15 a 130 m. Considerou-se como evento de chuva o registro acumulado em um ou mais dias de chuva (LORENZON; DIAS; LEITE, 2013; ZIEGLER et al., 2009). Dessa forma, 24 eventos de chuva foram amostrados durante o período.

Para quantificar a precipitação em aberto, foram utilizados quatro pluviômetros constituídos de polietileno tereftalato, instalados a uma distância de até 238 m das parcelas de medição de precipitação interna. Eles foram instalados em suportes a 1,3 m de altura do solo, para evitar os efeitos de respingamento. Esses dados foram comparados com os obtidos pela estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), denominada como estação “São Carlos-A711”, localizada a 830 m dos pluviômetros (Figura 1), para verificar a correlação dos dados.

Para o monitoramento da precipitação interna, foram instalados 30 pluviômetros em cada parcela (i.e. foram utilizados 180 pluviômetros no total). Os pluviômetros permaneceram em posições fixas durante a realização do experimento, sendo distribuídos sistematicamente (Figura 2). Destaca-se que o posicionamento dos coletores foi definido neste padrão para a avaliação da influência das estratégias de amostragem sobre as estimativas da precipitação interna (Capítulo 3).

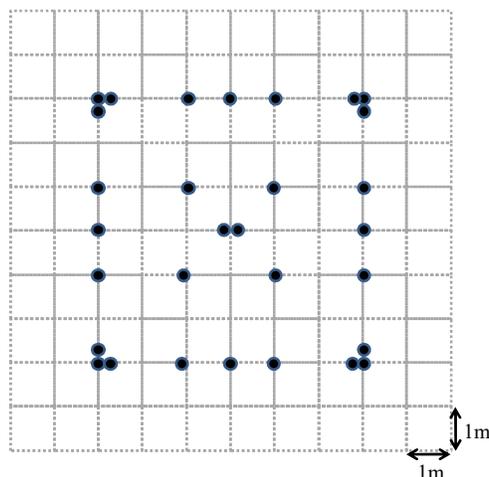


Figura 2: Representação esquemática da distribuição dos pluviômetros no interior das parcelas para testar a influência da precipitação em aberto sobre as estimativas de precipitação interna.

O cálculo da  $PI_{mm}$  média por parcela foi realizado a partir da Equação 1:

$$PI_p = \frac{1}{30} \sum 10 \frac{V_i}{A_i} \quad (1)$$

Onde:  $PI_p$  é a precipitação interna registrada na parcela  $p$  (em mm);  $V_i$  é o volume de precipitação interna coletada pelo pluviômetro  $i$  (em mL); e  $A_i$  é a área de captação do pluviômetro  $i$  (em  $cm^2$ ). Note que o volume registrado foi calculado para cada evento e para o acumulado durante todo o período do estudo (i.e. precipitação acumulada de 24 eventos de chuva).

### 2.2.3 Análise de dados

Para avaliar o padrão da distribuição espacial da precipitação em aberto (Questão 1), foi aplicada análise de correlação para a relação entre os dados de precipitação em aberto obtidos pelos pluviômetros e pela estação meteorológica. Esta análise mede a magnitude de relação entre duas variáveis contínuas (QUINN; KEOUGH, 2002). Para isto, foi avaliado o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), que fornece uma estimativa normalizada da covariância das variáveis. Os dados de precipitação em aberto, tanto dos pluviômetros quanto da estação meteorológica, foram previamente transformados usando-se funções logarítmicas  $[\ln(x)]$ , tendo em vista a não normalidade da distribuição dos dados, com base no teste de Shapiro-Wilk.

Para avaliar se a precipitação em aberto influencia as estimativas de precipitação interna e sua variabilidade espacial (Questões 2 e 3, respectivamente), foi utilizada regressão

linear simples, que descreve a relação linear entre duas variáveis contínuas (QUINN; KEOUGH, 2002; GOTELLI; ELLISON, 2011). Desta forma, a precipitação em aberto (PA) foi definida como variável explicativa; a precipitação interna ( $PI_{mm}$  e  $PI_{\%}$ ) e seu coeficiente de variação ( $CV_{PI}$ ) foram definidos como variáveis resposta. Assim como para a análise de correlação, os dados foram previamente transformados [ $\ln(x)$ ], quando verificado pelo teste de Shapiro-Wilk que a distribuição não se assemelhava a uma distribuição normal.

Por fim, para avaliar qual modelo melhor descreve a relação entre a precipitação em aberto (PA) e a precipitação interna ( $PI_{mm}$  e  $PI_{\%}$ ) e seu coeficiente de variação ( $CV_{PI}$ ; Questão 4), foram ajustados modelos matemáticos, propostos na literatura, que representassem essas relações entre variáveis resposta e explanatória. Nesse sentido, foram testados os seguintes modelos: linear (Equação 2); de potência (Equação 3; STAELENS et al., 2006, 2008); logarítmico (Equação 4; ZOU et al., 2015); e exponencial (Equação 5; CARLYLE-MOSES; FLORES LAUREANO; PRICE, 2004).

$$y = a + bx \quad (2)$$

$$y = ax^b \quad (3)$$

$$y = a\ln(x)+b \quad (4)$$

$$y = a + b/(c + x) \quad (5)$$

Os modelos foram ajustados pelo método de mínimos quadrados, realizando-se 300 iterações para a definição dos parâmetros dos modelos. Este método considera o desvio vertical de cada valor da variável resposta em relação ao valor estimado pelo modelo, definindo aquele com a menor soma do quadrado dos desvios como o melhor ajuste para determinado modelo (JOHNSON; OMLAND, 2004; ZAR, 2010).

Os modelos foram avaliados com base no coeficiente de determinação ajustado ao tamanho amostral ( $R^2$ ), sendo possível quantificar a fração da variação total da variável resposta que é explicada pela relação linear com a variável explanatória, além de ser possível observar o quanto da variação da variável resposta permanece inexplicada (GOTELLI; ELLISON, 2011; JOHNSON; OMLAND, 2004; QUINN; KEOUGH, 2002; ZAR, 2010). Além dessa métrica, utilizou-se o critério de informação de Akaike (AIC), aplicado para a seleção de modelos com base na compensação entre a qualidade do ajuste e a complexidade

do modelo (JOHNSON; OMLAND, 2004). O AIC foi calculado a partir da Equação 6 (QUINN; KEOUGH, 2002):

$$AIC = n * \ln(RSS) + 2 * (P + 1) - n * \ln(n) \quad (6)$$

Onde: *AIC* é o critério de informação de Akaike; *n* é o número de amostras; *RSS* é a soma dos quadrados dos resíduos do modelo; e *P* é o número de parâmetros do modelo.

### 2.3 Resultados

Durante o período do estudo, foram amostrados 24 eventos de chuva. Destaca-se que, no primeiro evento amostrado, foram utilizados três pluviômetros para a medição da precipitação em aberto. Nos eventos seguintes, todos os dados de precipitação em aberto consistiram na média obtida por quatro pluviômetros, com exceção de um evento (12/02/2016), no qual dois dos pluviômetros apresentaram valores muito superiores aos registrados pelos outros pluviômetros e pela estação meteorológica, sendo, portanto, excluídos dos cálculos posteriores, em procedimento análogo ao realizado por Carlyle-Moses, Flores Laureano e Price (2004).

Com base nos registros obtidos (Tabela 2), verificou-se que volume médio de PA foi de 20,5 mm (mediana de 10,44 mm), variando de eventos de 0,7 a 107,7 mm. O volume acumulado de PA durante os 24 eventos foi de 492,1 mm.

Tabela 2: Valores de volume d'água (mm) referentes à precipitação em aberto (PA) e à precipitação interna (PI) por parcela; também são apresentados os coeficientes de variação da precipitação interna (CV) observados entre os pluviômetros de cada parcela; os dados são apresentados por evento de chuva e para o acumulado do período completo de amostragem.

Data da coleta	PA (mm)	Parcela 1		Parcela 2		Parcela 3		Parcela 4		Parcela 5		Parcela 6	
		PI (mm)	CV (%)										
13/10/2015	4,4	3,1	32,3	3,5	24,5	3,1	33,1	3,2	30,5	3,4	31,5	3,0	38,1
27/10/2015	10,5	8,7	28,8	8,9	22,6	11,0	33,8	9,1	25,8	10,6	28,3	9,0	31,8
29/10/2015	4,2	1,8	43,1	1,3	45,1	1,7	53,4	1,2	69,1	1,9	44,7	1,6	59,5
04/11/2015	93,2	73,9	14,8	81,6	22,4	84,3	28,0	89,7	23,0	91,6	24,5	85,2	27,6
07/11/2015	10,4	7,1	26,4	7,8	28,3	7,2	36,2	7,3	20,7	7,7	21,4	8,9	26,6
12/11/2015	0,7	0,1	119,5	0,1	118,4	0,1	86,9	0,1	167,2	0,3	64,5	0,4	89,8
19/11/2015	38,4	27,9	32,2	36,5	20,3	31,1	25,1	36,7	32,9	29,0	17,9	31,3	26,5
27/11/2015	107,7	87,8	19,2	103,2	12,8	94,0	17,0	106,3	24,5	104,8	16,3	97,9	22,0
05/12/2015	26,4	20,2	27,4	21,8	19,8	22,7	46,5	20,0	30,4	25,6	18,7	25,8	40,5
07/12/2015	15,9	12,1	24,3	13,3	18,2	13,0	32,9	12,8	28,5	16,0	28,4	15,5	31,6
11/12/2015	16,9	10,7	25,6	13,5	20,2	12,6	31,4	13,9	24,5	16,2	23,8	14,3	32,3

Data da coleta	PA (mm)	Parcela 1		Parcela 2		Parcela 3		Parcela 4		Parcela 5		Parcela 6	
		PI (mm)	CV (%)										
14/12/2015	1,8	1,4	54,0	2,4	24,3	2,1	54,5	2,2	43,6	3,2	43,8	3,7	43,4
26/01/2016	18,2	15,7	26,3	18,3	23,7	17,4	34,7	17,6	31,2	18,8	33,7	16,0	33,9
31/01/2016	15,9	10,9	31,2	12,1	24,8	11,8	26,5	11,2	30,8	14,1	48,6	14,2	38,5
06/02/2016	3,3	0,9	49,9	1,0	37,2	0,8	52,4	0,5	58,1	1,3	78,7	1,1	62,2
08/02/2016	5,9	4,1	34,5	3,3	42,3	4,0	42,6	3,4	34,7	4,7	76,2	4,2	65,4
12/02/2016	25,3	18,1	20,0	19,8	26,9	20,6	28,8	22,3	22,3	21,2	29,4	19,9	28,4
13/02/2016	26,1	24,2	19,9	30,9	19,6	30,7	26,6	28,3	28,6	33,1	28,9	30,7	24,9
17/02/2016	42,6	37,2	17,7	39,4	25,5	39,4	26,4	39,8	27,4	44,0	33,7	41,5	33,0
18/02/2016	3,9	2,8	37,4	2,6	38,6	3,0	30,0	3,0	37,3	3,8	50,7	3,5	49,0
19/02/2016	6,7	4,6	24,8	4,9	23,3	5,4	34,7	5,1	25,7	5,6	43,7	5,1	35,8
22/02/2016	2,3	0,8	47,1	1,0	42,7	1,0	57,4	0,9	65,0	1,8	64,2	1,8	71,3
24/02/2016	1,4	0,3	65,6	0,3	61,0	0,3	110,1	0,3	65,1	0,7	81,7	0,7	84,7
26/02/2016	9,8	5,5	30,1	4,7	37,5	5,1	34,5	4,2	48,9	6,5	55,9	5,4	58,3
<b>Total</b>	<b>492,1</b>	<b>379,9</b>	<b>15,5</b>	<b>432,2</b>	<b>13,2</b>	<b>422,5</b>	<b>20,1</b>	<b>439,0</b>	<b>16,0</b>	<b>465,7</b>	<b>16,6</b>	<b>440,7</b>	<b>18,1</b>

Com base no histograma dos eventos registrados (Figura 3), pode-se observar que grande parte (45,8%) dos eventos de chuva na área constitui-se de volumes inferiores a 10 mm. Em contrapartida, foram verificados dois eventos de chuva (8,3%) que ultrapassaram o volume de 50 mm, sendo que estes dois eventos contribuíram com 41% no total acumulado para o período do estudo. Por outro lado, os 11 eventos menores que 10 mm contribuíram com apenas 9% no volume acumulado.

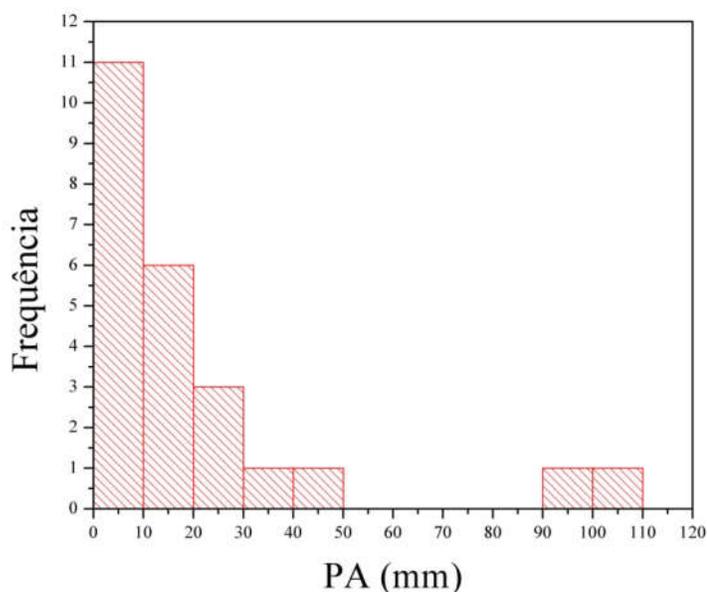


Figura 3: Histograma dos valores de precipitação em aberto (PA) amostrados pelos pluviômetros de polietileno tereftalato.

Para a análise de correlação dos dados de precipitação em aberto, não foram considerados os eventos dos dias 13/10/2015 e 26/01/2016. A partir da análise de correlação, foi verificada forte correlação positiva ( $r = 0,952$ ) entre os dados obtidos pelos pluviômetros de polietileno tereftalato e os dados da estação meteorológica de São Carlos (Figura 4).

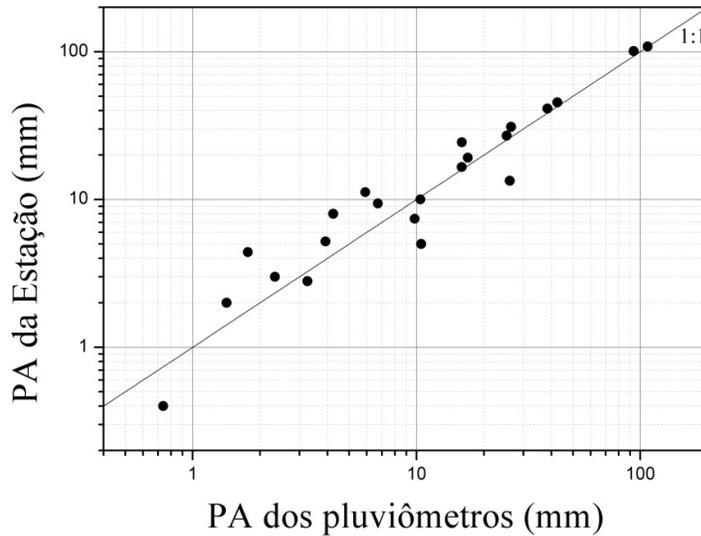


Figura 4: Gráfico de dispersão dos dados registrados de precipitação em aberto (PA) pelos pluviômetros de polietileno tereftalato (eixo X) e pela estação automática do município (eixo Y).

Considerando os dados de precipitação interna obtidos para as seis parcelas (Tabela 2), verificou-se que a precipitação média por evento é de aproximadamente 75% do total de precipitação em aberto. Foi registrado um acumulado de 430 mm, correspondendo a 87% da precipitação em aberto no período estudado, variando entre 379,9 e 465,7 mm por parcela.

A partir da análise de regressão linear simples, verificou-se que a precipitação em aberto exerce influência sobre  $PI_{mm}$  ( $P < 0,001$ ), havendo uma elevada proporção da variação da precipitação interna explicada pela precipitação em aberto ( $R^2 = 0,944$ ). Além disso, foi observado que o aumento do volume de precipitação em aberto levou ao aumento de  $PI_{mm}$  (Figura 5).

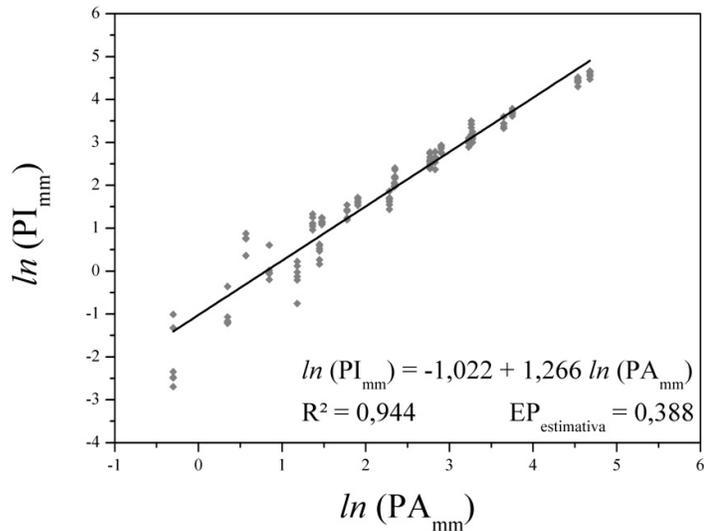


Figura 5: Regressão linear da  $PI_{mm}$  em função da precipitação em aberto, utilizando os dados médios por parcela.

No que se refere à influência da precipitação em aberto sobre  $PI_{\%}$ , também foi verificada influência significativa da variável explanatória. Para a relação entre elas, foi verificado um menor valor de  $R^2$  (0,546), em relação à análise de  $PI_{mm}$  (0,944), indicando que uma ou mais variáveis podem estar exercendo controle sobre a variável resposta. Assim como para  $PI_{mm}$ , foi verificada influência positiva da precipitação em aberto sobre  $PI_{\%}$ , onde há o aumento do valor percentual em função do aumento do volume de precipitação em aberto (Figura 6).

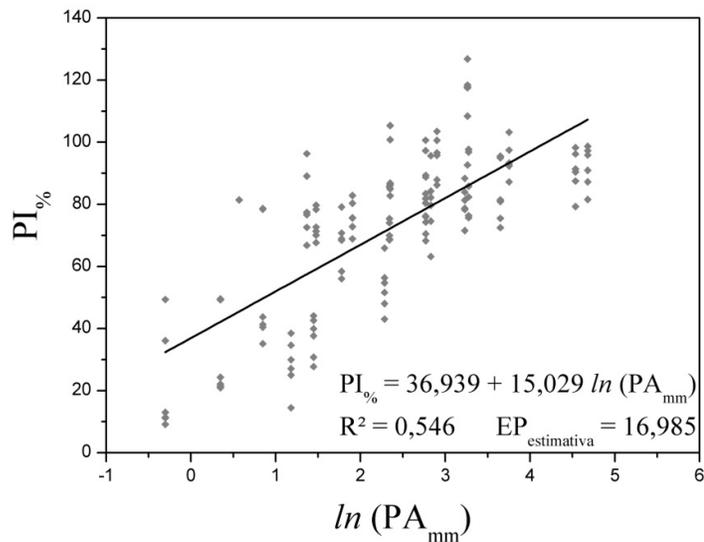


Figura 6: Regressão linear da  $PI_{\%}$  em função da precipitação em aberto, utilizando os dados médios por parcela.

Em relação ao  $CV_{PI}$  (Tabela 2), foi verificado o valor mínimo de 12,8% no evento de 27/11/2015, na Parcela 2. Já no evento do dia 12/11/2015, que totalizou 0,7 mm de precipitação em aberto, foi verificado o maior valor de  $CV_{PI}$  do estudo (167,2%), na Parcela 4. Considerando o volume acumulado nos 24 eventos de chuva amostrados, o  $CV_{PI}$  teve como valor médio 16,6%, variando entre 13,2 e 20,1%.

Assim como para a precipitação interna, a análise de regressão indicou haver influência significativa da precipitação em aberto sobre  $CV_{PI}$  ( $P < 0,001$ ). Com base na relação entre as variáveis, observa-se que  $CV_{PI}$  diminui em função do aumento da precipitação em aberto (Figura 7).

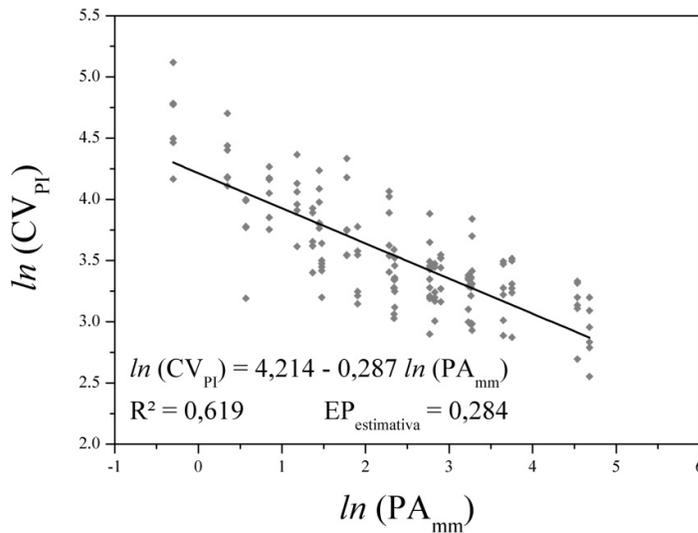


Figura 7: Regressão linear do  $CV_{PI}$  em função da precipitação em aberto, utilizando os dados médios por parcela.

Com base no resultado do ajuste de modelos (Tabela 3), foi verificado que o modelo linear apresentou os melhores valores de  $R^2$  e AIC em comparação aos demais modelos para descrever a influência da precipitação em aberto sobre  $PI_{mm}$ . Todavia, o modelo de potência apresentou valores próximos ao do modelo linear para o ajuste da relação entre estas variáveis. Para  $PI_{\%}$ , o modelo exponencial apresentou o melhor  $R^2$  entre os modelos avaliados; o modelo logarítmico apresentou o melhor AIC, indicando a relação entre essas variáveis segue tendência não linear. Por fim, o modelo exponencial foi aquele com melhor ajuste, tanto em termos de  $R^2$  quanto de AIC, para descrever a relação entre a precipitação em aberto e o  $CV_{PI}$ . Para essa variável, o ajuste do modelo linear foi significativamente inferior aos demais.

Tabela 3: Resultado do ajuste e parâmetros estimados dos modelos para as relações entre os dados de precipitação interna e precipitação em aberto.

Variável resposta	Modelo		Parâmetros			R <sup>2</sup> ajustado	AIC
			a	b	c		
PI <sub>mm</sub>	linear	$y = a + bx$	-1,062	0,926	-	0,987	309,068
	potência	$y = ax^b$	0,781	1,035	-	0,986	313,992
	logarítmico	$y = a \ln(x) + b$	15,823	-18,453	-	0,646	782,154
	exponencial	$y = a + b/(c + x)$	19,332	-3,101	-1,275	0,035	928,497
PI <sub>%</sub>	linear	$y = a + bx$	68,124	0,349	-	0,100	965,410
	potência	$y = ax^b$	54,154	0,137	-	0,209	946,856
	logarítmico	$y = a \ln(x) + b$	10,980	50,035	-	0,222	944,458
	exponencial	$y = a + b/(c + x)$	96,544	-278,602	4,743	0,224	946,051
CV <sub>PI</sub>	linear	$y = a + bx$	46,815	-0,368	-	0,191	871,748
	potência	$y = ax^b$	82,161	-0,376	-	0,649	752,703
	logarítmico	$y = a \ln(x) + b$	-12,966	69,077	-	0,532	792,896
	exponencial	$y = a + b/(c + x)$	24,358	80,281	0,276	0,684	738,330

## 2.4 Discussão

Com base no coeficiente de correlação de Pearson, verificou-se que o valor médio de precipitação em aberto obtido pelos quatro pluviômetros instalados está fortemente correlacionado ao da estação meteorológica. Thomaz (2005) obteve resultado semelhante ao comparar um pluviômetro de polietileno tereftalato a um pluviômetro padrão. Assim, esses resultados sugerem que as estimativas dos dois tipos de coletores são semelhantes e que o uso desse material para a construção de pluviômetros não compromete as estimativas de precipitação em aberto.

Além disso, considerando a distância entre os equipamentos no presente estudo (cerca de 830 m), os resultados sugerem que essa distância não é suficiente para alterar consideravelmente os volumes registrados nas duas localidades. Apesar de ter constatado grande variabilidade dos dados de precipitação em pequenas escalas espaciais, Krajewski, Ciach e Habib (2003) obtiveram coeficientes de correlação de, no mínimo, 0,8 para distâncias de até 1 km com dados de precipitação na Amazônia. Sanches (2015) constatou que a estação

meteorológica de São Carlos apresentava dados similares aos da estação da EMBRAPA Pecuária Sudeste, localizada na mesma região, porém mais distante do que os pluviômetros utilizados em nosso estudo, o que sugere baixa heterogeneidade na distribuição espacial das chuvas na escala estudada.

Esses resultados sugerem, portanto, que dentro desse raio de distância (cerca de 800 m) os dados de precipitação em aberto estão correlacionados, sendo possível sua utilização para a obtenção de estimativas da precipitação interna na área de estudo. No entanto, deve-se destacar que, segundo Krajewski, Ciach e Habib (2003), a variação em pequena escala dos dados de precipitação em aberto é influenciada pelo regime climático, sendo necessárias avaliações mais aprofundadas para garantir a validade dessa relação.

A partir dos dados de precipitação em aberto registrados (Tabela 2), verifica-se que, conforme já discutido brevemente, grande parte dos eventos de chuva da região foi constituída por chuvas inferiores a 10 mm, assim como o padrão constatado por Mair e Fares (2010), também avaliando um sistema tropical. Pérez-Suárez et al. (2014) e Fan et al. (2015) também verificaram que as chuvas de pequeno volume contribuem com pequenas proporções para o volume acumulado anualmente em regiões subtropical e semiárida, respectivamente. Por exemplo, Fan et al. (2015) verificaram que chuvas menores que 5 mm (46,9% do total de eventos) contribuem com cerca de 8% do volume precipitado. Assim como os resultados obtidos em nosso estudo, estes autores observaram valor semelhante de contribuição de chuvas superiores a 50 mm (41% do total precipitado), indicando que, apesar de menos frequentes, estas chuvas exercem grande influência sobre a entrada de água e o balanço hídrico em ecossistemas florestais, independente da região onde eles estão localizados.

Albuquerque e Costa (2012) destacam que eventos de pequeno volume também são importantes para o balanço hídrico florestal, principalmente para o sistema planta-solo, pois regulam temporalmente o fluxo de água que é direcionado para o solo e sistema radicular das plantas, com volumes e composições distintas entre os processos hidrológicos (PEREZ-MARIN; MENEZES, 2008). Considerando que eventos de chuva da região se caracterizam pelo pequeno volume precipitado, espera-se que a precipitação interna na região estudada apresente alta variabilidade espacial, devido a não saturação do dossel florestal em chuvas leves.

Assim como registrado neste estudo, Sanches (2015) também verificou que eventos superiores a 60 mm são pouco frequentes na região. Este tipo de chuva é importante para o abastecimento de água no solo, geração de escoamento superficial e, conseqüentemente, geração de vazão em bacias hidrográficas (MAIR; FARES, 2010; PÉREZ-SUÁREZ et al., 2014). Além disso, estes eventos estão fortemente relacionados com o desenvolvimento do escoamento pelo tronco, processo hidrológico com pequena representatividade para o volume total do balanço hídrico em ecossistemas florestais, mas com importância significativa para a ciclagem de nutrientes e direcionamento de água para as raízes (OLIVEIRA et al., 2008; OZIEGBE; MUOGHALU; OKE, 2011; MOURA et al., 2009; SOUZA et al., 2007).

Em locais com grande frequência de chuvas leves, Rodrigo e Àvila (2001) verificaram que são necessários mais pluviômetros para amostrar a precipitação interna do que áreas com grande influência de chuvas maiores. Segundo os autores, isso se deve à elevada variabilidade espacial desse processo em eventos menores, corroborando os resultados obtidos em nosso estudo. Desta forma, pode-se esperar que seja necessário aplicar uma grande quantidade de pluviômetros para a obtenção de estimativas de precipitação interna em nossa área de estudo, tendo em vista que esse tipo de evento de chuva é frequente ao longo do ano.

No entanto, destaca-se que, ao se considerar o volume acumulado em um determinado período, chuvas fortes são capazes de reduzir a variabilidade espacial dos dados de precipitação interna, pois estas representam uma porção maior do volume acumulado (HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006). A partir disso, o registro de eventos de chuva fortes, além de representar com maior exatidão o padrão de chuva de uma determinada localidade, contribui para estimativas mais precisas para o cálculo do balanço hídrico em intervalos maiores de tempo (i.e. mensal, sazonal, anual etc.), demandando uma quantidade menor de pluviômetros para a obtenção de estimativas com o mesmo nível de precisão.

Portanto, foi possível verificar que a precipitação em aberto na região de São Carlos apresenta baixa heterogeneidade espacial na escala de aproximadamente 800 m, sendo possível, portanto, utilizar dados obtidos dentro desse raio de distância para estimar a fração de precipitação interna. Além disso, foi verificado que a distribuição temporal da precipitação em aberto é composta, principalmente, por eventos leves de chuva, embora os escassos eventos de grande volume contribuam com maior porção na entrada de água via precipitação interna em ecossistemas florestais.

No que se refere aos registros de precipitação interna, a estimativa obtida neste estudo (87% da precipitação em aberto) está dentro do intervalo registrado em outros estudos em regiões tropicais e subtropicais (41 – 94%; Tabela 4). Essa elevada amplitude de variação nos dados de precipitação interna em ecossistemas tropicais também foi apresentada na revisão realizada por Levia e Frost (2006). Estes autores atribuem essa alta variabilidade a diferenças na composição de espécies, na diversidade de coberturas vegetais nessas regiões, na densidade de indivíduos, no histórico de uso e na estrutura do dossel, fatores que podem determinar a fração de precipitação interna.

Tabela 4: Resumo das estimativas médias (PI%) e de variabilidade (CV<sub>PI</sub>) da precipitação interna obtidas em pesquisas científicas.

<b>Autor(es)</b>	<b>Região</b>	<b>Fisionomia(s)</b>	<b>PI%</b>	<b>CV<sub>PI</sub></b>
Ahmadi, Attarod e Bayramzadeh (2013)	Árida/ Semiárida	" <i>Oriental beech forest</i> "	69	-
Arcova, Cicco e Rocha (2003) <sup>a</sup>	Tropical	Floresta Latifoliada Perenifólia (secundária)	81	-
Ávila et al. (2014) <sup>a</sup>	Tropical	Floresta Ombrófila Densa	79	-
Carlyle-Moses, Flores Laureano e Price (2004)	Tropical	" <i>Open matorral</i> " e " <i>matorral-chaparral</i> "	84	3
Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014)	Temperada	Floresta de coníferas	59	29 – 38
Fan et al. (2015)	Subtropical	Plantio de <i>Pinus</i> spp. (exótico)	78	-
Ferreira, Luizão e Dallarosa (2005) <sup>a</sup>	Tropical	Floresta de terra firme (sem extração seletiva)	74 – 87	-
		Floresta de terra firme (com extração seletiva)	86 – 92	-
Gasparoto et al. (2014) <sup>a</sup>	Tropical	Floresta Estacional Semidecidual	76	-
		Plantio de <i>Pinus</i> spp.	84	-
		Plantio de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	85	-
Gênova, Honda e Durigan (2007) <sup>a</sup>	Tropical	Plantio puro de <i>Pinus elliottii</i>	73	-
		Plantio puro de <i>Tapirira guianensis</i>	69	-
		Plantio puro de <i>Anadenanthera falcata</i>	88	-
		Plantio misto com espécies de cerrado	87	-
Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006)	Tropical	Floresta " <i>Tabonuco-type</i> "	73 – 77	23 – 48
Limin et al. (2015)	Tropical	Plantio de <i>Syzygium aromaticum</i>	63	-
Lorenzon, Dias e Leite (2013) <sup>a</sup>	Tropical	Floresta Estacional Semidecidual (regeneração inicial)	84	-
		Floresta Estacional Semidecidual (regeneração avançada)	73	-
Manfroi et al. (2006)	Tropical	Floresta Perenifólia de terras baixas ( <i>lowland evergreen forest</i> )	85 – 88	11 – 30
Moura et al. (2009) <sup>a</sup>	Tropical	Floresta primária (Mata Atlântica)	85	-
Oliveira Júnior e Dias (2005) <sup>a</sup>	Tropical	Floresta secundária (Mata Atlântica)	80	-
Perez-Marin e Menezes (2008) <sup>a</sup>	Semiárida	Sistema Agroflorestal	67	-
Pérez-Suárez et al. (2014)	Semiárida	Floresta de <i>Quercus potosina</i>	89 – 121	-
		Floresta de <i>Pinus cembroides</i>	76 – 101	-

<b>Autor(es)</b>	<b>Região</b>	<b>Fisionomia(s)</b>	<b>PI%</b>	<b>CV<sub>PI</sub></b>
Pérez-Suárez et al. (2014)	Semiárida	Floresta Mista ( <i>Quercus potosina</i> e <i>Pinus cembroides</i> )	83 – 103	-
Presente estudo <sup>a</sup>	Tropical	Floresta de <i>Pinus elliottii</i> com sub-bosque em regeneração	87	17
Ritter e Regalado (2014)	Tropical	Floresta Semidecidual	41	41
Rodrigo e Àvila (2001)	Subtropical	Floresta de <i>Quercus ilex</i>	72 – 76	-
Shinohara et al. (2010)	Temperada	Floresta de bambu (invasivo)	69	15
Siegert et al. (2016)	Subtropical/ Temperada	Floresta Semidecidual	75 – 84	16 – 20
Staelens et al. (2006)	Temperada	Floresta Decídua Mista	63 – 81	8 – 18
Staelens et al. (2008)	Temperada	Floresta Decídua Mista	71	-
Teale et al. (2014)	Tropical	Floresta de transição (entre floresta de terras baixas e montanhosas)	88	21 – 36
Thomaz (2005)	Subtropical	Capoeira em regeneração	48	-
		Floresta de araucárias (secundária)	77	-
Togashi, Montezuma e Leite (2012) <sup>a</sup>	Tropical	Floresta Ombrófila Densa Submontana (sucessão secundária inicial)	94	15
		Floresta Ombrófila Densa Submontana (sucessão secundária tardia)	75	9
		Floresta Ombrófila Densa Submontana (borda)	89	15
Van Stan, Gay e Lewis (2016)	Subtropical	Floresta de <i>Quercus virginiana</i>	73	-
Wullaert et al. (2009)	Tropical	Floresta de montanha (primária)	55 – 58	12 – 17
		Floresta de montanha (com extração seletiva)	66 – 74	12 – 15
Ziegler et al. (2009)	Tropical	Floresta Perenefólia ( <i>evergreen-dominated</i> )	82	5 – 10
Zou et al. (2015)	Temperada	Floresta de cedro vermelho ( <i>redcedar woodland</i> )	57	-
		Pradaria ( <i>tallgrass prairie</i> )	56	-

a: Estudos conduzidos no Brasil.

Quando comparados apenas com estudos desenvolvidos em fisionomias florestais no Brasil, os registros obtidos também estão dentro da amplitude de observada para a PI% (48 – 94%; Tabela 4). Os estudos brasileiros com fisionomias mais similares à do presente estudo são os de Gasparoto et al. (2014) e Gênova, Honda e Durigan (2007), nos quais as áreas estudadas são formadas por plantios de *Pinus* spp. Apesar de não haver presença de sub-bosque no estudo de Gasparoto et al. (2014), a estimativa de precipitação interna obtida é próxima a verificada em nosso estudo, indicando haver similaridades na partição da precipitação em aberto em áreas com predomínio de *Pinus* spp. Em contrapartida, Gênova, Honda e Durigan (2007) obtiveram valor (73%) muito inferior ao nosso, apesar de se tratar da mesma espécie de *Pinus*. Essa diferença entre as estimativas pode ser atribuída à densidade de indivíduos arbóreos nas duas áreas, tendo em vista que Gênova, Honda e Durigan (2007) verificaram correlação entre o volume interceptado e densidade de indivíduos.

Nesse sentido, áreas com presença de *Pinus* spp. em outras regiões apresentaram estimativas cujo intervalo de variação (76 – 103%) inclui as do presente estudo, reforçando a

similaridade no desenvolvimento dos processos hidrológicos em fisionomias equivalentes, com variações que podem ser atribuídas a diferenças na estrutura da vegetação.

Todavia, nossa estimativa também está dentro do intervalo daquelas obtidas em regiões de transição entre semiárido e temperado (76 – 121%; PÉREZ-SUÁREZ et al., 2014), que apresentou valores acima do esperado pelos autores. A grande amplitude de variação da estimativa, principalmente a presença de valores de precipitação interna superiores à precipitação em aberto, pode ser atribuída à ocorrência frequente de neblinas durante o verão nessas localidades (PÉREZ-SUÁREZ et al., 2014), que contribuem com a entrada de água via precipitação oculta (i.e. vapor d'água que é interceptado pelo dossel e acaba condensando e gotejando posteriormente; CARLYLE-MOSES; FLORES LAUREANO; PRICE, 2004), que ocorre sem presença de precipitação em aberto. Dessa forma, a estimativa obtida pelo estudo de Pérez-Suárez et al. (2014) superestimou a contribuição da precipitação interna no balanço hídrico em ecossistemas florestais de regiões de transição, que, se comparada com regiões temperadas ou semiáridas, não deveriam ser muito superiores a 70%. Nesse sentido, torna-se necessário, portanto, determinar a contribuição efetiva de cada um desses processos (i.e. precipitação interna e oculta).

Estudos realizados em regiões temperadas, áridas e semiáridas obtiveram valores inferiores aos do presente trabalho (56 - 71% em regiões temperadas; 67 – 69% em regiões áridas e semiáridas; Tabela 4). A diferença verificada entre estes estudos pode ser atribuída a variações locais de variáveis climáticas, de características meteorológicas locais dos eventos, de composição de espécies, de estrutura da vegetação das áreas estudadas (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; PÉREZ-SUÁREZ et al., 2014) e diferenças metodologias aplicadas (LEVIA; FROST, 2006). Tendo em vista que os padrões de chuvas em diferentes regiões diferem (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000), pode-se considerar que este fator possivelmente está determinando a diferença verificada nas estimativas apresentadas, tendo em vista que o volume da precipitação em aberto é a principal fonte de variação da precipitação interna.

Portanto, os resultados obtidos sugerem que a fração de precipitação interna apresenta maior relação com a fitofisionomia do que com a região em que está inserida. No entanto, Levia e Frost (2006) discutem o fenômeno inverso, no qual a variação da precipitação interna é maior entre áreas de uma determinada fisionomia do que entre regiões.

Dessa forma, ainda são necessários estudos para atribuir e mensurar a influência de cada um desses fatores sobre a variação da precipitação interna.

O resultado obtido pela análise de regressão linear da relação entre os valores de precipitação em aberto e as estimativas de precipitação interna é condizente com os resultados obtidos em outras pesquisas (Tabela 1), sendo verificado que PA exerce influência significativa sobre  $PI_{mm}$  (Figura 5). Nesse sentido, os resultados obtidos para a relação entre PA e  $PI_{mm}$  condizem com os obtidos em outros estudos (Tabela 1), nos quais os  $R^2$  variaram entre 0,740 e 0,998.

No que diz respeito à análise de modelos (Tabela 3), os altos valores do  $R^2$  tanto no modelo linear, que apresentou as melhores métricas de ajuste, quanto no modelo de potência, indicam que a relação destas variáveis apresenta elevado grau de linearidade (CARIBONI et al., 2007), como pode ser observado na Figura 8. Além disso, destaca-se que também é possível obter parâmetros para a modelagem de outros processos hidrológicos a partir do modelo linear (PYPKER et al., 2005; ZOU et al., 2015). Dessa forma, apesar do modelo linear e potência apresentarem capacidades próximas de explicar a variação da variável resposta, sugere-se a utilização de modelos lineares, pois existem análises mais aprofundadas dessas variáveis a partir desse modelo, além de possibilitar a comparação entre os resultados obtidos em diferentes locais.

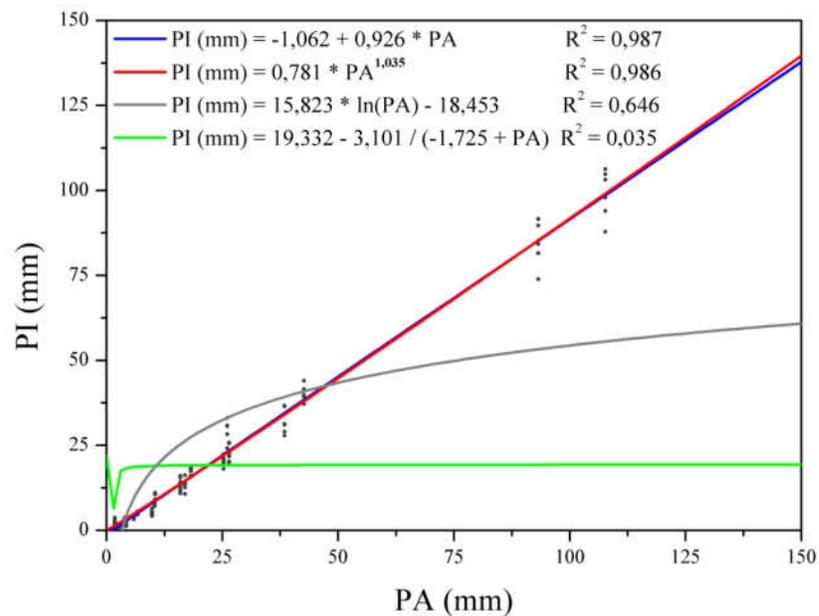


Figura 8: Representação gráfica dos modelos ajustados para a relação entre a precipitação em aberto (PA) e o volume de precipitação interna [PI(mm)].

Em relação à  $PI_{\%}$ , os resultados da análise de regressão indicam haver influência positiva da PA sobre essa variável (Figura 6). Zou et al. (2015) obtiveram resultado equivalente a este, porém analisando a relação logarítmica entre as variáveis, obtendo um  $R^2$  (0,66), considerando apenas áreas florestais, próximo ao obtido no presente estudo (0,55), com dados de PA transformados para escala logarítmica.

Sem a transformação dos dados, o  $R^2$  dos modelos ajustados foi bastante inferior ao encontrado por Zou et al. (2015), alcançando no máximo o valor de 0,224, com o modelo exponencial (Tabela 1), no presente estudo. O modelo logarítmico apresentou capacidade semelhante de explicação da variação de  $PI_{\%}$  em função de PA ( $R^2 = 0,222$ ). A diferença observada entre os coeficientes sugere que, em regiões tropicais e subtropicais, outras variáveis podem estar interagindo e determinando a variação de  $PI_{\%}$ .

Em relação ao AIC, o modelo logarítmico apresentou os melhores resultados, indicando que o aumento de complexidade promovido pela inserção de mais um parâmetro no modelo exponencial não é compensado pelo ganho de ajuste no modelo. Desta forma, o modelo logarítmico parece ser o mais adequado para descrever a relação entre PA e  $PI_{\%}$ .

No entanto, o modelo exponencial permite visualizar de maneira mais perceptível a estabilização  $PI_{\%}$  com o aumento de PA, que ocorre em volumes a partir de aproximadamente 25 mm, estabilizando em 97,544% (Figura 9). Teale et al. (2014) observaram padrão semelhante, verificando que  $PI_{\%}$  estabilizava em 90% em eventos fortes de chuva. Desse modo, é possível mensurar a taxa máxima de precipitação interna nessa localidade, o que pode constituir em um parâmetro para modelos hidrológicos após estudos mais detalhados sobre a validade dessa métrica. Destaca-se que os valores com  $PI_{\%}$  acima de 100% são determinados pela presença de pontos de gotejamento, nos quais ocorre a convergência do volume de água precipitado em áreas mais extensas do dossel.

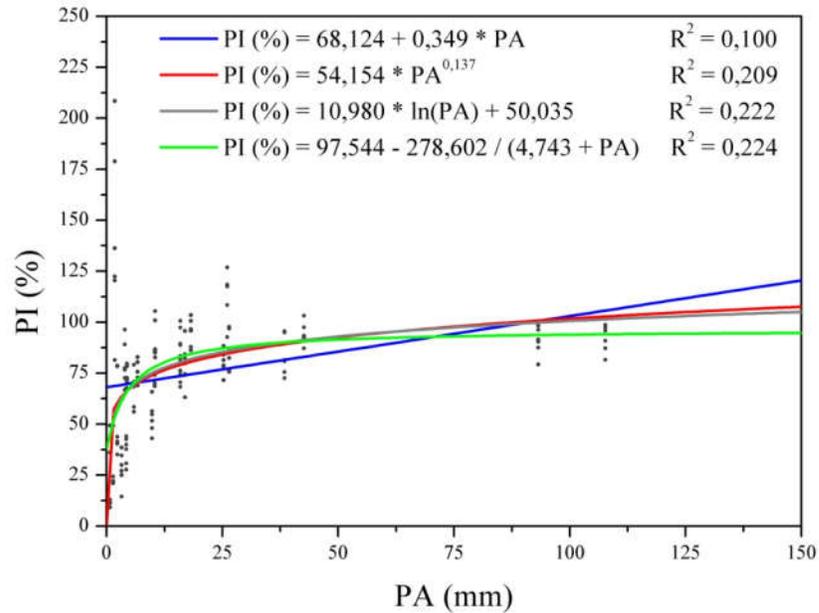


Figura 9: Representação gráfica dos modelos ajustados para a relação entre a precipitação em aberto (PA) e a fração de precipitação interna [PI(%)].

Em relação à variabilidade espacial da precipitação interna (Tabela 4), nossas estimativas (13,2 – 20,1%) estão dentro da faixa de variação das estimativas tanto para regiões tropicais e subtropicais (3 – 48%) quanto para regiões temperadas (8 – 38%). Levia e Frost (2006) associam a larga amplitude do coeficiente de variação em regiões tropicais à maior complexidade da estrutura e geometria dos dosséis nessas áreas, propiciando uma maior quantidade de potenciais pontos de gotejamento. Com base em Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014), a presença desses pontos pode ser um fator controlador da variabilidade espacial da precipitação interna em eventos onde ocorre a saturação completa do dossel, o que pode explicar a diferença de amplitude dessa variável entre regiões tropicais e temperadas.

Além disso, outros fatores como intensidade de chuvas e condições de vento, também podem afetar a variabilidade espacial da precipitação interna, diferenciando áreas tropicais de temperadas (LEVIA; FROST, 2006). Tendo em vista que grande parte do volume de precipitação interna acumulado durante o período avaliado é composto por poucos eventos fortes, há a redução da variabilidade espacial desse processo quando considerado o volume acumulado no ano. No entanto, deve-se ter cautela ao desenvolver análises na escala de eventos individuais de chuva, pois estes se caracterizam por apresentar elevada variabilidade espacial e, portanto, demandam métodos que aumentem a precisão das estimativas obtidas.

Em relação à influência da precipitação em aberto sobre essa variável, avaliada a partir de análise de regressão, foi verificada influência negativa de PA sobre  $CV_{PI}$  (Figura 7). Carlyle-Moses, Flores Laureano e Price (2004) e Teale et al. (2014) também verificaram resultados semelhantes para a relação entre essas variáveis.

Carlyle-Moses, Flores Laureano e Price (2004) verificaram um ajuste melhor para a relação entre as variáveis (0,860), utilizando um modelo exponencial para isto, no qual  $CV_{PI}$  diminui em função de PA para chuvas de até 15 mm. A partir desse volume,  $CV_{PI}$  estabiliza, mesmo com o aumento do volume precipitado. Dessa forma, esses autores verificaram que a relação entre PA e  $CV_{PI}$  é não-linear.

Já Teale et al. (2014), usando análise de regressão linear, verificaram que  $CV_{PI}$  diminui em função do aumento de PA, porém o modelo linear obtido apresentou  $R^2$  baixo ( $R^2 = 0,230$ ), indicando haver outras variáveis controlando variabilidade espacial da precipitação interna.

O resultado do ajuste de modelos para esta relação corrobora com o de Carlyle-Moses, Flores Laureano e Price (2004), que também verificaram ajuste moderado do modelo exponencial. Gráficamente, é possível observar o padrão descrito por esses autores, no qual ocorre a estabilização do  $CV_{PI}$  em eventos com grande volume de precipitação em aberto (Figura 10). Segundo os autores, isso se deve ao preenchimento da capacidade de armazenamento de todo o dossel e à formação integral de pontos de gotejamento, que se tornam estáveis em eventos fortes de chuva.

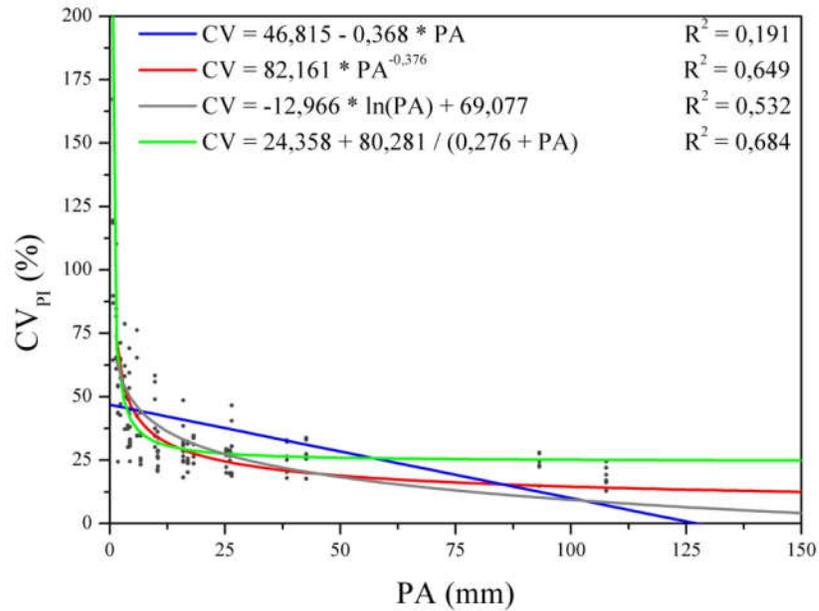


Figura 10: Representação gráfica dos modelos ajustados para a relação entre a precipitação em aberto (PA) e o coeficiente de variação da precipitação interna (CV).

Com base nisso, Carlyle-Moses, Flores Laureano e Price (2004), Staelens et al. (2006) e Teale et al. (2014) verificaram que a mudança de comportamento da variação da precipitação interna ocorreu em volumes entre 10 e 16 mm. A partir desses valores, o  $CV_{PI}$  se tornou praticamente estável, mesmo com o aumento de PA. Nossos resultados indicam que essa estabilização ocorre em volumes próximos a 12,5 mm (Figura 10), com base no modelo exponencial, que compreende o intervalo obtido pelos autores. Em eventos dessa magnitude,  $CV_{PI}$  permanece próximo 24,5%, segundo o modelo analisado.

No entanto, outros trabalhos observaram valores muito diferentes ao presente estudo, como Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014) que verificaram essa mudança na variabilidade da precipitação interna para volumes a partir de 3,5 mm de precipitação em aberto, e Ziegler et al. (2009), que verificaram o padrão apenas para eventos superiores a 30 mm. A diferença entre os resultados obtidos pode ser atribuída às diferentes capacidades de armazenamento do dossel nas formações florestais estudadas, assim como destaca Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014).

Alguns autores (CARLYLE-MOSES; FLORES LAUREANO; PRICE, 2004; CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE, 2014; FAN et al., 2015; MANFROI et al., 2006; STAELENS et al., 2006; TEALE et al., 2014), aplicando diferentes critérios (i.e. variação espacial, correlação do total acumulado), utilizaram os limiares de precipitação em aberto

onde a estabilização de  $CV_{PI}$  para a classificação de eventos entre leves ou fortes, nos quais diferentes processos hidrológicos ocorrem em taxas diferenciadas. Desse modo, é possível compreender de maneira mais detalhada como ocorrem estes processos durante eventos de diferentes magnitudes.

A partir da categorização dos eventos, pôde-se verificar que, em eventos leves, uma grande porção desse volume é interceptada pelo dossel. Conforme a capacidade de armazenamento do dossel é saturada, uma porção maior da precipitação em aberto é convertida em precipitação interna (SIEGERT et al., 2016). Apesar de o volume precipitado explicar consideravelmente a variação da precipitação interna, deve-se levar em consideração também a duração e intensidade do evento, que estão relacionados às taxas de evaporação da água interceptada (STAELENS et al., 2008).

Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014) sugerem que a variabilidade espacial da precipitação interna em eventos fortes pode estar relacionada com o coeficiente de variação da cobertura do dossel, obtendo valores de 49,5% e 48,3% para essas variáveis, respectivamente. Desta forma, se validada a relação entre elas, pode-se esperar que a complexidade da estrutura do dossel seja o fator principal de controle da variabilidade espacial da precipitação interna em eventos com grande volume de precipitação em aberto. Contudo, destaca-se que, para confirmar tal afirmação, são necessários estudos complementares que estabeleçam a relação entre estas variáveis.

De forma geral, foi possível verificar que a precipitação em aberto é a principal fonte de variação de  $PI_{mm}$  e uma das principais fontes para  $CV_{PI}$  e para  $PI_{\%}$ , principalmente em eventos de chuva de até 12,5 e 25 mm, respectivamente. Além disso, os modelos lineares permitiram verificar a influência da PA sobre as variáveis. No entanto, estes não são capazes de descrever com qualidade a relação com a  $PI_{\%}$  e o  $CV_{PI}$ .

Gotelli e Ellison (2011) afirmam que grande parte das relações ecológicas não é linear, sendo aproximações da real relação em um determinado recorte (i.e. amplitude dos dados coletados) da totalidade de variação das variáveis analisadas. Portanto, a opção por um determinado modelo para descrever a relação entre estas variáveis precisa ser feita com cautela, devendo levar em consideração a escala de trabalho e a amplitude dos dados obtidos. Ainda que alguns modelos tenham apresentado coeficientes de determinação mais elevados que outros testados, deve-se destacar que normalmente os modelos escolhidos não

compreendem todas as variáveis que determinam a variação da precipitação interna e de seu coeficiente de variação, nem as interações que ocorrem no ambiente e que a afetam (QUINN; KEOUGH, 2002), sendo consideradas apenas as mais relevantes, dentro do escopo do estudo.

Por fim, com base na sugestão de Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014), é sugerido o desenvolvimento de estudos que busquem relacionar os parâmetros dos modelos não lineares com variáveis meteorológicas e estruturais da vegetação, para realçar as principais fontes de variabilidade da precipitação interna.

## 2.5 Conclusão

De acordo com as questões definidas anteriormente, este estudo mostrou que: (1) a precipitação em aberto na área de estudo apresenta baixa heterogeneidade espacial na escala de 800 m e sua distribuição temporal é composta, principalmente, de eventos leves de chuva; (2) o volume de precipitação em aberto teve influência positiva sobre o volume ( $PI_{mm}$ ) e a fração ( $PI_{\%}$ ) de precipitação interna; (3) o volume de precipitação em aberto teve influência negativa sobre a variação espacial da precipitação interna ( $CV_{PI}$ ); e (4) a relação e PA com  $PI_{mm}$  foi mais bem explicada pelo modelo linear, enquanto modelos não lineares apresentaram melhores ajustes para  $PI_{\%}$  (logarítmico e exponencial) e  $CV_{PI}$  (exponencial).

A partir dos resultados, foi verificado que a precipitação em aberto exerce influência significativa sobre a precipitação interna, tanto em termos de volume ( $PI_{mm}$ ) quanto em fração da precipitação ( $PI_{\%}$ ). Com base na significância da relação, foi possível verificar que a precipitação em aberto é a principal fonte de variação do volume de precipitação interna. Em relação à variabilidade espacial da precipitação interna, foi verificada influência significativa da precipitação em aberto sobre esta variável, havendo redução dessa variável em função do aumento do volume de precipitação em aberto.

A partir da análise dos modelos ajustados, constatamos que, assim como outros estudos, a relação entre PA e  $PI_{mm}$  pode ser descrita satisfatoriamente por modelos lineares, possibilitando análises posteriores, como já discutido. Já as relações de  $PI_{\%}$  e de  $CV_{PI}$  com PA podem ser descritas por modelos não lineares, destacando, porém, que esses modelos possuem limitações para explicar grande parte da variação das variáveis respostas, indicando que outras variáveis podem estar exercendo influência sobre estas variáveis, demandando análises complementares para verificar a origem da variação não explicada.

De forma geral, os resultados obtidos indicam que a precipitação em aberto é uma das principais fontes de variação da precipitação interna e de sua variabilidade espacial. No entanto, parte da variação desse processo não pôde ser explicada pelos modelos de regressão linear, no que se refere a  $PI_{\%}$  e  $CV_{PI}$ .

Cabe destacar que este estudo analisou apenas um fator meteorológico que interage com precipitação interna, sendo necessário, portanto, considerar também variáveis relacionadas à intensidade e duração dos eventos de chuva, assim como de características dos ventos e da evaporação no dossel. Assim, ainda são necessários estudos que analisem a influência de outras variáveis, principalmente as de vegetação, sobre esse processo, identificando e quantificando o efeito desses fatores isoladamente e em conjunto com as características dos eventos de chuva, para que, dessa forma, seja possível avaliar a influência desses fatores e compreender a interação deles com os processos hidrológicos.

### **3 INFLUÊNCIA DAS ESTRATÉGIAS DE AMOSTRAGEM SOBRE A VARIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO INTERNA**

#### **3.1 Introdução**

A precipitação interna é um dos principais componentes do ciclo hidrológico em ecossistemas florestais, sendo definida como a porção da chuva que atinge a superfície do solo nesses ecossistemas. Esse processo é caracterizado por apresentar elevada variabilidade espacial e temporal (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005), que é definida tanto por fatores meteorológicos quanto por biológicos (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006).

Os fatores que influenciam a variabilidade da precipitação interna têm efeitos em diferentes escalas temporais e espaciais. Fatores biológicos são mais estáveis do que os meteorológicos (LEVIA; FROST, 2006; WULLAERT et al., 2009), quando analisados na escala dos eventos de chuva. Por exemplo, Ávila et al. (2014) observaram que a influência da dinâmica de crescimento e regeneração de florestas sobre a precipitação interna varia de acordo com mudanças sazonais do ambiente, que afetam a perda ou crescimento de folhas e, conseqüentemente, as perdas por interceptação do dossel. Por outro lado, as dinâmicas de variação dos fatores meteorológicos podem envolver escalas temporais e espaciais menores (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000). Nesse sentido, Van Stan, Gay e Lewis (2016) sugerem que a variação da velocidade dos ventos pode influenciar as estimativas de precipitação interna pela liberação diferenciada da água das superfícies foliares dentro de um mesmo evento de chuva.

Além das fontes naturais, variações relacionadas ao desenho amostral também podem afetar as estimativas de precipitação interna. Essas estimativas são normalmente obtidas pelo registro do volume de precipitação coletado por pluviômetros, dos quais a área de captação é conhecida. Dessa forma, elas permitem extrapolar a altura pluviométrica de água registrada para toda a área de estudo ou parcelas (LEVIA; FROST, 2006).

Devido à magnitude e escala temporal da variação dos fatores meteorológicos que afetam a interceptação pelo dossel, essa variável é difícil de ser medida diretamente (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000). Portanto, estimativas precisas da precipitação interna são essenciais para a modelagem da interceptação pelo dossel. Entretanto, as estratégias de amostragem para a precipitação interna não são padronizadas entre diferentes

estudos, afetando a precisão das estimativas e dificultando a comparação de resultados obtidos por diferentes metodologias. Estudos desenvolvidos em regiões tropicais apresentam uma ampla variedade de estratégias para esse tipo de medição (Tabela 5). Essas estratégias diferem em relação ao tipo e quantidade de pluviômetros utilizados, ao arranjo espacial deles, assim como o tipo e extensão das unidades amostrais onde eles estão instalados.

Tabela 5: Resumo das estratégias de amostragem utilizadas para a medição da precipitação interna em estudos tropicais; a estimativa média (PI) e seu coeficiente de variação (CV) também são apresentados.

<b>Autor(es)</b>	<b>Quantidade de pluviômetros</b>	<b>Arranjo espacial</b>	<b>Dimensões das unidades amostrais</b>	<b>PI (%)</b>	<b>CV (%)</b>
Albuquerque e Costa (2012) <sup>a</sup>	15	Fixo	10 m x 10 m	88	-
				93	-
Alves et al. (2007) <sup>a</sup>	25	-	20 m x 20 m	79	-
				81	-
Arcova, Cicco e Rocha (2003)	16	Fixo	20 m x 20 m	81	-
Ávila et al. (2014)	25	Fixo	16 ha	79	-
Carlyle-Moses, Flores Laureano e Price (2004)	25	Fixo	285 m <sup>2</sup>	86	4
			293 m <sup>2</sup>	82	4
Ferreira, Luizão e Dallarosa (2005) <sup>a</sup>	7	Misto	4 ha	74 – 87	-
	13			87 – 93	-
Gasparoto et al. (2014) <sup>a</sup>	10	-	15 m x 20 m	76	-
				84	-
				85	-
Gênova, Honda e Durigan (2007) <sup>a</sup>	10	Rotativo	175,5 m <sup>2</sup>	69	-
				73	-
				87	-
				88	-
Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006)	30	Fixo	Transecto de 159 m	74	48
	30	Rotativo	Transecto de 159 m	73 – 76	23
	60	Fixo	Transecto de 139 m	77	49
Limin et al. (2015)	10	-	20 m x 35 m	63	-
Lorenzon, Dias e Leite (2013) <sup>a</sup>	25	Fixo	20 m x 20 m	73	-
				84	-
Manfroi et al. (2006)	20	Fixo	10 m x 10 m	85	30
	20	Rotativo	4 ha	88	11
Moura et al. (2009)	24	Semi-Rotativo <sup>b</sup>	3.000 m <sup>2</sup>	85	-
Oliveira Júnior e Dias (2005)	25	-	20 m x 20 m	80	-

Autor(es)	Quantidade de pluviômetros	Arranjo espacial	Dimensões das unidades amostrais	PI (%)	CV (%)
Ritter e Regalado (2014)	200	Fixo	10.000 m <sup>2</sup>	41	41
Souza et al. (2007)	25	Fixo	20 m x 20 m	82	-
Teale et al. (2014)	36	Fixo	100 m <sup>2</sup>	88	21 – 36
	21		1.600 m <sup>2</sup>		29
Togashi, Montezuma e Leite (2012) <sup>a</sup>	12	Fixo	-	75	9
	6			89	15
				94	15
Tonello et al. (2014) <sup>a</sup>	10	Fixo	-	85	-
				84	-
				76	-
Wullaert et al. (2009) <sup>a</sup>	60	Fixo	Transectos de 20 m	43 – 61	12 – 17
				57 – 64	12 – 15
Ziegler et al. (2009)	4	Fixo	500 m <sup>2</sup>	82	5
	20	Rotativo	500 m <sup>2</sup>	82	10

a: Estudos conduzidos em duas ou mais fisionomias; b: Após cinco coletas, a posição de cada coletor era alterada em 1m no sentido horário, conforme posições pré-estabelecidas.

O tamanho amostral é um aspecto da estratégia de amostragem que apresenta grande variação entre os estudos sobre a precipitação interna. Por exemplo, o número de pluviômetros varia de quatro (ZIEGLER et al., 2009) até 200 coletores (RITTER; REGALADO, 2014). Alguns estudos avaliaram o efeito da mudança do número de equipamentos sobre as estimativas de precipitação interna (HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; RODRIGO; ÀVILA, 2001). Por exemplo, Rodrigo e Àvila (2001) verificaram que o aumento do número de equipamentos utilizados reduz a variabilidade dos valores estimados. Contudo, é necessário considerar outros fatores para a determinação do tamanho amostral, como as características dos eventos de chuva ou da vegetação (LEVIA; FROST, 2006; RODRIGO; ÀVILA, 2001).

Em relação ao arranjo espacial dos pluviômetros, o principal método utilizado é o arranjo fixo, no qual os pluviômetros permanecem na mesma posição durante o período de estudo. No entanto, uma alternativa comum a este método se refere ao arranjo rotativo dos equipamentos (em inglês, *roving arrangement*), que consiste no reposicionamento aleatorizado dos pluviômetros após intervalos específicos de tempo (RITTER; REGALADO, 2014). A rotação dos pluviômetros possibilita a redução dos erros associados às estimativas, produzindo valores mais precisos do que o arranjo fixo (CARLYLE-MOSES; LISHMAN;

MCKEE, 2014; HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; RITTER; REGALADO, 2014; ZIEGLER et al., 2009).

Por fim, as unidades amostrais utilizadas com maior frequência são os transectos ou parcelas quadradas (em inglês, *quadrats*; denominados a partir desse ponto apenas como parcelas). Parcelas são as principais unidades usadas em estudos de hidrologia florestal, apesar de haver uma grande variação de seus tamanhos entre os diferentes estudos, tornando difícil comparar os resultados. Teale et al. (2014) e Ziegler et al. (2009) não observaram diferenças nas estimativas produzidas por parcelas de diferentes tamanhos. No entanto, Zimmermann et al. (2016) verificaram que o tamanho da parcela tem influência sobre a precisão das estimativas, mas que esse efeito depende de outros fatores. Por exemplo, eles verificaram que parcelas menores em florestas com vegetação mais homogêneas produzem estimativas mais precisas do que em florestas heterogêneas, devido à complexidade da estrutura espacial do processo nessas áreas.

De forma geral, existem duas abordagens principais para a comparação e avaliação de estratégias de amostragem da precipitação interna: empírica (CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE, 2014; HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; MANFROI et al., 2006; ZIEGLER et al., 2006; ZUECCO et al., 2014); e baseada em simulações (RITTER; REGALADO, 2014; RODRIGO; ÀVILA, 2001; ZIMMERMANN; ZIMMERMANN, 2014; ZIMMERMANN et al., 2010, 2016). Os estudos empíricos envolvem a realização de coletas e análises de dados de precipitação interna obtidos em campo. Já os estudos baseados em simulações, que têm como base dados empíricos, derivam modelos geoestatísticos da precipitação interna, que são utilizados para simular observações realizadas com diferentes estratégias de amostragem (ZIMMERMANN et al., 2010, 2016).

Considerando que estudos de hidrologia florestal em regiões tropicais demandam uma alocação maior de recursos para a amostragem desse processo, a aplicação de uma abordagem empírica possibilita a utilização de uma menor quantidade de equipamentos, reduzindo, desta forma, os custos com coleta e análises de dados. No entanto, essa abordagem permite apenas apresentar conclusões acerca do conjunto de estratégias avaliadas, dificultando a generalização dos resultados para condições além das analisadas (ZIMMERMANN; ZIMMERMANN, 2014).

Zimmermann et al. (2016) afirmam que a aplicação de simulações permite a avaliação de vários tratamentos sistematicamente, removendo o efeito de incertezas relacionadas a outras variáveis, possibilitando, dessa maneira, a obtenção de resultados mais satisfatórios sobre a influência das estratégias de amostragem sobre as estimativas de precipitação interna. Apesar da melhoria na qualidade dos resultados, estudos desse tipo demandam previamente o levantamento detalhado sobre a variabilidade e estrutura espacial da precipitação interna (ZIMMERMANN; ZIMMERMANN, 2014). Em vista disso, optou-se pela aplicação de uma abordagem empírica para a avaliação das estratégias de amostragem da precipitação interna no presente trabalho.

A estimativa da precipitação interna é uma importante ferramenta para a gestão de bacias hidrográficas, controle da erosão do solo e da ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005; LEVIA; FROST, 2006; RODRIGO; ÀVILA, 2001), facilitando ações de manejo efetivas. Além disso, a minimização dos erros associados às estratégias de amostragem é um fator chave para prevenir erros maiores nas estimativas derivadas desses dados (RODRIGO; ÀVILA, 2001). Dessa forma, a seleção de uma estratégia de amostragem apropriada demanda conhecimento prévio sobre a área de estudo, especialmente da complexidade da estrutura da vegetação e das características meteorológicas (RITTER; REGALADO, 2014; ZIMMERMANN et al., 2016).

Tendo em vista a importância de se analisar o efeito das diferentes estratégias de amostragem, o objetivo deste capítulo foi analisar, a partir de uma abordagem empírica, o efeito de diferentes estratégias sobre as estimativas de precipitação interna, de forma a fornecer subsídios para a seleção de uma estratégia mais eficiente e precisa para a estimativa desta variável em áreas semelhantes. Portanto, foram formulados os seguintes questionamentos:

- 1) A quantidade de pluviômetros influencia as estimativas de precipitação interna?
- 2) O arranjo dos pluviômetros influencia as estimativas de precipitação interna?
- 3) O tamanho da parcela influencia as estimativas de precipitação interna?
- 4) Diferenças nas estratégias de amostragem influenciam a precisão das estimativas de precipitação interna?

## **3.2 Material e métodos**

### **3.2.1 Área de estudo**

Este estudo foi conduzido em uma floresta secundária com predominância de *Pinus elliottii* var. Elgelm. no estrato arbóreo e sub-bosque nativo em regeneração, localizada no interior da Universidade Federal de São Carlos, nas coordenadas 21°59'3,9"S e 47°52'37,5"O.

O relevo da área é fortemente ondulado, com elevações entre 820 e 843 m e declividade média de 12,4%. Áreas com este grau de declividade são propensas à perda de solos pela erosividade das chuvas. Em relação aos solos, há predominância de latossolos, que se caracterizam pelas grandes profundidades e pela textura arenosa (PAESE, 1997), promovendo a infiltração da água.

Segundo a classificação de Köppen, o clima local é caracterizado com Cwa (i.e. tropical de altitude, com verão chuvoso e inverno seco). A precipitação média anual da região é de aproximadamente 1500 mm (CEPAGRI, 2016; SANCHES, 2015), variando de 15,5 mm, em julho, a 268,7 mm, em janeiro. O período chuvoso ocorre entre outubro e março, no qual as médias mensais são superiores a 130 mm, com contribuição média de 82% para o total médio anual (CEPAGRI, 2016).

### **3.2.2 Amostragem**

Os dados de precipitação em aberto e de precipitação interna foram coletados entre os dias 13/10/2015 e 26/02/2016 em seis parcelas (10 m x 10 m), totalizando 24 eventos de chuva. Cada evento é formado por um ou mais dias de chuva acumulada (LORENZON; DIAS; LEITE, 2013; ZIEGLER et al., 2009). Para evitar que o efeito da variação espacial na estrutura da vegetação fosse confundido com diferenças entre tratamentos, o experimento foi montado na forma de blocos aleatorizados, onde cada bloco (parcela) continha todos os tratamentos. A distância entre parcelas variou de 15 a 130 metros entre si.

A precipitação em aberto foi registrada por quatro pluviômetros constituídos de polietileno tereftalato distantes em até 85 m entre si. Esses pluviômetros foram instalados em áreas abertas nas proximidades da área de estudo, distantes entre 120 e 238 m das parcelas de monitoramento da precipitação interna. Thomaz (2005) verificou que estimativas produzidas por esse tipo de pluviômetro estão fortemente correlacionadas com as produzidas por pluviômetros padrão. Apesar de serem pouco utilizados em outros países, este tipo de

pluviômetro é utilizado com frequência em estudos brasileiros, devido ao seu baixo custo (ALBUQUERQUE; COSTA, 2012; LORENZON; DIAS; LEITE, 2012; THOMAZ, 2005).

A precipitação interna foi estimada por 30 pluviômetros de polietileno tereftalato em cada parcela. Os pluviômetros para o registro dessa variável foram posicionados no interior de cada parcela, seguindo um padrão espacial que permitisse testar as questões do estudo.

Para avaliar o efeito do número de pluviômetros sobre as estimativas de precipitação interna (Questão 1), três tratamentos com diferentes quantidades de pluviômetros foram instalados nas parcelas: Tratamento A (5 pluviômetros); Tratamento B (9 pluviômetros); e Tratamento C (16 pluviômetros). Os pluviômetros foram instalados homogeneamente em posições fixas (Figura 11) que ocuparam a mesma área no interior da parcela. A fim de garantir a independência das estimativas, pluviômetros diferentes (i.e. independentes) foram instalados para cada tratamento.

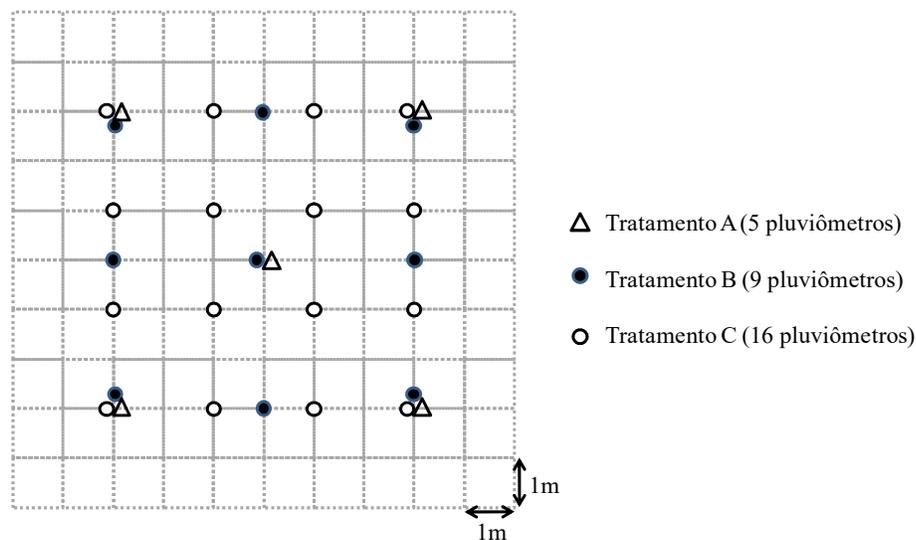
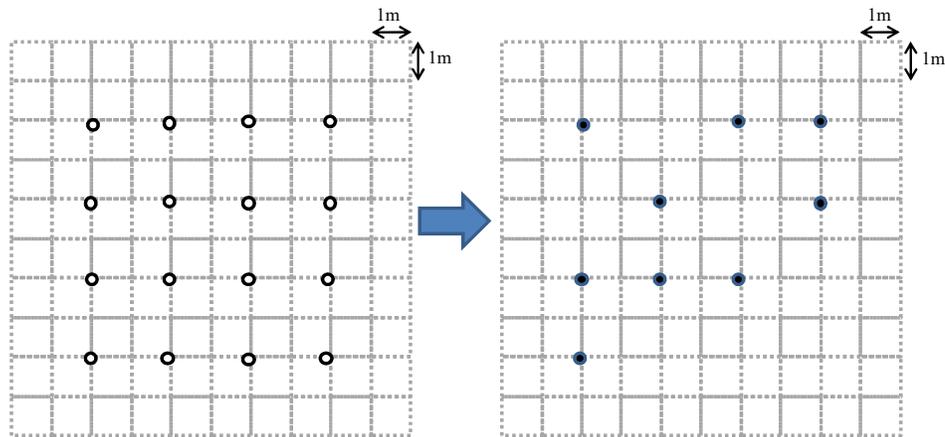


Figura 11: Representação esquemática da distribuição dos pluviômetros usada para avaliar os efeitos da quantidade de pluviômetros sobre as estimativas de precipitação interna; note que nas localidades onde há sobreposição de pluviômetros dos diferentes tratamentos, como nos vértices e no centro da parcela, foram instalados pluviômetros diferentes para cada tratamento, de forma a garantir a independência das observações.

Para avaliar o efeito do arranjo espacial sobre a precipitação interna (Questão 2), foram definidos dois tratamentos: nove pluviômetros fixos (baseados no Tratamento B da Questão 1); e nove pluviômetros rotativos, selecionados aleatoriamente do conjunto de 16 posições do Tratamento C da Questão 1 (ilustrado na Figura 12) após cada evento de chuva, de maneira análoga a Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006).



**Legenda:**

- Conjunto total de possíveis posições
- Disposição aleatorizada dos pluviômetros

Figura 12: Exemplo de seleção aleatória de nove pluviômetros para o arranjo rotativo (direita) a partir das 16 posições possíveis (esquerda), derivadas do Tratamento C para o teste da Questão 1.

Para avaliar o efeito do tamanho da parcela sobre as estimativas (Questão 3), foram definidos dois tratamentos: nove pluviômetros fixos em grades de 4 m x 4 m (definidos a partir dos pluviômetros do Tratamento C da Questão 1); e nove pluviômetros fixos em grades de 6 m x 6 m (definidos com base no Tratamento B da Questão 1; Figura 3). É importante ressaltar que ambos os tratamentos dessa questão estavam dentro do mesmo regime de chuva.

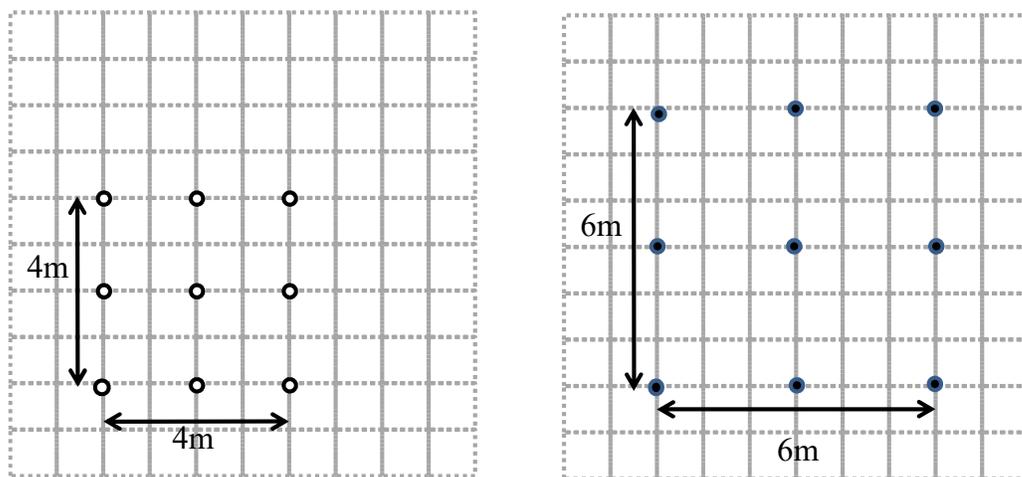


Figura 13: Representação esquemática da distribuição dos pluviômetros para avaliar o efeito do tamanho das parcelas sobre as estimativas de precipitação interna; a parcela de 4 m x 4 m (esquerda) foi definida com base em uma porção do Tratamento C da Questão 1, e a de 6 m x 6m (direita) com base no Tratamento B.

### 3.2.3 Análise de dados

Para comparar as estimativas das diferentes estratégias para cada questão, os dados foram resumidos em termos de média aritmética, desvio padrão, coeficiente de variação (métrica utilizada para representar a variação espacial da precipitação interna; HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; LEVIA; FROST, 2006; ZIEGLER et al., 2009), erro padrão e erro no intervalo de confiança de 95%. A última métrica é usada para avaliar a precisão dos dados de precipitação interna, indicando a magnitude do erro em relação aos valores observados. A Equação 7 é utilizada para calcular o erro no intervalo de confiança de 95%:

$$ERM_{95,t} = 100 \left( \frac{1,96 \times EP_t}{PI_t} \right) \quad (7)$$

Onde:  $ERM_{95,t}$  é o erro relativo da média para o intervalo de confiança de 95% no tratamento  $t$ ;  $EP_t$  é o erro padrão do conjunto de dados do tratamento  $t$ ; e  $PI_t$  é a média da precipitação interna acumulada (em mm) durante o período de estudo do tratamento  $t$ . Erros abaixo de 10% são, com frequência, considerados aceitáveis (HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; RODRIGO; ÀVILA, 2001; ZIMMERMANN et al., 2010).

Para testar os efeitos das diferentes estratégias sobre as estimativas de precipitação interna, foi utilizada Análise de Covariância (ANCOVA) para comparar diferenças nos modelos lineares obtidos (QUINN; KEOUGH, 2002; ZAR, 2010). As estratégias de amostragem foram definidas como fatores; a precipitação em aberto como covariável; e as estimativas de precipitação interna [i.e. precipitação interna média e coeficiente de variação dentro de parcelas ( $CV_{dentro}$ )] como variáveis resposta.

As análises foram conduzidas para os seguintes conjuntos de dados: todos os eventos de chuva; eventos abaixo da mediana de precipitação em aberto (definidos como eventos leves); e eventos acima da mediana (definidos como eventos fortes). Os dados foram previamente comparados com a distribuição normal por testes de Shapiro-Wilk. Quando diferenças significativas foram observadas, os dados foram transformados usando-se funções logarítmicas [ $\ln(x)$ ] ou de potência ( $x^{-1}$ ,  $x^{-1/2}$  ou  $x^{-1/3}$ ). O nível de significância utilizado no estudo foi  $P < 0,05$ .

### 3.3 Resultados

Durante o período de amostragem, o registro médio de PA por evento foi de 20,5 mm (variando de 0,7 a 107,7 mm). A mediana dos eventos foi de 10,44 mm, e esse valor foi usado

para categorizar os eventos como leves ou fortes. A PA acumulada pelos pluviômetros no período do estudo foi de 492,1 mm.

No mesmo período, a precipitação interna acumulada foi de 430 mm (87% da precipitação em aberto). O registro médio por evento foi de aproximadamente 75% (variando de 0 até 403,3%). Foram observados, em média, 38 pontos de gotejamento (i.e. locais onde a precipitação interna era superior à precipitação em aberto) por evento, para o conjunto de dados completo. Em eventos leves, houve 24 pontos de gotejamento por evento; e 52 foram observados em eventos fortes.

Considerando a variação espacial da precipitação interna acumulada dentro de cada parcela, foi observado um coeficiente de variação médio de 16,6% para o conjunto de dados que compreende todos os eventos de chuva (variando de 13,2 a 20,1%). Analisando os eventos de chuva de diferentes magnitudes, foi verificado que o coeficiente de variação em eventos leves foi de 26,5 % (22,2 – 33,8%), valor superior ao registrado em eventos fortes, que foi de 16,4% (12,9 – 20,1%).

Os resultados da ANCOVA (Tabela 6) mostram que os tratamentos com diferentes quantidades de pluviômetros não têm efeito sobre as estimativas de precipitação interna ( $P > 0,05$ ), mesmo ajustando esse efeito para os registros de precipitação em aberto por evento. Esse resultado é observado tanto para o conjunto completo de dados, quanto para eventos de diferentes magnitudes.

Tabela 6: Resumo dos resultados da ANCOVA para avaliar o efeito das diferentes estratégias de amostragem sobre as estimativas de precipitação interna de acordo com as diferentes questões (definidas anteriormente); N representa o tamanho amostral; as colunas de Comparação da tendência geral, Comparação dos interceptos e Comparação dos coeficientes angulares apresentamos valores da estatística F obtidos na análise; valores em negrito indicam efeitos significativos (\*  $P < 0,05$ , \*\*  $P < 0,01$ , e \*\*\*  $P < 0,001$ ).

Questão	Conjunto de dados	Variável Resposta	N	Comparação da tendência geral	Comparação dos interceptos	Comparação dos coeficientes angulares
1	Total de eventos	PI <sup>a</sup>	69	<b>2215,4***</b>	0,2	>0,1
		CV <sub>dentro</sub> <sup>b</sup>	72	<b>218,3***</b>	<0,1	1,7
	Eventos leves	PI <sup>a</sup>	36	<b>130,7***</b>	0,1	>0,1
		CV <sub>dentro</sub> <sup>c</sup>	36	<b>51,6***</b>	<0,1	0,6
	Eventos fortes	PI <sup>a</sup>	35	<b>1751,1***</b>	<0,1	>0,1
		CV <sub>dentro</sub>	36	<b>22,7***</b>	0,3	0,5
2	Total de eventos	PI <sup>a</sup>	46	<b>1449,6***</b>	<0,1	>0,1
		CV <sub>dentro</sub> <sup>c</sup>	48	<b>178,7***</b>	0,1	1,0
	Eventos leves	PI <sup>a</sup>	22	<b>240,5***</b>	<0,1	>0,1
		CV <sub>dentro</sub> <sup>c</sup>	24	<b>43,1***</b>	<0,1	0,1
	Eventos fortes	PI <sup>a</sup>	22	<b>2094,8***</b>	<0,1	0,1

Questão	Conjunto de dados	Variável Resposta	N	Comparação da tendência geral	Comparação dos interceptos	Comparação dos coeficientes angulares
3	Total de eventos	CV <sub>dentro</sub> <sup>c</sup>	24	<b>12,7**</b>	<0,1	0,2
		PI <sup>a</sup>	46	<b>1467,2***</b>	<0,1	>0,1
		CV <sub>dentro</sub> <sup>d</sup>	48	<b>130,4***</b>	0,1	0,9
	Eventos leves	PI <sup>a</sup>	22	<b>235,1***</b>	<0,1	>0,1
		CV <sub>dentro</sub> <sup>c</sup>	24	<b>23,2***</b>	<0,1	>0,1
	Eventos fortes	PI <sup>a</sup>	22	<b>2161,5***</b>	0,3	0,3
	CV <sub>dentro</sub> <sup>c</sup>	23	<b>10,8**</b>	1,5	2,2	

a: dados transformados para escala logarítmica; b: dados transformados para o inverso da raiz cúbica (-1/3); c: dados transformados para o inverso da raiz quadrada (-1/2); d: dados transformados para a escala inversa (-1).

Considerando o erro no intervalo de confiança de 95% (Tabela 7), apenas o Tratamento C (16 pluviômetros) produziu estimativas com erros inferiores a 10%. Apesar de ser mais precisa que as outras, essa estratégia excedeu a margem de erro em eventos leves de chuva (14,3%; Tabela 7).

Tabela 7: Descritores dos conjuntos de dados obtidos para as estratégias com diferentes tamanhos amostrais; PA = precipitação em aberto, PI = precipitação interna, DP = desvio padrão, CV = coeficiente de variação da precipitação interna acumulada dentro das parcelas, EP = erro padrão, ERM<sub>95</sub> = erro no intervalo de confiança de 95%.

Conjunto de dados	Total de Chuvas			Eventos Leves			Eventos Fortes		
	Nº. de eventos	24			12			12	
PA (mm)	492,1			54,8			437,2		
Tratamento	A	B	C	A	B	C	A	B	C
PI ± 1DP (mm)	439,1 ± 54,7	423,2 ± 68,5	430,1 ± 77,6	36,9 ± 8,6	34,5 ± 7,9	34,9 ± 10,4	402,2 ± 49,3	388,7 ± 62,2	396,1 ± 70,5
PI/PA (%)	89,2 ± 11,1	86,0 ± 13,9	87,6 ± 13,9	67,3 ± 16,0	63,0 ± 14,4	63,7 ± 19,0	92,0 ± 11,3	88,9 ± 14,2	90,6 ± 16,1
CV (%)	12,4	16,3	17,9	22,8	22,8	29,2	12,2	16,1	17,7
EP (mm)	24,5	22,8	19,4	3,8	2,6	2,6	22,0	20,7	17,6
ERM <sub>95</sub> (%)	10,9	10,6	8,8	20,0	14,9	14,3	10,7	10,5	8,7

No que diz respeito à Questão 2, não foram observados efeitos significativos dos diferentes arranjos espaciais sobre as estimativas do valor médio e de variação espacial da precipitação interna para nenhum dos conjuntos de dados (Tabela 6).

Além disso, verificamos que o arranjo rotativo produz estimativas mais precisas do que o arranjo fixo (Tabela 8). De maneira semelhante ao verificado para a Questão 1, não foi possível obter erros relativos abaixo de 10% para eventos leves; nesse caso, o arranjo fixo produziu melhores resultados do que o rotativo.

Tabela 8: Descritores dos conjuntos de dados obtidos para as estratégias com diferentes arranjos espaciais; PA = precipitação em aberto, PI = precipitação interna, DP = desvio padrão, CV = coeficiente de variação da precipitação interna acumulada dentro das parcelas, EP = erro padrão, ERM<sub>95</sub> = erro no intervalo de confiança de 95%.

Conjunto de dados	Total de Chuvas		Eventos Leves		Eventos Fortes	
Nº. de eventos	24		12		12	
PA (mm)	492,1		54,8		437,2	
Tratamento	Fixo	Rotativo	Fixo	Rotativo	Fixo	Rotativo
PI ± 1DP (mm)	423,2 ± 68,5	434,8 ± 81,1	34,5 ± 7,9	35,0 ± 11,0	388,7 ± 62,2	403,0 ± 78,4
PI/PA (%)	86,0 ± 13,9	88,4 ± 16,5	63,0 ± 14,4	63,9 ± 20,1	88,9 ± 14,2	92,2 ± 17,9
CV (%)	16,3	18,6	22,8	31,3	16,1	19,4
EP (mm)	22,8	20,3	2,6	2,7	20,7	19,6
ERM <sub>95</sub> (%)	10,6	9,1	14,9	15,3	10,5	9,5

Para a Questão 3, não foi verificado efeito significativo do tamanho da parcela sobre as estimativas de precipitação interna para nenhum dos conjuntos de dados (Tabela 6). Além disso, nenhum dos tratamentos produziu estimativas com erros inferiores a 10%, principalmente nos eventos leves de chuvas, onde os erros foram relativamente maiores (Tabela 9).

Tabela 9: Descritores dos conjuntos de dados obtidos para as estratégias com parcelas de diferentes tamanhos; PA = precipitação em aberto, PI = precipitação interna, DP = desvio padrão, CV = coeficiente de variação da precipitação interna acumulada dentro das parcelas, EP = erro padrão, ERM<sub>95</sub> = erro no intervalo de confiança de 95%.

Conjunto de dados	Total de Chuvas		Eventos Leves		Eventos Fortes	
Nº. de eventos	24		12		12	
PA (mm)	492,1		54,8		437,2	
Tratamento	4 m x 4 m	6 m x 6 m	4 m x 4 m	6 m x 6 m	4 m x 4 m	6 m x 6 m
PI ± 1DP (mm)	426,6 ± 68,3	423,2 ± 68,5	34,2 ± 10,0	34,5 ± 7,9	392,3 ± 62,1	388,7 ± 62,2
PI/PA (%)	86,7 ± 13,9	86,0 ± 13,9	62,4 ± 18,2	63,0 ± 14,4	89,7 ± 14,2	88,9 ± 14,2
CV (%)	15,7	16,3	27,9	22,8	15,5	16,1
EP (mm)	22,8	22,8	3,3	2,6	20,7	20,7
ERM <sub>95</sub> (%)	10,3	10,6	18,2	14,9	10,1	10,5

Apesar de não serem verificados efeitos das diferentes estratégias de amostragem sobre as estimativas de precipitação interna, a precipitação em aberto teve influência significativa sobre as estimativas, inclusive para diferentes magnitudes de chuva (Tabela 6). A partir do modelo de regressão linear, os dados de precipitação em aberto explicaram pelo menos 92,5% (R<sup>2</sup> ajustado) da variação dos dados de precipitação interna. Em eventos fortes, a relação entre as variáveis foi mais pronunciada: o R<sup>2</sup> ajustado variou entre 0,978 e 0,991.

Quanto ao coeficiente de variação, verificamos que esta variável é explicada razoavelmente pela precipitação em aberto, tanto para o conjunto de dados com todos os eventos ( $R^2$  ajustado mínimo de 0,600), quanto para os eventos leves (0,514). Em eventos fortes, foi verificado que a proporção explicada pela precipitação em aberto é pequena (entre 0,294 e 0,400), indicando que, em eventos fortes de chuva, outros fatores determinam a variabilidade espacial da precipitação interna dentro das parcelas.

### 3.4 Discussão

O valor estimado para a contribuição da precipitação interna em relação à precipitação em aberto neste estudo (87% da precipitação em aberto) é próximo aos valores obtidos em outros estudos em regiões tropicais, como Albuquerque e Costa (2012), Gasparoto et al. (2014), Gênova, Honda e Durigan (2007), Lorenzon, Dias e Leite (2013), Manfroi et al. (2006), Moura et al. (2009), Teale et al. (2014). Togashi, Montezuma e Leite (2012) e Tonello et al. (2014). No entanto, outros estudos obtiveram valores menores de precipitação interna do que os verificados neste estudo (Tabela 5). Essa diferença pode estar associada a diferenças climáticas entre as áreas de estudo, a características meteorológicas, à composição de espécies e à estrutura da vegetação (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006).

Verificamos que a precipitação em aberto teve efeitos significativos sobre a precipitação interna registrada e seu coeficiente de variação (Tabela 6) nas estratégias de amostragem avaliadas. Os efeitos sobre a estimativa média também foram relatados em outros estudos (ARCOVA, CICCIO; ROCHA, 2003; CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE, 2014; FERREIRA; LUIZÃO; DALLAROSA, 2005; LORENZON; DIAS; LEITE, 2013; MOURA et al., 2009; PEREZ-MARIN; MENEZES, 2008; ZIEGLER et al., 2009). O efeito da precipitação em aberto sobre o coeficiente de variação também foi verificado em outros estudos (HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; TEALE et al., 2014; ZIEGLER et al., 2009). Entretanto, foi verificado que o coeficiente de variação obtido em eventos leves de chuva são maiores do que em eventos fortes, sugerindo que, a partir de um determinado volume de precipitação em aberto, a variação do coeficiente de variação não é mais explicada por essa variável, indicando que outros fatores podem estar determinando a variabilidade das estimativas. Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014) obtiveram resultados similares, sugerindo que essa variação pode ser explicada por métricas de cobertura do dossel.

Os resultados deste estudo também sugerem que não há diferença nas estimativas entre os tratamentos com diferentes quantidades de pluviômetros testados (Questão 1), ao

manter-se a área de amostragem constante. Outros estudos também verificaram não haver diferenças entre as estimativas médias da precipitação interna obtidas por diferentes quantidades de pluviômetros (HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; RODRIGO; ÀVILA, 2001; ZIEGLER et al., 2009). No entanto, nossos resultados mostram que a precisão das estimativas em relação ao valor médio acumulado de precipitação interna foi influenciada pelas diferentes quantidades de pluviômetros. Por exemplo, considerando o erro no intervalo de confiança de 95%, o Tratamento C (16 pluviômetros) atingiu valores considerados aceitáveis na literatura, indicando que, em termos de quantidade, esta seria a estratégia mais apropriada de amostragem em nossa área de estudo. Entretanto, considerando apenas os eventos leves de chuva, os tratamentos aplicados não são suficientes para garantir a precisão esperada das estimativas de precipitação interna.

Esse resultado é consistente com o verificado por Zimmermann et al. (2010) e Zuecco et al. (2014). Os autores discutem a necessidade de mais pluviômetros para estudos de precipitação interna em regiões com esse tipo de eventos (nos quais há elevada variabilidade) do que em áreas com fortes eventos de chuva. Por exemplo, Zimmermann et al. (2010) verificaram que em eventos menores que 1 mm são necessários até 1.300 pluviômetros para a obtenção de estimativas com erros de até 10%, enquanto são necessários cerca de 430 para o mesmo nível de erro em eventos maiores que 1 mm. Portanto, parece haver efeito conjunto da precipitação em aberto e da quantidade de pluviômetros sobre a precisão das estimativas.

De acordo com Rodrigo e Àvila (2001), são necessários, ao menos, nove pluviômetros para a obtenção de estimativas de precipitação interna com erros menores que 10%. Em contrapartida, Zuecco et al. (2014), considerando os eventos de chuva individualmente, estimaram que são necessários pelo menos 12 pluviômetros para atingir erros inferiores a esse limiar, sendo que, em alguns dos eventos analisados, o número de pluviômetros poderia chegar a 185, devido à elevada variabilidade. No entanto, nossos resultados indicam que as quantidades mínimas sugeridas (9 – 12) não são suficientes para garantir erros inferiores aos pré-estabelecidos, nem considerando apenas os eventos fortes. Isso pode ser atribuído às diferentes condições (i.e. meteorológicas e fatores estruturais da vegetação) entre as regiões onde os estudos foram conduzidos, demandando diferentes quantidades de pluviômetros para estimativas com o mesmo nível de precisão.

Em relação à Questão 2, verificamos que não houve diferença entre as estimativas médias da precipitação interna entre os arranjos fixos e rotativos dos pluviômetros, resultado também verificado por Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014) e Ziegler et al. (2009). Entretanto, nossos resultados não corroboram os de Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006) e Ritter e Regalado (2014) relativos ao coeficiente de variação, uma vez que esses autores verificaram diferenças entre as estimativas de arranjos fixos e rotativos. Segundo Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006), a redução da variação das estimativas é atribuída à maior área de amostragem que o arranjo rotativo pode cobrir, que promove a coleta de dados em um conjunto mais amplo de pontos de amostragem (i.e. o número de pontos efetivos de amostragem tende ao número de pontos disponíveis), mesmo comparando com uma quantidade igual de pluviômetros em arranjos diferentes.

As diferenças observadas neste estudo podem ser atribuídas a limitações na disponibilidade de posições para rotação dos pluviômetros, que foi maior no estudo de Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006). Dessa forma, os autores puderam integrar uma porção mais representativa da área de estudo e, portanto, reduzir a variabilidade dos dados entre os pluviômetros. Por outro lado, Ziegler et al. (2009) verificaram menores coeficientes de variação no arranjo fixo do que no arranjo rotativo (Tabela 5), um resultado diferente do observado em nosso estudo. Porém, esse resultado pode ser explicado pelo tipo de pluviômetro utilizado na coleta da precipitação interna. Os autores usaram coletores do tipo calha (em inglês, *trough collector*), que integram uma área maior do dossel florestal, em comparação com os pluviômetros do tipo funil, reduzindo a influência de valores extremos no conjunto de dados (HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; RITTER; REGALADO, 2014).

O erro no intervalo de confiança de 95% do arranjo rotativo foi inferior ao do arranjo fixo para o conjunto de dados completo e para eventos fortes. Esses resultados também estão de acordo com outros estudos (CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE., 2014; HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006; RITTER; REGALADO, 2014; ZIEGLER et al., 2009). Para Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014) e Ritter e Regalado (2014), a melhoria da precisão das estimativas relacionadas ao arranjo rotativo não está vinculada somente à quantidade de pluviômetros, mas também ao número de posições disponíveis para a realocação ou à frequência da rotatividade deles. Portanto, o aumento na quantidade dos pontos para a rotação dos pluviômetros poderia ser capaz de reduzir o erro no intervalo de

confiança de 95% para níveis abaixo de 10% em eventos leves de chuva em nossa área de estudo. Isso possibilitaria a redução de custos de consumo e logística em experimentos semelhantes.

De acordo com Holwerda, Scatena e Bruijnzeel (2006) e Ritter e Regalado (2014), as diferenças entre os arranjos podem ser explicadas pela redução da influência de valores extremos nas estimativas, causada pela intensificação da rotatividade de pluviômetros, que induz à redução da variabilidade dos dados. A influência de valores extremos é determinada, principalmente, pela presença de pontos de gotejamento, que concentram o volume de precipitação interna e de proteção, que divergem a água para outros pontos, tornando a distribuição dos dados assimétrica e dispersa. Tendo em vista que a distribuição espacial desses pontos persiste entre os eventos de chuva (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005), a rotação dos equipamentos parece ser um método eficiente para reduzir a influência desses valores e produzir estimativas com maior precisão.

Em relação à Questão 3, não foi verificado efeito significativo do tamanho das parcelas sobre as estimativas de precipitação interna. Resultados semelhantes foram obtidos por Ziegler et al. (2009) e Teale et al. (2014), que não verificaram diferenças entre as estimativas de parcelas de tamanhos diferentes. Além disso, nenhum dos tratamentos dessa questão atingiu os níveis pré-estabelecidos de erro para os conjuntos de dados analisados. Esse resultado pode ser explicado pela quantidade de pluviômetros aplicados (nove) e seu arranjo espacial (fixo), que não são capazes de estimar a precipitação interna com a precisão esperada. Desta forma, é necessária a aplicação de um tamanho amostral superior ao aplicado neste estudo para obter erros relativos abaixo de 10%. Contudo, as parcelas de 4 m x 4 m apresentaram erros inferiores as de 6 m x 6 m para o conjunto de dados completo e para eventos fortes de chuva. Teale et al. (2014) também obtiveram resultado semelhante, onde parcelas de 100 m<sup>2</sup> apresentaram coeficientes de variação menores do que parcelas de 1.600 m<sup>2</sup>, com exceção de uma área, devido a um pluviômetro gerador de valores extremos (com precipitação interna de 246%).

As características do relevo também parecem ter sido fontes de variação dos erros nas estimativas. A Parcela 2, que apresenta a declividade média (13,2%), apresentou erros abaixo de 10% nas estimativas para todas as estratégias testadas. Enquanto a Parcela 1, que apresentou a menor declividade (5,8%), apresentou maiores erros em quantidades reduzidas de pluviômetros do que a maioria das outras parcelas. Com base em Siegert et al. (2016),

essas diferenças podem ser atribuídas à estruturação da arquitetura do dossel, que é determinada, indiretamente, pelas condições microclimáticas, determinadas por características do relevo, gerando condições específicas de fluxo hídrico e energético (i.e. solar) e influenciando a composição vegetal nessas localidades, além do tamanho efetivo das parcelas. Dessa forma, as características do relevo podem estar afetando a complexidade da estrutura da vegetação e, conseqüentemente, a precisão das estimativas obtidas no local. Logo, para aumentar a precisão das estimativas, são necessários estudos suplementares para descrever e avaliar a estrutura espacial da precipitação interna na área de estudo, compreender a influência do relevo sobre a precisão das estimativas e, também, avaliar o tamanho ideal de parcelas em outras regiões.

Apesar de verificarmos ausência de influência significativa do tamanho das parcelas sobre as estimativas, Zimmermann et al. (2016) verificou que os erros associados à estimativa média podem ser de 8 a 70% em parcelas de 10 m x 10 m; e de 2 a 12% em parcelas de 50 m x 50 m. No entanto, eles destacam que a influência relativa do tamanho da parcela varia de acordo com outros fatores. Por exemplo, comparando eventos de chuva de mesma magnitude, os erros relativos das estimativas médias são maiores em florestas complexas do que em florestas simplificadas, havendo também redução dos erros com o aumento do volume precipitado.

Além disso, Zimmermann et al. (2016) faz a ressalva de que estudos empíricos não permitem avaliar isoladamente o efeito do tamanho da parcela sobre a precisão das estimativas de precipitação interna. Segundo eles, a simulação de amostragens permite testar sistematicamente os diferentes tratamentos (i.e. tamanhos de parcelas), isolando os demais fatores de incerteza.

### **3.5 Conclusão**

De acordo com as questões previamente propostas, nossos resultados sugerem que: (1) as quantidades de pluviômetros testadas não influenciam as estimativas da precipitação interna; (2) os arranjos espaciais testados não influenciam as estimativas de precipitação interna; (3) as parcelas de diferentes tamanhos testadas não influenciam as estimativas de precipitação interna; e (4) há influências das estratégias de amostragem sobre a precisão das estimativas na área de estudo. Apenas as estratégias com 16 pluviômetros fixos e com nove pluviômetros rotativos produziram estimativas com erros menores que 10%, devido ao aumento de representatividade espacial promovido por estas estratégias. Portanto, não foi

verificada influência das estratégias de amostragem sobre estimativas médias e coeficiente de variação da precipitação interna; apenas foi possível categorizá-las como adequadas de acordo com o erro no intervalo de confiança de 95%.

Apesar dos aspectos tratados nessa pesquisa, há outros que devem ser levados em consideração para determinar a estratégia de amostragem. A precipitação em aberto apresentou grande influência sobre as variáveis observadas. Portanto, um bom conhecimento do clima e das características meteorológicas da área de estudo é um fator chave para a definição de estratégias de amostragem, considerando a precisão dos dados a serem obtidos. No entanto, devido à pequena variedade de estratégias analisadas, enfatizamos que são necessários mais estudos que avaliem a influência de outras combinações de estratégias de amostragem sobre as estimativas de precipitação interna em ecossistemas tropicais, especialmente no Brasil.

Entre os estudos considerados nesse trabalho, poucos discutiram a variação espacial da precipitação interna (ou apenas apresentaram essa informação). No entanto, esse parâmetro é importante para a definição de estratégias de amostragem a serem utilizadas e para gerir a precisão das estimativas.

Por fim, tendo em vista a importância da variabilidade dos dados sobre as estimativas e suas aplicações para a gestão de ecossistemas florestais e de recursos hídricos, sugerimos que estudos focados na coleta de dados hidrológicos em ecossistemas florestais apresentem metodologias mais detalhadas, para permitir a reprodução dos experimentos e avaliação da precisão dos dados. Além disso, há necessidade de mais pesquisas que aprofundem o conhecimento nesse tema, possibilitando a definição de estratégias e obtenção de parâmetros com maior precisão para esses objetivos.

## **4 INFLUÊNCIA DA ESTRUTURA DA VEGETAÇÃO SOBRE A VARIAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE PRECIPITAÇÃO INTERNA**

### **4.1 Introdução**

A cobertura florestal tem papel fundamental sobre o balanço hídrico em bacias hidrográficas. Bacias com elevado grau de cobertura florestal possuem menores valores de vazão de água, quando comparadas com bacias com menor cobertura (BALBINOT et al., 2008; LIMA, 2008). Em escalas locais, a vegetação influencia uma série de processos físicos que envolvem a distribuição da precipitação incidente sobre ela, afetando os processos hidrológicos nesses ecossistemas, e a quantidade e qualidade da água durante esse deslocamento (BRAUMAN; FREYBERG; DAILY, 2010; CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006).

A precipitação interna representa a fração da precipitação que atravessa o dossel e alcança a superfície florestal, seja diretamente ou após interação com elementos da vegetação, sendo um processo que apresenta elevada variabilidade espacial e temporal, podendo ser afetada por uma ampla variedade de componentes da vegetação, simultaneamente a outros fatores abióticos, que atuam em diferentes escalas sobre ela (KONISHI et al., 2006; LEVIA; FROST, 2006).

Entre os fatores bióticos que afetam a variabilidade da precipitação interna, estão a arquitetura e estrutura do dossel, composição e heterogeneidade de espécies, que influenciam na diversidade de traços funcionais das folhas (ÁVILA et al., 2014; CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006). A variação e interação entre esses fatores determinam densidade e superfície foliar no dossel, que alteram a capacidade de armazenamento de água nesse compartimento e as perdas por interceptação (CHAPPELL; BIDIN; TYCH, 2001), controlando o volume que é convertido em precipitação interna. Nesse sentido, Carlyle-Moses, Lishman e McKee (2014) afirmam que a principal influência da vegetação sobre a variabilidade espacial da precipitação interna é controlada pelas diferenças nos níveis de saturação da capacidade de armazenamento do dossel. Assim, diferentes composições estruturais resultariam em capacidades diferenciadas de armazenamento de água, afetando a passagem de água da atmosfera para o piso florestal.

Além dos fatores em maior escala, a morfologia e fisiologia das folhas também exercem influência sobre o processo, afetando a capacidade de retenção e tempo de residência

da água na superfície foliar. A textura da superfície foliar, o formato, a espessura da cutícula e a orientação das folhas são os principais atributos que determinam a influência da vegetação em escalas muito finas sobre a partição da precipitação em aberto entre precipitação interna e escoamento pelo tronco (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; LEVIA; FROST, 2006).

Apesar de alguns estudos não observarem relações significativas entre a estrutura da vegetação e dados de precipitação interna (e.g. KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005; KONISHI et al., 2006; KOWALSKA et al., 2016; STYGER; KIRKPATRICK; UNWIN, 2016), outros trabalhos obtiveram relações significativas (e.g. MOLINA; DEL CAMPO, 2012; PARK; CAMERON, 2008; STAELENS et al., 2006). Esses últimos demonstram que a vegetação tem influência sobre a variabilidade da precipitação interna, mas que esta depende de sua relação com outros parâmetros, inclusive os abióticos, para que sua influência seja significativa.

Por exemplo, em eventos leves de chuva, as diferenças estruturais do dossel interagem mais intensamente com a precipitação interna, devido à variabilidade espacial da capacidade de armazenamento do dossel (BRAUMAN; FREYBERG; DAILY, 2010), o que resulta em elevada heterogeneidade espacial deste processo hidrológico. Em eventos fortes, a saturação do dossel reduz a interação da estrutura com a partição da água, diminuindo sua influência sobre sua variabilidade (STAELENS et al., 2006).

Alguns estudos verificaram efeito de mudanças sazonais sobre a distribuição da precipitação interna em ecossistemas florestais (KOWALSKA et al., 2016; STAELENS et al., 2008). Staelens et al. (2008) explicam que essa variação se deve a alterações das características e da distribuição das folhas em função das estações climáticas. Dessa maneira, a vegetação de uma determinada área pode afetar a taxa e a distribuição espacial da precipitação interna com diferentes magnitudes em diferentes momentos do ano.

Contudo, os padrões espaciais da precipitação interna são, em certo nível, consistentes entre eventos de chuvas (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005), devido à interação entre os fatores meteorológicos e as estruturas da vegetação (CARLYLE-MOSES; LISHMAN, 2015). A existência de padrões espaciais persistentes no tempo gera gradientes de umidade no solo, que promovem taxas diferenciadas de percolação no perfil de solo (KLOS et al., 2014) e influenciam o desenvolvimento de processos biogeoquímicos em ecossistemas

florestais (ROSIER et al., 2015; STAELENS et al., 2006; ZIMMERMANN; ZIMMERMANN; ELSENBEER, 2009).

Um dos métodos para avaliar a persistência temporal da precipitação interna é o gráfico de estabilidade temporal. Este gráfico indica padrões de variabilidade da precipitação interna em relação às medidas centrais de cada um dos eventos de chuva, apontando a presença de locais consistentemente secos ou úmidos (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005; KOWALSKA et al., 2016; STAELENS et al., 2006; WULLAERT et al., 2009). Além da avaliação da precipitação interna, esses gráficos possuem diversas outras possibilidades de aplicações em estudos de hidrologia florestal, como avaliar a distribuição espacial dos componentes presentes na precipitação interna (ALLEN et al., 2014; KOWALSKA et al., 2016). Eles revelam duas formas principais de persistência: geral e extrema (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005). A persistência geral é identificada na região interquartil do gráfico, indicando pontos com propensão moderada a diferirem do valor médio de precipitação interna de um determinado evento de chuva. A persistência extrema se refere aos pontos que diferem da média fora da região interquartil, apresentando acentuada inclinação no gráfico, indicando áreas muito secas ou muito úmidas.

As variáveis de vegetação atuam em diferentes escalas sobre a partição da precipitação em aberto. Konishi et al. (2006) discute que padrões que determinam a variabilidade da precipitação interna em pequenas escalas podem ser cancelados quando consideradas escalas espaciais maiores. Nessa perspectiva, há necessidade de avaliar a influência de métricas do dossel sobre a precipitação interna, em diferentes escalas espaciais (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005).

Dessa forma, a compreensão e entendimento da relação entre os componentes estruturais da vegetação e a precipitação interna têm papel chave na gestão de recursos hídricos (LEVIA; FROST, 2006), pois estas variáveis bióticas são passíveis de manejo (GÊNOVA; HONDA; DURIGAN, 2007; MOLINA; DEL CAMPO, 2012), possibilitando, portanto, a adoção de práticas que direcionem as condições de vegetação a situações desejadas para a regulação desse processo hidrológico e outros associados a ele. Nesse sentido, este capítulo teve como objetivo avaliar a influência da estrutura da vegetação sobre a variabilidade das estimativas de precipitação interna em florestas secundárias. Portanto, as seguintes questões foram definidas:

- 1) Como ocorre a variação temporal da precipitação interna entre os eventos de chuva?
- 2) A estrutura da vegetação tem efeito sobre as estimativas de precipitação interna?
- 3) A estrutura da vegetação tem efeito sobre a variabilidade temporal da precipitação interna?
- 4) A estrutura da vegetação tem efeito sobre a variabilidade espacial da precipitação interna?

## 4.2 Material e métodos

### 4.2.1 Área de estudo

A área de estudo (Figura 14) é constituída por uma floresta secundária dominada por *Pinus elliottii* var. Engelm., localizada na região sudeste do Estado de São Paulo (21°59'3,9"S e 47°52'37,5"O), entre 820 e 843 m de elevação. A área possui aproximadamente 9,5 ha de extensão, apresentando declividade média de 12,4%, variando de 5,8 (Parcela 1) a 13,2% (Parcela 2), com vertentes direcionadas, principalmente, para o Sul.

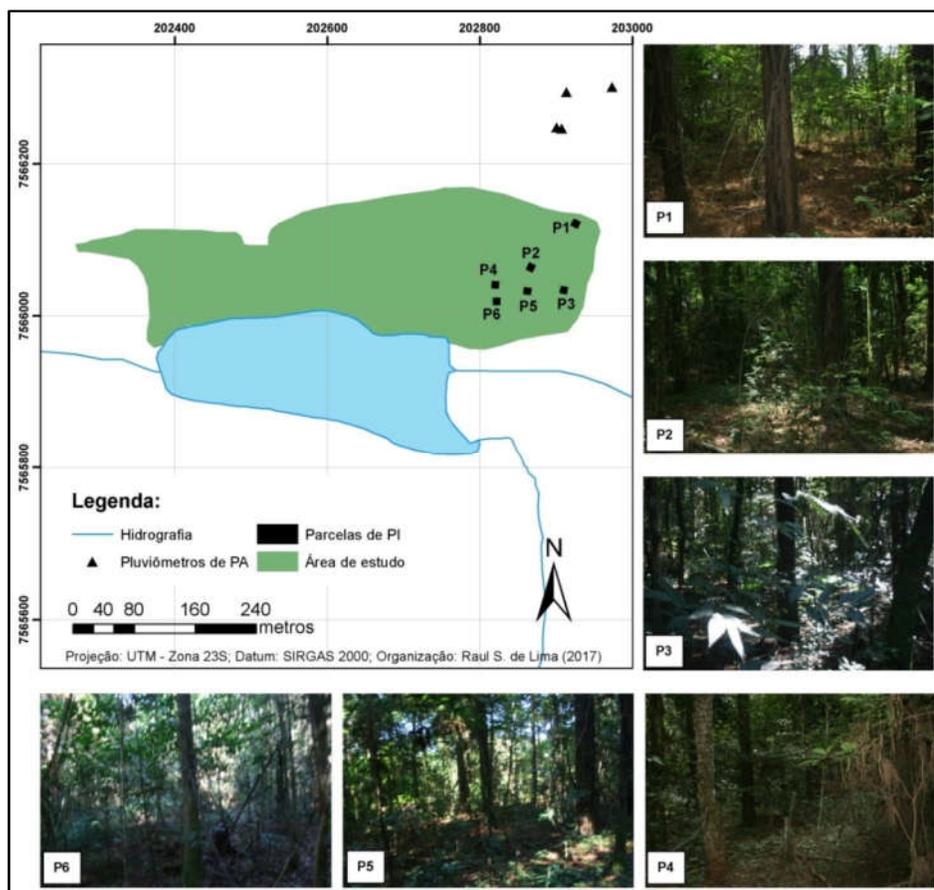


Figura 14: Localização das parcelas de amostragem da precipitação e de levantamento da estrutura da vegetação na área de estudo.

A área de floresta foi plantada durante a década de 1970, com o objetivo de proteger as margens no entorno da represa do *campus*. Nas décadas seguintes, a área foi submetida à retirada de parte da vegetação para a expansão de infraestruturas da universidade, com compensações sendo realizadas em outras localidades da instituição (MELÃO et al., 2011).

O clima da região se caracteriza pelos verões chuvosos e invernos secos, podendo ser classificado como tropical de altitude (Cwa, segundo a classificação de Köppen). A temperatura média do município é 21,2°C, com valores mensais variando entre 18 e 23°C. A precipitação da região é de aproximadamente 1500 mm/ano (CEPAGRI, 2016; SANCHES, 2015), variando mensalmente de 15,5 mm a 268,7 mm (CEPAGRI, 2016).

#### **4.2.2 Amostragem**

Os dados de precipitação em aberto e precipitação interna foram registrados durante a estação chuvosa, no período entre 13/10/2015 e 26/02/2016, no qual foram amostrados 24 eventos de chuva. Seguindo Lorenzon, Dias e Leite (2013) e Ziegler et al. (2009), cada evento constitui de um ou mais dias de chuva acumulada. Esses dados foram registrados em seis parcelas com dimensões de 10 m x 10 m alocadas no interior da área de floresta secundária (Figura 14), com distâncias de 15 a 130 m entre elas.

A precipitação em aberto foi quantificada por quatro pluviômetros de polietileno tereftalato, instalados a uma distância de até 238 m das parcelas de medição de precipitação interna. (Figura 14). Já a precipitação interna foi quantificada por 180 pluviômetros (i.e. 30 pluviômetros em cada parcela), que foram dispostos em arranjos fixos. Para a avaliação da variabilidade temporal dos dados pontuais (i.e. pluviômetro como unidade amostral) de precipitação interna (Questões 1 e 3), foram utilizados os registros de 30 pluviômetros por parcela, distribuídos conforme a Figura 15. Por outro lado, os dados de precipitação interna na escala da parcela (i.e. parcela como unidade amostral) foram obtidos pela média aritmética de 21 pluviômetros (Figura 16), selecionando apenas um equipamento das extremidades e centro da parcela, para reduzir os efeitos da dependência espacial dos dados de cobertura do dossel.

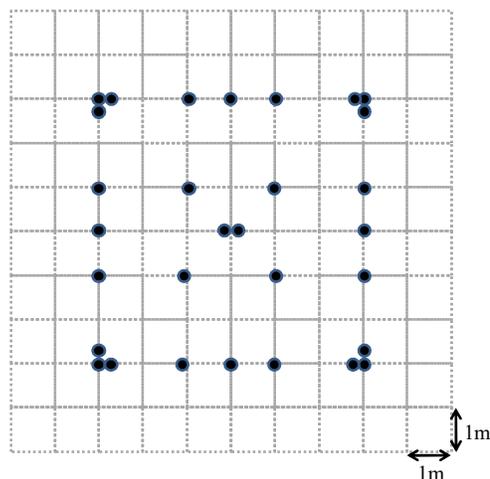


Figura 15: Distribuição espacial dos pluviômetros utilizados para a estimativa da estabilidade temporal da precipitação interna.

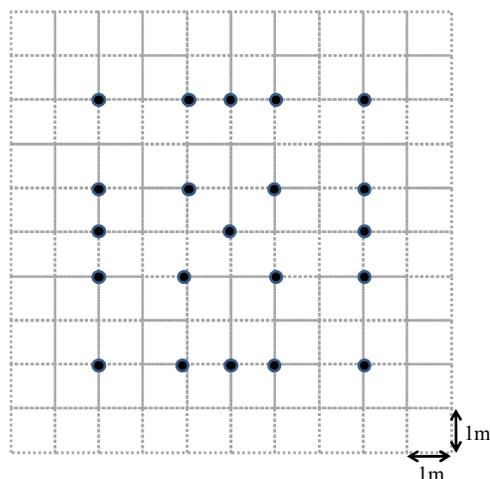


Figura 16: Distribuição espacial dos pluviômetros para a obtenção da estimativa média da precipitação interna para as análises na escala da parcela.

Para avaliar o efeito da estrutura da vegetação sobre as estimativas pontuais de precipitação interna (Questões 2 e 3), foram medidas as distância para o tronco mais próximo e a cobertura do dossel. Os dados de distância para o tronco mais próximo, também avaliados nos trabalhos de Keim, Skaugset e Weiler (2005) e Kowalska et al. (2016), foram coletados no dia 10/08/2016, por meio de trenas e fitas métricas. Apenas os troncos maiores que 1,30 m foram considerados para a obtenção desse parâmetro. A estimativa de cobertura do dossel foi obtida a partir de fotografias do dossel acima dos pluviômetros (CARLYLE-MOSES; LISHMAN, 2015; GÊNOVA; HONDA; DURIGAN, 2007; KONISHI et al., 2006; KOWALSKA et al., 2016; STAELENS et al., 2006; TONELLO et al., 2014), com a coleta das imagens sendo realizada no período entre 12/08/2016 e 04/09/2016, de acordo com duas

metodologias: fotografias do dossel registradas diretamente; e fotografias do dossel registradas através do equipamento Solar Pathfinder (Solar Pathfinder, Linden, Tennessee), seguindo as indicações de Harris et al. (2005).

As fotografias registradas diretamente do dossel foram obtidas por uma câmera digital (Sony CyberShot DSCW350, Sony Corporation) a 1,75 m do nível do solo. Em procedimento similar ao realizado por Tonello et al. (2014), foi selecionado um recorte da fotografia para o cálculo da fração de cobertura do dossel (exemplo na Figura 17). Dessa forma, foi realizada a reclassificação das imagens originais (Figura 17a) para preto e branco (Figura 17b). Em seguida, foram realizados recortes circulares da área central das fotografias (Figura 17c). Por fim, foi realizada a contagem de pixels pretos (cobertura vegetal) e brancos (espaços abertos) do recorte do dossel (Figura 17d), sendo a fração de cobertura do dossel estimada pela razão de pixels pretos pelo número total de pixels.

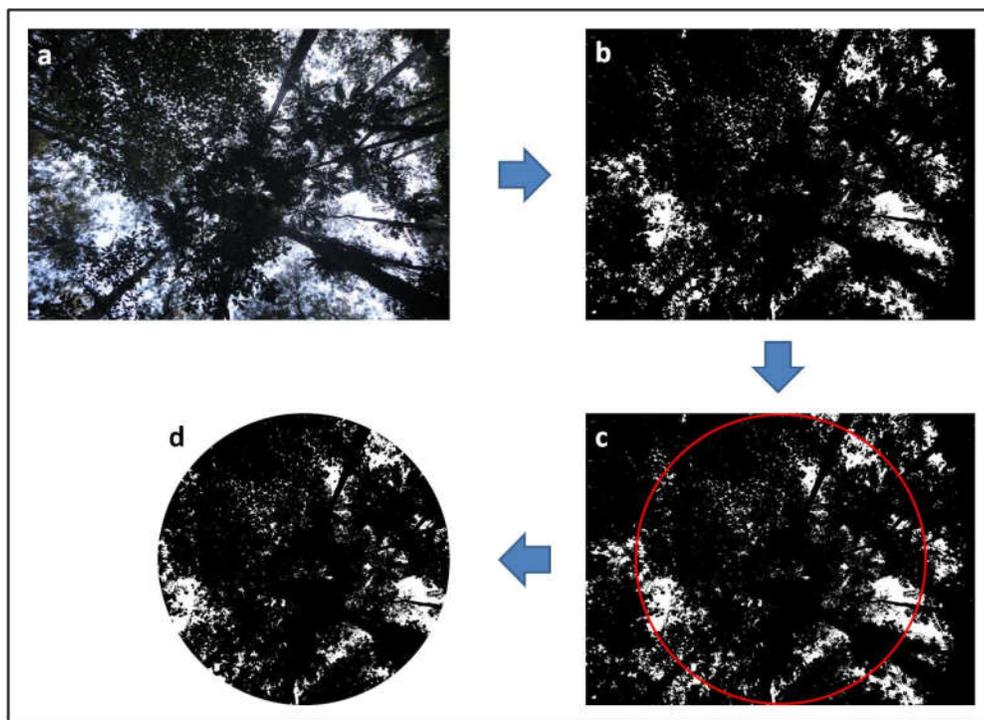


Figura 17: Exemplo do procedimento de processamento das fotografias para a estimativa da fração de cobertura do dossel.

As fotografias registradas através do Solar Pathfinder também foram obtidas por uma câmera digital para a fração do dossel dos pluviômetros utilizados para o registro da precipitação interna. Este equipamento é utilizado para a medição do grau de sombreamento de uma localidade em função de objetos que obstruem a passagem de luz solar no decorrer de

determinados intervalos de tempo (HARRIS et al., 2005; TETI; PIKE, 2005). Em procedimento similar ao realizado para as fotografias registradas diretamente, foram realizados ajustes das imagens originais (Figura 18a) de forma a estarem inseridas no diagrama de deslocamento solar (Figura 18b) do aparelho. Em seguida, foi realizada a reclassificação das imagens para preto e branco (Figura 18c). Por fim, foi realizado o recorte da imagem com base no diagrama solar (Figura 18d) e a posterior contagem de pixels para a estimativa da cobertura do dossel.

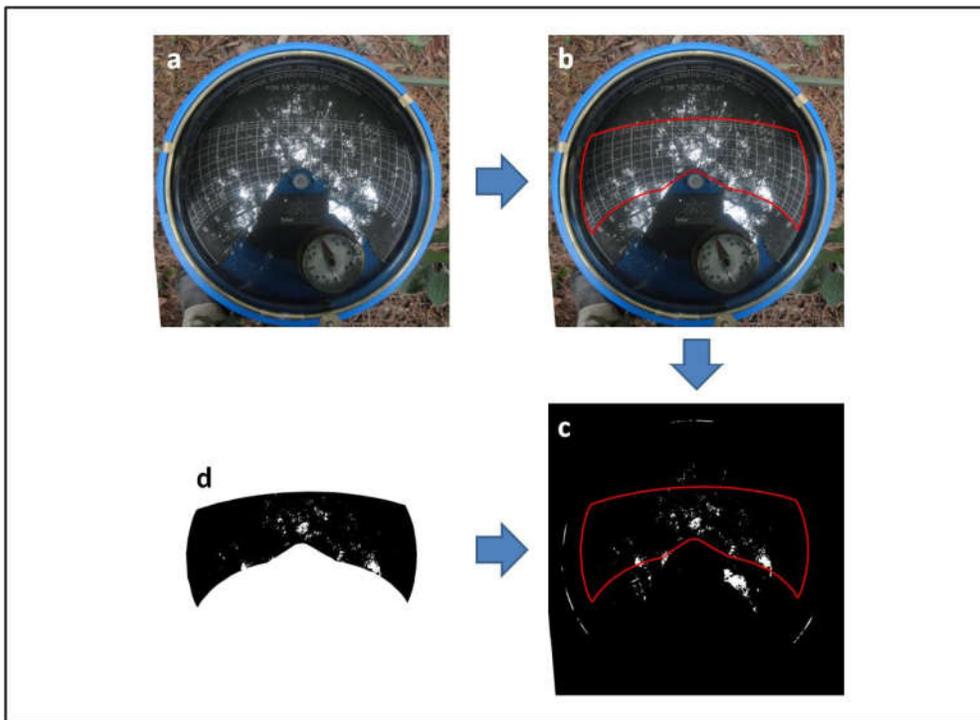


Figura 18: Exemplo do procedimento de processamento das fotografias do dossel registradas pelo Solar Pathfinder para a estimativa da fração de cobertura do dossel.

Para avaliar a influência da vegetação sobre as estimativas de precipitação interna na escala das parcelas (Questões 2, 3 e 4), foram coletados, entre os dias 11 e 15 de julho de 2016, dados para a estimativa das seguintes variáveis de estrutura da vegetação: densidade de lianas ( $\text{ramos.ha}^{-1}$ ); cobertura do dossel (%); diâmetro à altura do peito (DAP; cm); área basal ( $\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$ ); densidade de indivíduos ( $\text{indivíduos.ha}^{-1}$ ); altura (m); profundidade de copa (m); e estratificação vertical (%).

A densidade de lianas foi estimada a partir da contagem de ramos localizados a 1,3 m do solo (mesma altura dos pluviômetros em relação ao solo). A densidade de indivíduos arbóreos foi estimada pela contagem de indivíduos com altura mínima de 1,3 m. Os dados de

cobertura do dossel para as parcelas foram obtidos pela média aritmética dos dados pontuais registrados através do Solar Pathfinder, conforme procedimento exemplificado na Figura 18. Para a estimativa do DAP e da área basal, foram utilizadas fitas métricas e paquímetros para a medição de circunferências e diâmetros, respectivamente, dos componentes da vegetação. A altura máxima dos indivíduos e a altura mínima do dossel, utilizada para calcular a profundidade da copa, foram medidas com régua telescópica e hipsômetro digital (LaserAce Hypsometer, MDL). A estratificação vertical foi estimada pelo coeficiente de variação das alturas máximas dos indivíduos arbóreos.

Os dados de estrutura da vegetação na escala da parcela foram sumarizados, com exceção à densidade de lianas e à cobertura do dossel, em conjuntos referentes: a todos os indivíduos da parcela; aos indivíduos com altura abaixo de 20 m; e aos indivíduos com altura acima de 20 m.

#### 4.2.3 Análise de dados

Para avaliar a variabilidade temporal da precipitação interna (Questão 1), foram gerados gráficos de estabilidade temporal. Devido às distribuições dos dados de precipitação interna normalmente diferirem de distribuições normais na maioria dos eventos, a mediana foi utilizada como base para o cálculo do valor normalizado da precipitação interna (CARLYLE-MOSES; LISHMAN, 2015; KOWALSKA et al., 2016; ZIMMERMANN; ZIMMERMANN; ELSENBEER, 2009), calculado com base na equação 8:

$$PI_{Norm,i,e} = \frac{PI_{i,e} - \overline{PI_{e,p}}}{MAD_{e,p}} \quad (8)$$

Onde:  $PI_{Norm,i,e}$  é o valor normalizado da precipitação interna do pluviômetro  $i$  no evento  $e$  de chuva;  $PI_{i,e}$  é o valor registrado de precipitação interna no pluviômetro  $i$  no evento  $e$ ;  $\overline{PI_{e,p}}$  é a mediana da precipitação interna do evento  $e$  na parcela  $p$ ; e  $MAD_{e,p}$  é o desvio absoluto mediano da precipitação interna do evento  $e$  na parcela  $p$ , calculado a partir da equação 9:

$$MAD_{e,p} = \text{mediana}\{|PI_{i,e} - \overline{PI_{e,p}}|\} \quad (9)$$

O cálculo do valor normalizado da precipitação interna também foi realizado para a escala das parcelas, usando o valor médio de precipitação interna registrado pelos 21 pluviômetros (Figura 3). Os gráficos de estabilidade temporal contêm os valores normalizados de precipitação interna para cada evento de chuva, representados por pontos, e o valor médio

do valor normalizado de cada pluviômetro, representado por uma linha. Os pluviômetros foram ordenados de acordo com o valor médio da precipitação interna normalizada (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005).

Para avaliar se a mediana dos valores normalizados dos pluviômetros diferia de zero, foi usado o teste não-paramétrico de Wilcoxon, que compara a mediana de um conjunto de dados a um valor definido. Desta forma, foi analisado se as medianas dos pluviômetros ou das parcelas diferiam de zero, indicando a propensão dos pontos a serem mais secos ou úmidos do que o padrão médio. O nível de significância utilizado nesta análise foi  $P < 0,05$ .

Para avaliar a influência da estrutura da vegetação sobre as estimativas pontuais de precipitação interna (Questões 2 e 3), foi usada regressão linear múltipla passo-a-passo para seleção das variáveis explicativas significativas (QUINN; KEOUGH, 2002). As estimativas de precipitação interna [i.e. volume acumulado por pluviômetro e intervalo interquartil da precipitação interna normalizada (métrica utilizada para descrever a variação temporal do processo)] foram definidos com variáveis resposta; as métricas de estrutura da vegetação (i.e. distância para o tronco mais próximo, cobertura do dossel estimada diretamente e estimada pelo Solar Pathfinder) foram definidas como variáveis explicativas. Destaca-se que, para estas análises, foram utilizados dados registrados nas Parcelas 3 e 5 apenas, nas quais foram obtidas as medidas de estrutura da vegetação para essa escala.

Para evitar o efeito da multicolinearidade de variáveis explicativas na análise de regressão múltipla, foi usada, anteriormente, análise de correlação para a identificação de variáveis explicativas correlacionadas. Para isto, foi avaliado o coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ). Tanto a análise de correlação quanto a regressão múltipla pressupõem normalidade das distribuições dos dados analisados (GOTELLI; ELLISON, 2011; QUINN; KEOUGH, 2002). Com base no teste de Shapiro-Wilk, os dados de volume de precipitação interna ( $PI_{mm}$ ) e do intervalo interquartil (IQR) foram transformados para escala logarítmica, antes das análises; foram utilizadas transformações angulares para ambas as variáveis de cobertura do dossel.

Para avaliar a influência da estrutura da vegetação na escala da parcela sobre as estimativas de precipitação interna (Questões 2, 3 e 4), os dados de estrutura da vegetação foram sumarizados através de Análise de Componentes Principais (ACP), para reduzir o número (GOTELLI; ELLISON, 2011; QUINN; KEOUGH, 2002) e a dimensionalidade das

variáveis originais (SOUZA et al., 2013), sendo realizada para cada um dos conjuntos de dados. As variáveis foram transformadas, quando necessário, e normalizadas para média zero e variância unitária. Previamente, os dados referentes à densidade de indivíduos maiores que 20 m ( $h_{>20}$ ) e profundidade de copa de indivíduos menores que 20m ( $PC_{<20}$ ) foram transformados usando função de potência ( $x^2$ ) e logarítmica [ $\ln(x)$ ], respectivamente.

Após a ACP, foi realizada a regressão linear múltipla passo-a-passo. Os valores médios (Questão 2), o intervalo interquartil dos dados normalizados (Questão 3) e os coeficientes de variação da precipitação interna por parcela (Questão 4) foram definidos como variáveis resposta; os eixos da ACP foram definidos como variáveis explicativas (SOUZA et al., 2013); também foi definido o nível de significância de  $P < 0,05$  para esta análise.

### 4.3 Resultados

Durante os 24 eventos de chuva amostrados, foi registrado o volume de precipitação em aberto de 492,1 mm, com eventos variando de 0,7 a 107,7 mm. Em relação à precipitação interna, registrou-se um volume médio correspondente a 87% (430 mm) do volume de precipitação em aberto. Foi verificado um registro mínimo na Parcela 1, com 379,9 (77,2%); o registro máximo foi verificado na Parcela 5, com 465,7 mm (94,6%).

Em relação à variabilidade espacial da precipitação interna, descrito pelo coeficiente de variação entre os pluviômetros presentes em uma parcela, foi observado valor médio de 16,6%, variando entre 13,2 (Parcela 2) e 20,1% (Parcela 3). Também foi verificado que eventos leves de chuva apresentaram maior variabilidade espacial do que eventos fortes, variando de 167,2%, em um evento de 0,7 mm, a 12,8%, em um evento de 107,7 mm.

O cálculo do valor normalizado de precipitação interna pontual foi realizado com base nos 24 eventos de chuva amostrados durante o estudo, com exceção da Parcela 4, na qual foram utilizados dados de 23 eventos, pois a mediana do evento do dia 12/11/2015 foi 0 mm, impossibilitando os cálculos. A partir do teste de Wilcoxon, foi verificado que, dos 30 pontos de amostragem da Parcela 1, 28 possuem mediana diferente de zero ( $P < 0,05$ ). Nas Parcelas 2, 3, 4, 5 e 6, as medianas de 18, 19, 12, 16 e 13 pontos, respectivamente, diferiram significativamente de zero.

Com base no gráfico de estabilidade temporal e no teste de Wilcoxon, é possível verificar que a Parcela 1 (Figura 19) apresenta elevada quantidade de pontos persistentemente

secos ou úmidos. Com base na distribuição dos dados, foram verificados 16 pontos de persistência extrema e 12 pontos de persistência geral.

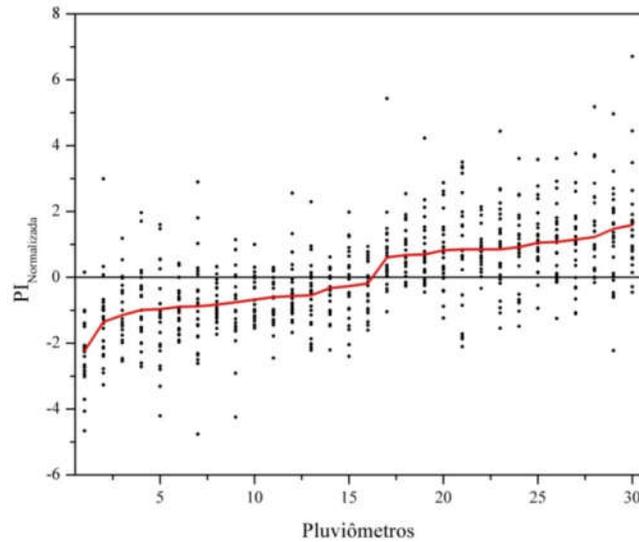


Figura 19: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 1; os pontos representam os valores normalizados de precipitação interna para cada evento de chuva; e a linha vermelha representa os valores médios da precipitação interna normalizada de cada pluviômetro, ordenados do menor para o maior.

Na Parcela 2, foram verificados 8 pontos com persistência negativa e 10 pontos com persistência positiva. A partir do gráfico de estabilidade temporal (Figura 20) e no teste de medianas, pode-se observar a existência de 3 pontos de persistência geral e 15 de persistência extrema nesta parcela.

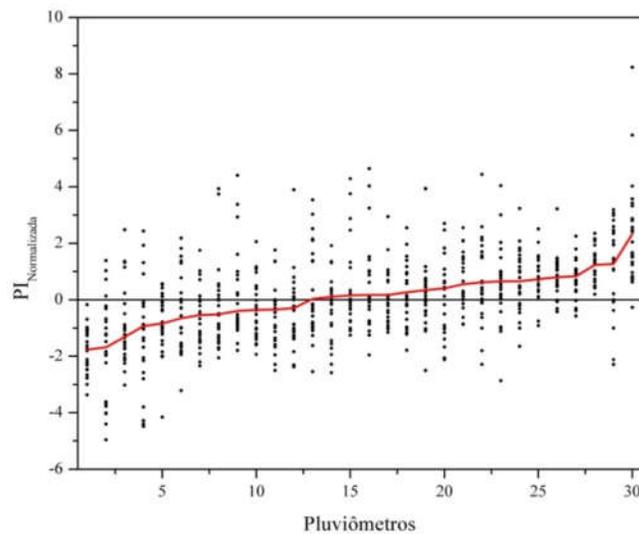


Figura 20: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 2; os pontos representam os valores normalizados de precipitação interna para cada evento de chuva; e a linha vermelha representa os valores médios da precipitação interna normalizada de cada pluviômetro, ordenados do menor para o maior.

Na Parcela 3, pode-se observar a ocorrência de 7 pontos de persistência extrema positiva, nos quais a precipitação interna é concentrada entre os eventos de chuva, caracterizando a formação de pontos de gotejamento (Figura 21). Além disso, também podem ser verificados 4 pontos de persistência geral, tanto positivos quanto negativos.

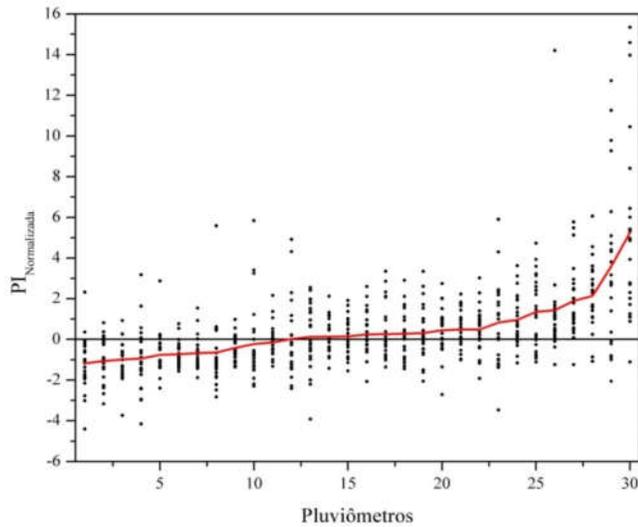


Figura 21: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 3; os pontos representam os valores normalizados de precipitação interna para cada evento de chuva; e a linha vermelha representa os valores médios da precipitação interna normalizada de cada pluviômetro, ordenados do menor para o maior.

Na Parcela 4 (Figura 22), não foram identificados pontos de persistência geral a partir dos gráficos de estabilidade temporal, havendo apenas a presença de pontos de persistência extrema (12). Desta forma, 18 pontos não são persistentes nesta parcela.

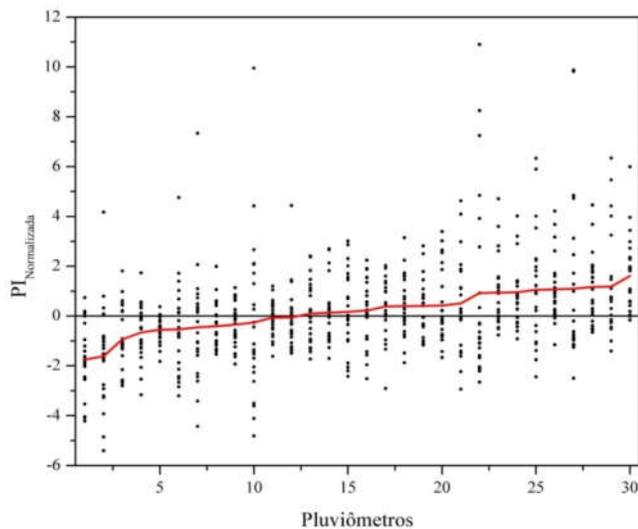


Figura 22: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 4; os pontos representam os valores normalizados de precipitação interna para cada evento de chuva; e a linha vermelha representa os valores médios da precipitação interna normalizada de cada pluviômetro, ordenados do menor para o maior.

Na Parcela 5 (Figura 23), foi identificado apenas um ponto de persistência geral, sendo este acima da mediana. Em relação à persistência extrema, foram verificados 7 pontos de extremamente secos e 8 pontos extremamente úmidos.

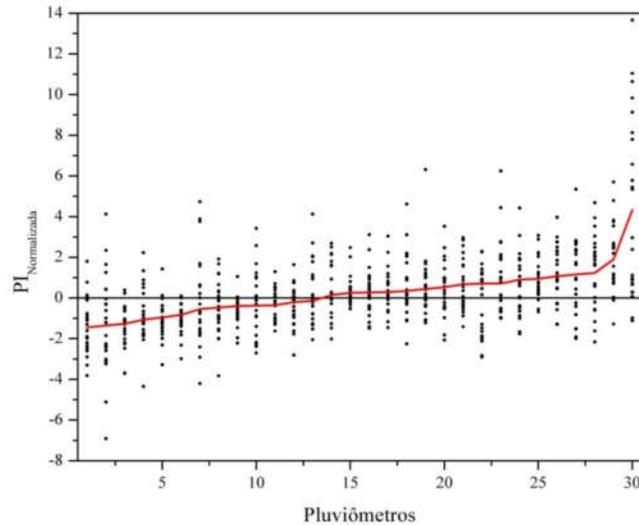


Figura 23: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 5; os pontos representam os valores normalizados de precipitação interna para cada evento de chuva; e a linha vermelha representa os valores médios da precipitação interna normalizada de cada pluviômetro, ordenados do menor para o maior.

Por fim, na Parcela 6, foram verificados 12 pontos extremamente persistentes; 6 acima e 6 abaixo da mediana (Figura 24). Apesar disso, de maneira geral, ocorreu nesta parcela a segunda maior quantidade de pontos não persistentes do estudo (i.e. 17 pontos). Foi verificado apenas um ponto de persistência geral, sendo este acima da mediana.

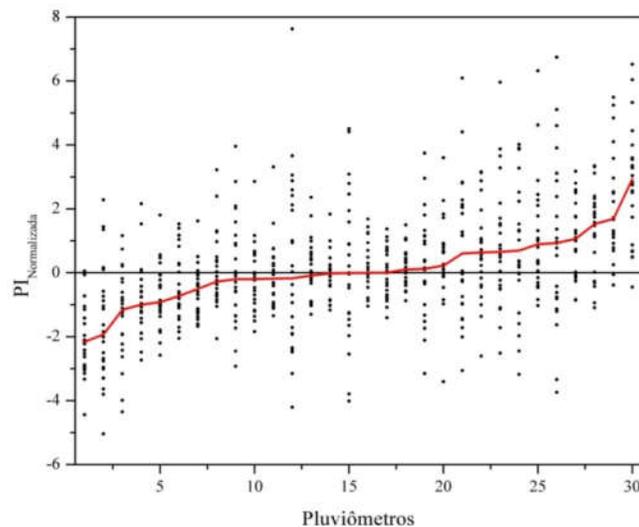


Figura 24: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna na Parcela 6; os pontos representam os valores normalizados de precipitação interna para cada evento de chuva; e a linha vermelha representa os valores médios da precipitação interna normalizada de cada pluviômetro, ordenados do menor para o maior.

Considerando o valor normalizado da precipitação interna das parcelas, foi verificado que as Parcelas 1 e 5 apresentam medianas significativamente diferentes de zero. Com base no gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna nas parcelas (Figura 25), também foi verificado que essas parcelas apresentam valores muito distantes da mediana, indicando que elas apresentam persistência extrema dos padrões espaciais de PI.

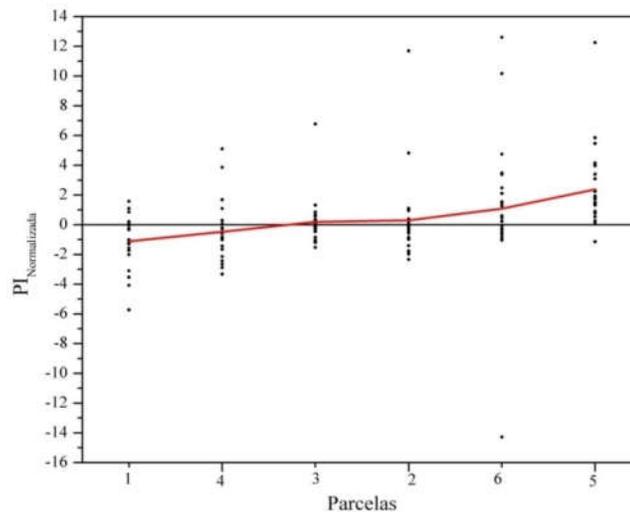


Figura 25: Gráfico de estabilidade temporal da precipitação interna nas Parcelas; os pontos representam os valores normalizados de precipitação interna para cada evento de chuva; e a linha vermelha representa os valores médios da precipitação interna normalizada de cada parcela, ordenados do menor para o maior.

A partir do levantamento de dados da estrutura da vegetação da área de estudo (Tabela 10), foi verificado que a floresta possui: densidade média de 4.733,33 indivíduos por hectare; área basal média de 45,76 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>; DAP médio de 5,98 cm; altura média de 5,98 m; profundidade média da copa de 2,77 m; estratificação vertical média de 117,36%; 8.866,67 ramos de liana por hectare; e cobertura média de dossel de 97,26%.

Tabela 10: Resumo das variáveis de estrutura da vegetação das parcelas de amostragem da precipitação interna.

Dados gerais	Sigla	Parcelas					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
Densidade de lianas (ramos.ha <sup>-1</sup> )	DL	8.100	8.700	11.100	5.800	8.600	10.900
Cobertura média do dossel (%)	C <sub>SOLAR</sub>	97,74	96,88	97,55	96,85	96,61	97,92
Densidade de troncos (indivíduos.ha <sup>-1</sup> )	DT	4.000	3.200	5.400	4.400	5.300	6.100
Área basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	AB	47,88	62,98	49,05	51,29	31,67	31,69
DAP médio (cm)	DAP	7,01	8,77	5,18	6,29	4,38	4,27
Altura média (m)	h	6,44	8,22	5,77	6,33	4,49	4,65
Profundidade média de Copa (m)	PC	2,56	4,19	2,79	2,90	2,37	1,85
Estratificação vertical (%)	E	113,94	107,19	137,25	125,23	112,37	108,21
<b>Indivíduos Vivos com h &lt; 20 m</b>							
Densidade de troncos (indivíduos.ha <sup>-1</sup> )	DT <sub>&lt;20</sub>	3.500	2.700	4.900	3.800	5.100	5.900
Área basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	AB <sub>&lt;20</sub>	6,11	6,06	8,81	3,26	7,39	10,79
DAP médio (cm)	DAP <sub>&lt;20</sub>	3,36	3,55	2,45	2,30	3,02	3,18
Altura média (m)	h <sub>&lt;20</sub>	3,84	4,87	3,48	3,40	3,63	3,89
Profundidade média de Copa (m)	PC <sub>&lt;20</sub>	1,95	2,91	1,76	1,99	1,98	1,68
Estratificação vertical (%)	E <sub>&lt;20</sub>	60,25	81,89	89,97	85,02	67,81	73,20
<b>Indivíduos Vivos com h &gt; 20 m</b>							
Densidade de troncos (indivíduos.ha <sup>-1</sup> )	DT <sub>&gt;20</sub>	500	500	500	600	200	200
Área basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	AB <sub>&gt;20</sub>	41,77	56,92	42,76	48,03	24,29	21,18
DAP médio (cm)	DAP <sub>&gt;20</sub>	32,52	36,96	31,96	31,55	39,01	36,45
Altura média (m)	h <sub>&gt;20</sub>	24,65	26,30	28,20	24,87	26,43	26,92
Profundidade média de Copa (m)	PC <sub>&gt;20</sub>	6,83	11,13	12,30	8,68	12,37	6,90
Estratificação vertical (%)	E <sub>&gt;20</sub>	9,74	14,09	16,07	4,37	16,32	16,50

Com base nos resultados da ACP dos dados completos de estrutura da vegetação (Tabela 11), verifica-se que os três primeiros eixos obtidos explicam grande parte da variação dos dados de vegetação (92,63%). O primeiro eixo (E1<sub>T</sub>) explica a maior parte da variação da estrutura da vegetação (62,69%), representando um gradiente de áreas com baixa densidade de lianas e de indivíduos e pouca cobertura do dossel, porém com áreas basais, DAP, alturas e profundidades de copa elevadas, para áreas com alta cobertura do dossel e densidade de lianas e de indivíduos, mas com áreas basais, DAP, alturas e profundidades de copa reduzidas. O segundo eixo (E2<sub>T</sub>) explica 16,50% da variação dos dados e representa um gradiente de áreas com baixa densidade de lianas, pouca cobertura do dossel, baixa área basal e pouca estratificação vertical, para áreas com alta densidade de lianas, alta cobertura do dossel, grande área basal e elevada estratificação vertical. Por fim, o terceiro eixo (E3<sub>T</sub>) explica 13,44% da variação dos dados, representando um gradiente de estratificação vertical.

Tabela 11: Resultados da ACP avaliando os dados completos de estrutura da vegetação na área de estudo.

Variáveis de estrutura	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
DL	0,525	0,675	-0,18
C <sub>SOLAR</sub>	0,430	0,756	-0,27
AB	-0,928	0,312	0,189
DT	0,969	0,056	0,121
DAP	-0,967	0,153	-0,179
PC	-0,937	0,092	0,061
h	-0,964	0,252	-0,054
E	0,106	0,314	0,939
Autovalores	5,015	1,320	1,075
Porcentagem da variação explicada	62,69	16,50	13,44
Porcentagem cumulativa	62,69	79,19	92,63

Considerando apenas os dados de estrutura de árvores menores que 20 m, a ACP resumiu as variáveis em dois eixos principais, que explicam 81,9% da variação dos dados originais (Tabela 12). O primeiro eixo (E1<sub><20</sub>) explica 51,01% da variação dos dados relativos a indivíduos menores que 20 m de altura, representando um gradiente de áreas com DAP e alturas médias elevadas, alta estratificação vertical, porém com baixas áreas basais e densidades de indivíduos, para áreas com DAP e alturas menores, menor estratificação vertical, e maiores densidades de indivíduos e áreas basais. O segundo eixo (E2<sub><20</sub>) explica 30,89% da variação dos dados e representa um gradiente de áreas com baixa área basal e densidade de indivíduos e DAP e altura média reduzidas, porém com alta estratificação vertical, para áreas com grande área basal e densidade de indivíduos e DAP e altura média elevadas, com baixa estratificação.

Tabela 12: Resultados da ACP avaliando os dados de estrutura da vegetação na área de estudo, estimados a partir de indivíduos menores que 20 m de altura.

Variáveis de estrutura	Eixo 1	Eixo 2
AB <sub>&lt;20</sub>	0,453	0,735
DT <sub>&lt;20</sub>	0,864	0,408
DAP <sub>&lt;20</sub>	-0,667	0,743
h <sub>&lt;20</sub>	-0,867	0,319
E <sub>&lt;20</sub>	0,111	-0,681
PC <sub>&lt;20</sub>	-0,949	-0,171
Autovalores	3,061	1,853
Porcentagem da variação explicada	51,02	30,88
Porcentagem cumulativa	51,02	81,90

Da mesma forma, a ACP resumiu os dados de estrutura da vegetação estimados com base em indivíduos maiores que 20 m em dois eixos, explicando 83% da variação (Tabela 13).

O primeiro eixo (E1<sub>>20</sub>) explica 57,49% da variação da estrutura da vegetação, considerando apenas indivíduos maiores que 20 m de altura, representando um gradiente de áreas árvores com menores DAP, altura média, profundidade da copa e estratificação vertical, porém com alta densidade de indivíduos e elevada área basal, para áreas com DAP, altura, profundidade de copa e estratificação maiores, mas com menores densidade de indivíduos e área basal. O segundo eixo (E2<sub>>20</sub>) explica 25,52% da variação dos dados, representando um gradiente de áreas com baixa densidade de indivíduos, baixa área basal e com indivíduos mais baixos e com menor profundidade de copa, para áreas com elevada densidade de indivíduos, grande área basal e com indivíduos mais altos e com copa mais profunda.

Tabela 13: Resultados da ACP avaliando os dados de estrutura da vegetação na área de estudo, estimados a partir de indivíduos maiores que 20 m de altura.

<b>Variáveis de estrutura</b>	<b>Eixo 1</b>	<b>Eixo 2</b>
DT <sub>&gt;20</sub>	-0,916	0,399
AB <sub>&gt;20</sub>	-0,707	0,580
DAP <sub>&gt;20</sub>	0,782	-0,150
h <sub>&gt;20</sub>	0,691	0,554
PC <sub>&gt;20</sub>	0,393	0,815
E <sub>&gt;20</sub>	0,931	0,204
Autovalores	3,449	1,531
Porcentagem da variação explicada	57,49	25,52
Porcentagem cumulativa	57,49	83,01

De acordo com o gráfico da ACP (Figura 26), pode-se observar que, de forma geral, a vegetação da Parcela 1 possui altura, DAP e profundidade de copa relativamente grandes, porém em baixa densidade. As árvores do estrato inferior (i.e. menores que 20 m), presentes em baixa densidade, possuem altura e DAP intermediários, além de baixa estratificação vertical (Figura 27). Em relação às árvores de grande porte (Figura 28), esta parcela apresenta grande quantidade de árvores maiores que 20 m, com área basal elevada. No entanto, os indivíduos grandes dessa área apresentam menores estaturas, DAP, estratificação vertical e profundidade de copa.

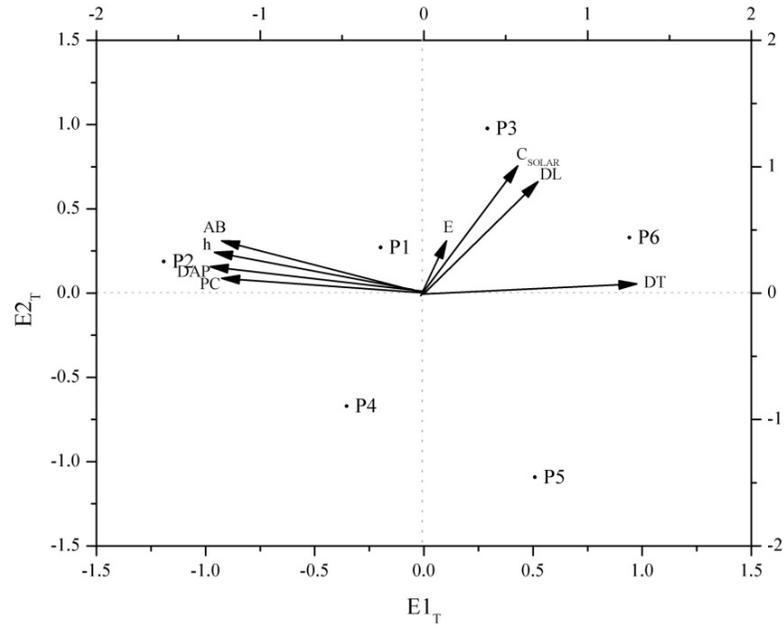


Figura 26: Ordenação das parcelas de amostragem de precipitação interna em relação aos dois primeiros eixos ( $E1_T$  e  $E2_T$ ) da ACP baseada nos dados completos de estrutura da vegetação.

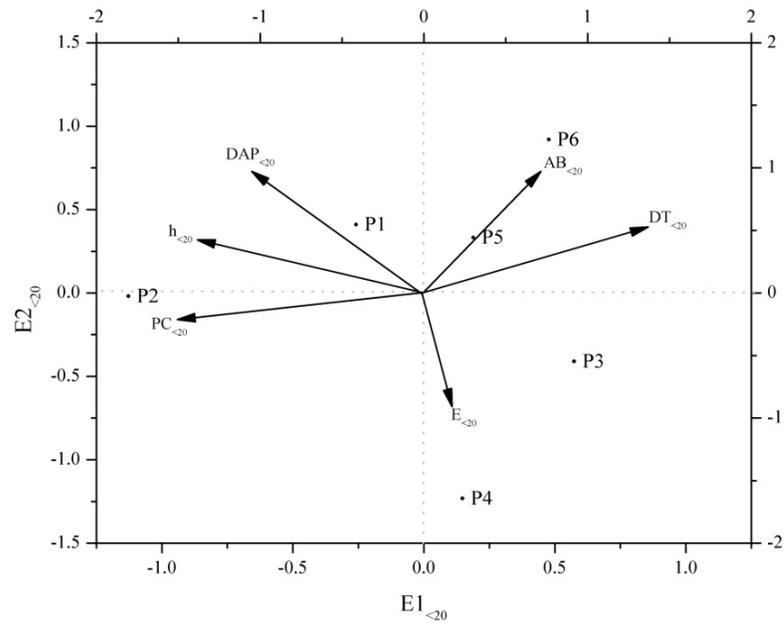


Figura 27: Ordenação das parcelas de amostragem de precipitação interna em relação aos dois primeiros eixos ( $E1_{<20}$  e  $E2_{<20}$ ) da ACP baseada nos dados de árvores menores que 20 m.

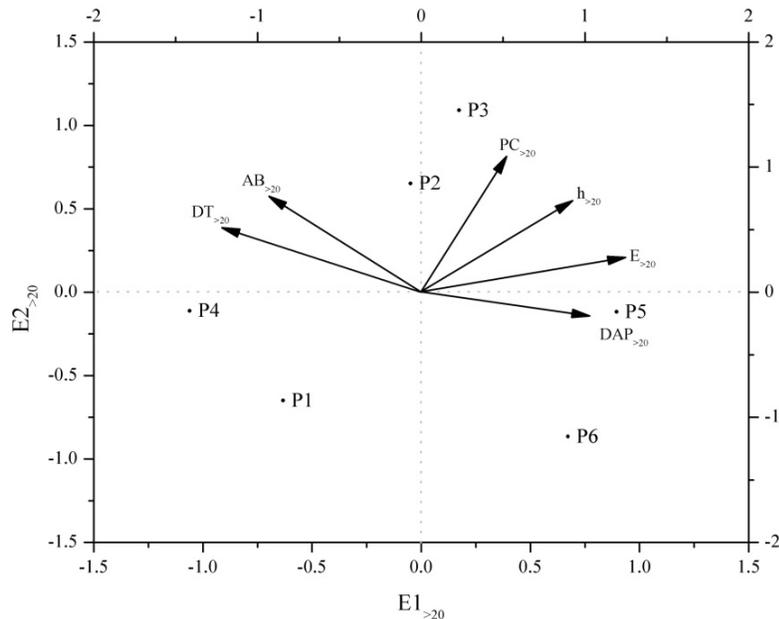


Figura 28: Ordenação das parcelas de amostragem de precipitação interna em relação aos dois primeiros eixos ( $E1_{>20}$  e  $E2_{>20}$ ) da ACP baseada nos dados de árvores maiores que 20 m.

A Parcela 2 apresenta os indivíduos com maiores valores de DAP, altura média e profundidade de copa, porém em baixa densidade. Os indivíduos menores que 20 m nessa parcela possuem grandes valores de DAP, altura e profundidade de copa. No entanto, esses indivíduos ocorrem em menor quantidade, apresentando baixa densidade. Esta parcela possui grande densidade de indivíduos maiores que 20 m, com copas profundas e DAP reduzido.

Em relação à estrutura da vegetação considerando todos os indivíduos, a Parcela 3 se caracteriza pelo elevado grau de cobertura do dossel e alta densidade de lianas a 1,3 m do solo. Os indivíduos arbóreos dessa área possuem tamanho intermediário em comparação com outras parcelas. A área também possui grande quantidade de indivíduos menores que 20 m, com baixos valores de DAP, altura e profundidade de copa, mas elevada estratificação vertical. Além disso, a parcela possui a maior altura média entre as árvores com mais de 20 m, apresentando também copas com grande profundidade.

Em oposição à Parcela 3, a Parcela 4 apresenta baixos valores de cobertura do dossel e de densidade de lianas. As árvores de menor porte dessa parcela apresentam elevada estratificação vertical, além de DAP, altura e área basal reduzidos. Essa área apresenta alta densidade de árvores de grande porte, contribuindo para a elevada área basal. Por outro lado, as árvores desta área possuem baixos DAP, menores alturas médias, baixas profundidades de copa e baixa estratificação vertical.

A Parcela 5 possui elevada densidade de indivíduos que apresentam, de forma geral, menores valores de altura, DAP e profundidade de copa. Além disso, esta parcela apresenta baixos valores de cobertura do dossel e de densidade de lianas. Essa área possui elevada área basal referente aos indivíduos menores de 20 m. Porém, em comparação com as outras áreas, estes são menores, em termos de DAP e altura, e apresentam copas menos profundas. Essa parcela possui indivíduos maiores que 20 m com maior porte do que as outras parcelas, apresentando maior DAP e altura média. Porém, possui maior estratificação vertical nessa fração da floresta, indicando grande variabilidade nas alturas. Além disso, as árvores de grande porte são menos frequentes nessa área do que nas demais.

Por fim, a Parcela 6 também apresenta alta densidade de indivíduos com baixos valores de altura, DAP e profundidade de copa. No entanto, valores altos de cobertura do dossel e densidade de lianas, indicando maior biomassa vegetal nessa parcela. Nessa área, ocorre a maior quantidade de indivíduos no estrato inferior da floresta, apresentando elevada área basal referente a árvores de pequeno porte. As árvores desse estrato são menores do que nas demais parcelas, apresentando o menor valor de estratificação vertical nessa porção da floresta. Por outro lado, a parcela possui baixa densidade de árvores maiores que 20 m, com baixa área basal e menor profundidade de copa. No entanto, essas árvores possuem DAP elevado, apresentando também alta estratificação vertical.

Com base na análise de correlação dos dados de estrutura da vegetação para a análise dos dados pontuais de precipitação interna (i.e. distância para o tronco mais próximo e métricas de cobertura do dossel), foi verificado que nenhuma das relações entre variáveis foi significativa. Desta forma, as três variáveis foram utilizadas na regressão linear múltipla para avaliar a influência da vegetação sobre as variáveis pontuais de precipitação interna.

Com base na análise de regressão linear múltipla, verificou-se que apenas o valor transformado da cobertura do dossel obtida pelo Solar Pathfinder apresentou influência significativa sobre o volume acumulado de precipitação interna nos pluviômetros ( $R^2 = 0,144$ ;  $P = 0,01$ ), sendo a relação descrita pelo seguinte modelo linear:

$$\ln(\text{PI}_{\text{MM}}) = 8,930 - 2,059 * \arcsen \sqrt{\frac{\text{C}_{\text{SOLAR}}}{100}} \quad (10)$$

Não foram verificados efeitos significativos dos eixos de estrutura da vegetação sobre o volume de precipitação interna das parcelas, mesmo considerando os diferentes estratos da floresta.

No que se refere à influência sobre a variabilidade temporal dos dados pontuais de precipitação interna, foi verificada influência significativa apenas da distância para o tronco mais próximo sobre o intervalo interquartil dos dados normalizados por pluviômetro ( $P < 0,001$ ). No entanto, a inclusão o valor transformado de cobertura do dossel obtida pelo Solar Pathfinder no modelo aumentou a explicação da variação do intervalo interquartil ( $R^2 = 0,268$ ), mesmo essa métrica não apresentando influência significativa ( $P = 0,091$ ). A relação entre as variáveis é descrita pelo seguinte modelo:

$$\ln(\text{IQR}) = 6,058 - 0,653 * \text{distância} - 3,753 * \arcsen \sqrt{\frac{C_{\text{SOLAR}}}{100}} \quad (11)$$

Em relação aos dados de variabilidade temporal na escala da parcela, não foram verificados efeitos da estrutura da vegetação do conjunto de dados completos e dos indivíduos com alturas menores que 20 m. No entanto, verificou-se que o Eixo  $E2_{>20}$ , referente à ACP dos dados de árvores acima de 20 m, apresenta influência significativa sobre os dados de variabilidade temporal. Desta forma, foi verificado que altos valores de intervalo interquartil estão associados com áreas com baixa densidade de indivíduos, pouca área basal, menor altura média e menor profundidade de copa, quando considerando apenas indivíduos maiores que 20 m. O modelo que descreve a relação entre os dados apresenta melhor ajuste ( $R^2 = 0,777$ ) quando o Eixo  $E1_{>20}$  é incluído, apesar de este não ter efeito significativo ( $P = 0,098$ ) sobre a variável resposta, sendo representado pela equação 12:

$$\text{IQR} = 1,707 + 0,330 * E1_{>20} - 0,515 * E2_{>20} \quad (12)$$

Quanto à variabilidade espacial, apenas os eixos do conjunto de dados referente às árvores maiores que 20 m (i.e.  $E1_{>20}$  e  $E2_{>20}$ ) não apresentaram efeitos significativos sobre o coeficiente de variação da precipitação interna. O Eixo  $E1_T$  apresentou efeito significativo ( $P = 0,024$ ) sobre essa variável, sendo que a inclusão do Eixo  $E3_T$  ( $P = 0,083$ ) melhorou o ajuste do modelo (equação 13) de 0,568 para 0,820. Assim, valores altos de coeficiente de variação estão associados a áreas com alta densidade de lianas e de indivíduos arbóreos, maiores coberturas do dossel, menor área basal, menor altura média, menor DAP e baixa profundidade de copa. Considerando a estrutura de indivíduos menores que 20 m, foi verificado efeito

apenas do Eixo  $E1_{<20}$  ( $P = 0,005$ ), cujo modelo (equação 14) explica 85,3% da variação da variável resposta. Nesse sentido, áreas com alta densidade de indivíduos menores que 20 m, elevada área basal, baixo DAP, baixa altura e baixa profundidade de copa estão associadas com elevada variabilidade espacial.

$$CV_{PI} = 17,750 + 1,605 * E1_T + 0,968 * E3_T \quad (13)$$

$$CV_{PI} = 17,750 + 1,864 * E1_{<20} \quad (14)$$

#### 4.4 Discussão

O padrão de estabilidade temporal da precipitação interna foi, de forma geral, consistente entre as parcelas observadas. Com exceção da Parcela 1, que apresentou acentuada persistência temporal na distribuição da precipitação interna, na qual 93% dos pluviômetros apresentaram algum nível de persistência, as outras parcelas apresentaram entre 12 (40%) e 19 (63%) pontos persistentes. Desta forma, pode-se perceber que a distribuição da precipitação interna apresenta uma estrutura espacial muito estável, principalmente na Parcela 1, o que pode indicar que este processo não está variando aleatoriamente no tempo (HSUEH; ALLEN; KEIM, 2016; KEIM, SKAUGSET, WEILER, 2005; ZIMMERMANN; WILCKE; ELSENBEER, 2007), havendo o controle de outros fatores sobre esse processo.

Com exceção da Parcela 1, a proporção de pontos significativamente diferentes da mediana é similar às obtidas em outros estudos (31 – 68%). Keim, Skaugset e Weiler (2005) verificaram que a proporção de pontos que diferiram de zero variou de 31 a 46%, em cada parcela. No limite superior do intervalo, Zimmermann, Wilcke e Elsenbeer (2007) verificaram que 68% dos pontos de amostragem diferiram do padrão médio de precipitação interna. Considerando que alguns pontos de gotejamento são ativados em determinados volumes de precipitação em aberto (ZIMMERMANN; ZIMMERMANN; ELSENBEER, 2009), pode-se esperar que diferentes padrões de distribuição da precipitação em aberto, simultaneamente com os componentes da vegetação, estejam influenciando a amplitude dos registros de variabilidade temporal da precipitação interna.

Wullaert et al. (2009) sugerem que as características do dossel são os fatores de maior influência na definição de padrões espaciais mais estáveis da precipitação interna. Os autores discutem que isso se deve à menor variação temporal dos componentes da vegetação na escala analisada, em comparação a variáveis meteorológicas, fazendo com que a

distribuição espacial de determinadas características do dossel determine a distribuição espacial da precipitação interna.

Zimmermann, Zimmermann e Elsenbeer (2009), comparando dois intervalos temporais distintos, não verificaram diferenças na distribuição espacial da precipitação interna. Segundo os autores esse resultado sugere que alterações na vegetação não estariam afetando a distribuição desse processo. No entanto, alguns trabalhos observaram diferentes padrões espaciais da precipitação interna em diferentes períodos do ano (KEIM; SKAUGSET; WEILER, 2005; KOWALSKA et al., 2016; STAELENS et al., 2006). Por exemplo, Keim, Skaugset e Weiler (2005) verificaram, dentro de uma mesma área florestal em diferentes períodos, maior quantidade de pontos de persistência extrema da precipitação interna no período com presença de folhas do que no período não foliado.

Essas diferenças podem ser atribuídas à presença de espécies decíduas que, devido a alterações sazonais das condições climáticas, modifica a distribuição de folhas no dossel em diferentes períodos, o que estaria impactando a partição da precipitação em aberto em interceptação pelas copas e precipitação interna. Além disso, essa diferença pode ser explicada pelas regiões e fisionomias onde foram desenvolvidos os trabalhos. Zimmermann, Zimmermann e Elsenbeer (2009) estudaram uma floresta tropical semidecídua, enquanto Keim, Skaugset e Weiler (2005) e outros trabalhos que verificaram efeito da sazonalidade foram desenvolvidos em florestas temperadas, nas quais há maior efeito decidual sobre a cobertura do dossel.

Dessa forma, pode-se esperar que em florestas tropicais, mesmo havendo ocorrência de espécies decíduas, o padrão de distribuição espacial da precipitação interna é mais estável ao longo do tempo, sendo possível, portanto, extrapolar o padrão obtido pelo gráfico de estabilidade temporal no período chuvoso em nossa área de estudo, para outros períodos do ano. Contudo, destaca-se a necessidade de estudos complementares, tendo em vista o padrão divergente ocasionado pela Parcela 1, de forma a compreender os fatores que estão controlando essas diferenças.

Tendo em vista que a estrutura da vegetação pode exercer controle sobre as estimativas relacionadas à precipitação interna, foram usados modelos de regressão múltipla para avaliar a influência dessas variáveis. Nesse sentido, a variabilidade temporal da

precipitação interna na escala dos pluviômetros, descrita com base no intervalo interquartil, foi influenciada significativamente pela distância para o tronco mais próximo (Equação 11).

Esta métrica pode indicar a posição relativa dos coletores sobre a copa das árvores. Carlyle-Moses e Lishman (2015), considerando zonas do dossel, observaram padrão semelhante, no qual foi verificado que zonas mais distantes do tronco apresentavam maior estabilidade e, portanto, menor variabilidade temporal da precipitação interna. Segundo os autores, isso se deve à maior taxa de interceptação nas zonas centrais do dossel, reduzindo a contribuição da precipitação interna livre em eventos leves de chuva. Conforme a capacidade de saturação do dossel é alcançada, a presença de pontos de gotejamento torna-se mais constante (i.e. menos variável temporalmente). Além disso, estes autores verificaram que áreas mais distantes do dossel apresentam menos pontos de gotejamento do que zonas mais centrais. Portanto, a formação desses pontos tem influência reduzida sobre a variabilidade temporal em zonas mais afastadas do tronco.

Dessa forma, nossos resultados, associados aos de Carlyle-Moses e Lishman (2015), sugerem que pontos mais distantes dos troncos representam zonas periféricas do dossel, que apresentam menor variabilidade temporal. Por outro lado, pontos mais próximos do tronco representam zonas centrais, onde ocorre elevada variabilidade temporal.

No entanto, algumas combinações de cobertura e distância representam interações mais complexas da vegetação sobre a variabilidade da precipitação interna, não sendo explicadas pelas zonas da copa, discutidas por esses autores. Nesse sentido, Kowalska et al. (2016) alertam que a distância para o tronco nem sempre é uma medida efetiva para descrever a posição do coletor sob a copa, principalmente quando há sobreposição de copas de diferentes indivíduos, o que aumenta a complexidade da estrutura do dossel e altera a partição da precipitação em aberto.

Todavia, a melhoria do modelo promovida pela inclusão da cobertura do dossel no modelo de regressão pode estar relacionada ao ajuste da relação distância-posição sob a copa. Dessa maneira, a cobertura do dossel possibilitaria a descrição da influência da distância para o tronco sobre a variabilidade temporal dos dados pontuais, levando em consideração a posição relativa de determinado ponto sob a projeção da copa. Logo, é necessário compreender com maior detalhamento como ocorre a interação entre o distanciamento em

relação às árvores e a porcentagem de cobertura do dossel e sua influência sobre a variabilidade temporal da precipitação interna.

Destaca-se, ainda, que a importância relativa de métricas do dossel é reduzida com o aumento do volume de precipitação em aberto (HSUEH; ALLEN; KEIM, 2016; PARK; CAMERON, 2008; STAELENS et al., 2006; ZIMMERMANN; ZIMMERMANN; ELSENBEER, 2009). Assim, a melhoria do ajuste do modelo pela inclusão de valores de cobertura do dossel pode também estar associada à grande quantidade de eventos de chuva menores do que 10 mm na área de estudo, caracterizados como chuvas leves, pois a cobertura de dossel teria maior importância relativa como variável explicativa da variabilidade da precipitação interna, enfatizando a importância dos fatores meteorológicos para esse processo.

Portanto, os resultados obtidos indicam que o distanciamento das regiões centrais da copa, caracterizando a redução da biomassa no dossel, afeta a magnitude da variação temporal da precipitação interna, representada pelo intervalo interquartil dos dados normalizados por pluviômetro. Dessa maneira, áreas mais próximas do tronco e com maior quantidade de folhas geram condições que promovem a ativação de pontos de gotejamento ou de proteção em função de volumes específicos de precipitação em aberto, devido às diferenças na capacidade de armazenamento do dossel em áreas com maior ou menor quantidade de folhas. Assim, estas áreas tendem a apresentar maior dispersão nos dados normalizados do que áreas relativamente mais distantes do tronco.

Na escala da parcela, verificou-se que valores altos de intervalo interquartil (i.e. maior variabilidade temporal) estão associados com áreas com baixa densidade de indivíduos, pouca área basal, menor altura média e menor profundidade de copa, considerando apenas indivíduos maiores que 20 m (i.e. influência significativa do Eixo E2<sub>>20</sub>; Equação 12). Esse resultado sugere que a ocorrência de árvores muito altas e em grande densidade no estrato superior da floresta promove a redução da variabilidade temporal dos dados de precipitação interna.

Nesse sentido, outros trabalhos verificaram que a presença de árvores emergentes (i.e. que ultrapassam o dossel) altera a distribuição da precipitação interna. Por exemplo, Poppenborg e Hölscher (2009) verificaram que essas árvores criam zonas de menor quantidade relativa de precipitação interna, pelo efeito da sombra de chuva. Segundo os autores, o aumento de superfícies vegetais promovido pelas árvores emergentes geraria um

aumento da capacidade de armazenamento do dossel, devido ao incremento de biomassa nesse compartimento da florestal, determinando, desta forma, um padrão espacial mais estável da precipitação interna.

Além disso, o Eixo  $E_{1>20}$  melhorou o ajuste do modelo que descreve a influência da estrutura da vegetação com indivíduos maiores do que 20 m sobre o intervalo interquartil da precipitação interna normalizada (Equação 12). Isso pode ser associado à inclusão de métricas relacionadas à biomassa da copa (i.e. estratificação vertical e profundidade de copa), que influenciam a capacidade de armazenamento do dossel e, conseqüentemente, a formação em diferentes momentos de pontos de gotejamento (KOWALSKA et al., 2016; ZIMMERMANN; ZIMMERMANN; ELSENBEEER, 2009). Nesse sentido, a maior complexidade da estrutura do dossel em estratos superiores, associada à maior biomassa vegetal, aumentaria a dispersão dos dados normalizados de precipitação interna de um determinado ponto, tornando-os temporalmente menos estáveis.

Tendo em vista que a precipitação interna, estrutura da comunidade biológica (ROSIER et al., 2015) e a distribuição de umidade (KLOS et al., 2014) e de nutrientes (ZIMMERMANN; ZIMMERMANN; ELSENBEEER, 2009) no solo são relacionadas, espera-se que o funcionamento da camada superficial do solo nas áreas amostradas seja influenciado pelos padrões observados da distribuição temporal e espacial da precipitação interna, com destaque para a variabilidade nas taxas que o padrão acentuadamente persistente da Parcela 1 deve promover.

Na escala pontual dos dados de precipitação interna, foi verificada influência significativa da cobertura do dossel sobre o volume registrado (Equação 10). Alguns estudos também verificaram relação significativa entre o volume de precipitação em aberto e o grau de cobertura do dossel (CARLYLE-MOSES; LISHMAN, 2015; HSUEH; ALLEN; KEIM, 2016; PARK; CAMERON, 2008). O aumento do volume de precipitação interna em função da redução da cobertura do dossel pode ser explicado pelas menores perdas por interceptação pela copa, devido à redução de superfícies vegetais nesse compartimento (PARK; CAMERON, 2008).

De forma geral, a influência da cobertura do dossel sobre o volume de precipitação interna está associada com a disponibilidade de superfícies, definida por valores altos de cobertura do dossel, capazes de interceptar e armazenar a água da chuva, aumentando as

perdas por interceptação do dossel e reduzindo, como consequência, o volume de água que alcança o piso florestal.

Contudo, porções específicas do dossel parecem apresentar influência mais significativa do que outras áreas. Outros estudos não constataram a relação entre essas variáveis (DIETZ et al., 2006; STYGER; KIRKPATRICK; UNWIN, 2016). Esses resultados podem ser atribuídos à amostragem de porções do dossel com influência reduzida sobre o volume de precipitação interna que alcança determinado ponto no piso florestal (KOWALSKA et al., 2016; ZIEGLER et al., 2009).

Em contrapartida, alguns dos trabalhos que verificaram relação significativa entre estas variáveis extraíram informações de porções específicas do dossel com base em ângulos zenitais (i.e. angulação em relação a uma reta perpendicular ao solo). Por exemplo, Zimmermann, Zimmermann e Elsenber (2009), antes de realizarem outras análises, avaliaram as correlações das coberturas estimadas por diferentes ângulos e as estimativas de precipitação interna. Esse procedimento pode auxiliar a seleção de ângulos zenitais a serem aplicados em análises posteriores, além de permitir a avaliação de outros fatores de variação que estão determinando essas angulações. Portanto, é necessário compreender como esses mecanismos e fatores que estão relacionados a esse efeito, evidenciando a necessidade de avaliações complementares.

Por outro lado, avaliando a influência na escala da parcela, as análises de regressão múltipla indicaram que, mesmo considerando diferentes estratos da vegetação, nenhum dos eixos de estrutura apresentou influência significativa sobre a precipitação interna. Esse resultado é corroborado por Styger, Kirkpatrick e Unwin (2016), que não verificaram relação de métricas de estrutura com vegetação na escala de parcela e o volume de precipitação interna.

A ausência de relação entre as variáveis de estrutura de vegetação e o volume de precipitação interna nesta escala pode ser explicada pela forte relação que esta última variável possui com o volume de precipitação em aberto. Diversos trabalhos verificaram que a precipitação em aberto é a principal fonte de variação da precipitação interna em ecossistemas florestais, restando uma pequena parcela de variação não explicada por essa variável meteorológica. Além disso, Molina e Del Campo (2012) discutem que alterações hidrológicas relacionadas à estrutura da vegetação em florestas muito densas são mais evidentes do que em

florestas menos densas. Dessa forma, ausência do padrão pode estar relacionada com a baixa densidade de indivíduos presentes em nossas parcelas, quando comparada a outras áreas.

Os resultados obtidos pelo modelo de regressão indicam que a elevada heterogeneidade espacial da precipitação interna está associada a áreas com alta densidade de lianas e de indivíduos arbóreos, maior cobertura do dossel, menor área basal, menor altura média, menor DAP e baixa profundidade de copa (Equação 13), sugerindo que áreas com indivíduos mais jovens apresentam precipitação interna com maior variabilidade espacial do que áreas com indivíduos de idades mais avançadas.

Tendo em vista que este eixo descreve um gradiente de idade de florestas, este resultado está de acordo com o obtido por Togashi, Montezuma e Leite (2012), que verificaram maior coeficiente de variação em uma floresta ombrófila em estágio inicial de sucessão (15%) do que na mesma formação florestal em estágio avançado (9%). Nesse sentido, Chappell, Bidin e Tych (2001) também verificaram que formações florestais não perturbadas, que possuem vegetação de idade mais avançada, possuíam maior homogeneidade espacial da precipitação interna (CV = 15%) do que áreas submetidas a diferentes níveis de exploração madeireira (24 – 27%), que alteravam a estrutura do dossel e promoviam o surgimento de indivíduos jovens.

Além disso, a relação da variabilidade espacial com áreas em estágio sucessional inicial é reforçada pela influência significativa do Eixo E1<sub><20</sub> (Equação 14), indicando que áreas com alta densidade de indivíduos menores que 20 m, elevada área basal, baixo DAP, baixa altura e baixa profundidade de copa estão associadas com elevada variabilidade espacial da precipitação interna.

Considerando a relação positiva da densidade de lianas e cobertura do dossel com o Eixo E1<sub>T</sub>, infere-se que ele também represente um gradiente de cobertura do dossel. Sabendo que variações na estrutura (CARLYLE-MOSES; LISHMAN; MCKEE, 2014) e a formação de pontos de gotejamento (LEVIA; FROST, 2006) são uns dos principais processos que determinam a heterogeneidade espacial da precipitação interna, a variabilidade espacial desse processo está associado à presença de folhas e de outros componentes da vegetação no dossel, que promovem a ocorrência de maior quantidade de pontos atípicos de precipitação interna.

Em locais com elevado grau de cobertura no dossel, pode ocorrer a distribuição diferenciada da precipitação em aberto, com estruturas da vegetação que divergem a água

para outros pontos e, conseqüentemente, reduzem o volume registrado, ou que levem à convergência da precipitação, promovendo a acumulação de água em determinado ponto, caracterizando a formação de pontos de gotejamento. A presença desses pontos aumenta a dispersão na distribuição dos dados e as estimativas de variabilidade espacial da precipitação interna (KOWALSKA et al., 2016; STAELENS et al., 2006).

Além disso, o modelo que descreve a influência da estrutura da vegetação sobre a variabilidade espacial da precipitação interna (Equação 13) tem o ajuste melhorado pela inclusão do Eixo  $E3_T$ , que está associado à variação da estratificação vertical da vegetação, indicando haver uma tendência de a variabilidade espacial da precipitação interna ser influenciada por esta variável. O valor de estratificação vertical representa o grau de complexidade relacionada às alturas dos indivíduos arbóreos de uma área. Nesse sentido, Zimmermann, Wilcke e Elsenbeer (2007) também atribuem altos valores de variabilidade espacial da precipitação interna à complexidade do dossel, que afeta a forma na qual a precipitação em aberto é repartida no interior da vegetação.

Desta maneira, os resultados obtidos sugerem que áreas em estágio inicial de sucessão ou com elevada presença de biomassa no dossel apresentam maior variabilidade espacial do que áreas em estágio mais avançado e com baixa presença de folhas no dossel. De forma geral, a variabilidade espacial da precipitação interna reflete o grau de complexidade da estrutura da vegetação. Portanto, a simplificação de ecossistemas florestais tende a reduzir as diferenças no volume de água que alcança o solo, afetando os processos biogeoquímicos que ocorrem nessas áreas.

#### **4.5 Conclusão**

De acordo com as questões definidas anteriormente, este estudo mostrou que: (1) a distribuição espacial da precipitação interna é temporalmente persistente e consistente entre as parcelas, com exceção da Parcela 1, que apresentou persistência mais acentuada; (2) as estimativas pontuais de precipitação interna são influenciadas pela cobertura do dossel, enquanto as estimativas na escala da parcela não foram influenciadas significativamente por nenhuma dos gradientes de estrutura da vegetação; (3) a variabilidade temporal da precipitação interna é influenciada pela distância para o tronco mais próximo, na escala pontual, e está associada negativamente à densidade de lianas e de indivíduos arbóreos, área basal e altura média, na escala da parcela; e (4) a variabilidade espacial da precipitação interna está associada aos gradientes estruturais que descrevem a variação na densidade de

lianas e de indivíduos arbóreos, na cobertura do dossel, na área basal, na altura, no DAP e na profundidade de copa e também, considerando todos os indivíduos e apenas aqueles menores que 20 m.

Tendo em vista que as características da vegetação são mais simples de serem manejadas, os resultados obtidos neste estudo podem ser aplicados para o direcionamento de ações que busquem recuperar o funcionamento de ecossistemas florestais, relacionados à ciclagem da água, e no gerenciamento de recursos hídricos em escalas mais amplas (i.e. bacia hidrográfica). De forma geral, os resultados obtidos indicam que diferentes estruturas da vegetação influenciam em diferentes escalas uma mesma característica da precipitação interna, sendo possível compreender o impacto de distúrbios na estrutura da vegetação sobre as estimativas desse processo, e auxiliando a avaliação de impactos ambientais e hidrológicos promovidos por intervenções antrópicas, por exemplo.

Contudo, sugere-se que, para compreender melhor o efeito da vegetação nessa escala, é necessário o uso de mais réplicas para avaliar a influência efetiva das variáveis bióticas, de forma a obter modelos mais robustos, e realizar pesquisas em outras fisionomias, de forma a aprimorar a avaliação da influência de fatores bióticos sobre a precipitação interna. Além disso, sugere-se que estudos posteriores incluam a interação dos fatores meteorológicos e da vegetação sobre os processos hidrológicos, pois outros estudos indicam que a influência relativa de estruturas da vegetação é afetada pela variação dos fatores meteorológicos.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos hidrológicos em ecossistemas florestais têm papel chave na gestão de bacias hidrográficas e controle de processos erosivos, contribuindo para a manutenção da biodiversidade de ecossistemas terrestres e aquáticos e para a ciclagem de nutrientes nessas áreas. Portanto, o conhecimento das características e dinâmicas dos processos hidrológicos é essencial para a definição de ações que garantam água em quantidade e qualidade adequadas para o abastecimento de atividades humanas. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo analisar as fontes de variabilidade da precipitação interna (PI) em uma floresta secundária.

Os resultados obtidos indicaram que a precipitação em aberto (PA) é a principal fonte de variabilidade da PI, sendo responsável por 94% da variação dessa variável na área estudada. Essa influência foi tão significativa que pode se atribuir a ela a ausência de influência da vegetação sobre o volume de precipitação interna ( $PI_{mm}$ ) na escala das parcelas. Contudo, a PA aparenta afetar o coeficiente de variação da precipitação interna ( $CV_{PI}$ ) apenas em eventos de chuva leve. Após determinado volume, o  $CV_{PI}$  passa a ser determinado por outros fatores. Desta forma, considerando que eventos da região são formados por chuvas leves, espera-se que a precipitação interna apresente alta variabilidade espacial, devido saturação incompleta do dossel florestal nesses eventos de chuva. Esse resultado, portanto, realça o papel da PA como a principal fonte de variação da PI em nossa área de estudo.

Como já discutido anteriormente, poucos estudos descrevem a relação entre a PA e as estimativas de PI através de modelos não lineares, apesar de haver indícios que esse tipo de resposta ocorre em condições naturais. Nosso estudo verificou que a relação entre a PA e o  $PI_{mm}$  é explicada satisfatoriamente por modelos lineares. No entanto, as relações da precipitação em aberto com a fração de precipitação interna ( $PI_{\%}$ ) e o  $CV_{PI}$  são melhores descritas por modelos não lineares, tendo em vista que estes dados aparentam se estabilizar a partir de determinado volume de precipitação em aberto. Portanto, sugere-se que sejam realizados estudos que aprofundem o conhecimento e a aplicação destes modelos para a descrição da relação entre estas variáveis, buscando, por exemplo, analisar e estabelecer relações entre os parâmetros dos modelos e os fatores que se espera que afetem a variabilidade da PI.

Com base nos resultados do Capítulo 3, verificamos que diferentes estratégias de amostragem permitiram a obtenção de estimativas com determinadas magnitudes de erro e que ele tende a diminuir em função do aumento do volume de PA. Esse resultado demonstra

que, se considerados os eventos de chuva isoladamente, são necessárias estratégias de amostragem que podem ser econômica e logisticamente inviáveis. Assim, o conhecimento prévio do padrão de chuvas da área de interesse do estudo é um fator chave para o planejamento adequado da pesquisa.

Tendo em vista que apenas uma pequena fração dos estudos na literatura discute as implicações da variabilidade associada às estratégias de amostragem, espera-se que nossos resultados realcem a importância da relação de métodos de amostragem e a qualidade das estimativas obtidas, a fim de impulsionar o desenvolvimento de pesquisas que considerem esses aspectos em sua elaboração e aprofundem as discussões sobre essa temática. Além disso, destaca-se que ainda é necessário mensurar a influência da complexidade da vegetação sobre a precisão das estimativas obtidas, tendo em vista que alguns estudos sugerem que esta é um provável fator de influência na definição de estratégias de amostragem.

Os resultados relativos à influência da vegetação sugerem que alterações nas características estruturais das florestas, principalmente aquelas de origem antrópica, são capazes de alterar o funcionamento dos processos hidrológicos nessas áreas, afetando o funcionamento dos ciclos biogeoquímicos. Dessa forma, ações de manejo ou de recuperação de ambientes degradados devem considerar as características da vegetação que apresentam influência sobre a variação da PI, a fim de restabelecer o funcionamento equilibrado desses ecossistemas.

Vale ressaltar que apenas um número reduzido de trabalhos aplicou testes estatísticos capazes de testar a efetiva influência de variáveis ambientais e de estratégias de amostragem sobre a PI, sendo que a maioria avaliou a significância de relação entre variáveis. Nesse sentido, as análises realizadas neste estudo possibilitaram a avaliação da influência da vegetação e demonstram que algumas das relações verificadas anteriormente resultam em influência efetiva. Dessa forma, espera-se que os resultados obtidos em nosso estudo motivem a aplicação de testes estatísticos apropriados às hipóteses definidas em estudos futuros.

As evidências de que as florestas tropicais têm sido afetadas intensamente por distúrbios, principalmente de origem antrópica, estão sendo amplamente estudadas e difundidas. As florestas secundárias estão em processo de desenvolvimento, mas não apresentam o mesmo grau de complexidade e resiliência de florestas em estágios mais

avançados, possuindo, portanto, diferentes contribuições de cada processo hidrológico em comparação com áreas remanescentes.

Diante do cenário de degradação atual, o presente estudo fornece subsídios para a compreensão da resposta da PI em função de diferentes fatores que afetam a sua variabilidade, permitindo estabelecer relações e prever impactos resultantes de ações de manejo e de recuperação de áreas florestais. Nesse sentido, os resultados obtidos pelo presente estudo, de forma geral, caracterizam e podem subsidiar ações para o manejo hidrológico do *campus* da UFSCar, reduzindo o impacto das atividades humanas presentes na instituição sobre o funcionamento e qualidade ambiental. Dessa forma, é possível identificar efeitos indiretos sobre a quantidade e qualidade da água, garantindo o fornecimento de água para o desenvolvimento de atividades e para o funcionamento equilibrado de ecossistemas naturais.

## 6 REFERÊNCIAS

AHMADI, M. T.; ATTAROD, P.; BAYRAMZADEH, V. The role of rainfall size in canopy interception loss: an observational study in a typical beech forest. **Middle-East Journal of Scientific Research**, v. 13, n. 7, p. 876–882, 2013.

ALBUQUERQUE, F. N. B.; COSTA, J. S. Intercepção de chuva em diferentes fisionomias de caatinga (Coreaú, CE). **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 16, n. 3, p. 63–75, 2012.

ALLEN, S. T.; BROOKS, J. R.; KEIM, R. F.; BOND, B. J.; MCDONNELL, J. J. The role of pre-event canopy storage in throughfall and stemflow by using isotopic tracers. **Ecohydrology**, v. 7, n. 2, p. 858–868, 2014.

ALVES, R. F.; DIAS, H. C. T.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. C.; GARCIA, F. N. M. Avaliação da precipitação efetiva de um fragmento de Mata Atlântica em diferentes estágios de regeneração no município de Viçosa, MG. **Revista Ambiente e Água**, v. 2, n. 1, p. 83–93, 2007.

ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e intercepção das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha - São Paulo. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 257–262, 2003.

ÁVILA, L. F.; MELLO, C. R.; PINTO, L. C.; SILVA, A. M. Partição da precipitação pluvial em uma microbacia hidrográfica ocupada por Mata Atlântica na Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 3, p. 583–595, 2014.

BALBINOT, R.; OLIVEIRA, N. K.; VANZETTO, S. C.; PEDROSO, K.; VALERIO, A. F. O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131–149, 2008.

BRAUMAN, K.; FREYBERG, D. L.; DAILY, G. C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: a comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 265–275, 2010.

CARIBONI, J.; GATELLI, D.; LISKA, R.; SALTELLI, A. The role of sensitivity analysis in ecological modelling. **Ecological Modelling**, v. 203, p. 167–182, 2007.

CARLYLE-MOSES, D. E.; FLORES LAUREANO, J. S.; PRICE, A. G. Throughfall and throughfall spatial variability in Madrean oak forest communities of northeastern Mexico. **Journal of Hydrology**, v. 297, p. 124–135, 2004.

CARLYLE-MOSES, D. E.; LISHMAN, C. E. Temporal persistence of throughfall heterogeneity below and between the canopies of juvenile lodgepole pine (*Pinus contorta*). **Hydrological Processes**, v. 29, p. 4051–4067, 2015.

CARLYLE-MOSES, D. E.; LISHMAN, C. E.; MCKEE, A. J. A preliminary evaluation of throughfall sampling techniques in a mature coniferous forest. **Journal of Forestry Research**, v. 25, n. 2, p. 407–413, 2014.

CEPAGRI (Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura). **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em: 18 mai. 2016.

CHAPPELL, N. A.; BIDIN, K.; TYCH, W. Modelling rainfall and canopy controls on net-precipitation beneath selectively-logged tropical forest. **Plant Ecology**, v. 153, p. 215–229, 2001.

CHAZDON, R. L. **Second growth**: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation. University of Chicago Press, 2014.

CHUAN, G. K. Hydrological studies and water resource concerns in Southeast Asia. **Singapore Journal of Tropical Geography**, v. 24, n. 1, p. 86-110, 2003.

CROCKFORD, R. H.; RICHARDSON, D. P. Partitioning of rainfall into throughfall , stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological Processes**, v. 14, p. 2903–2920, 2000.

DIETZ, J.; HÖLSCHER, D.; LEUSCHNER, C.; HENDRAYANTO. Rainfall partitioning in relation to forest structure in differently managed montane forest stands in Central Sulawesi, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, v. 237, p. 170–178, 2006.

FAN, J.; OESTERGAARD, K. T.; GUYOT, A.; JENSEN, D. G.; LOCKINGTON, D. A. Spatial variability of throughfall and stemflow in an exotic pine plantation of subtropical coastal Australia. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 5, p. 793–804, 2015.

FERREIRA, S. J. F.; LUIZÃO, F. J.; DALLAROSA, R. L. G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 1, p. 55–62, 2005.

GASPAROTO, E. A. G.; TONELLO, K. C.; SHINZATO, E. T.; VALENTE, R. O. A. Throughfall in different forest stands of Iperó, São Paulo. **Cerne**, v. 20, n. 2, p. 303–310, 2014.

GÊNOVA, K. B.; HONDA, E. A.; DURIGAN, G. Processos hidrológicos em diferentes modelos de plantio de restauração de mata ciliar em região de cerrado. **Revista do Instituto Florestal**, v. 19, n. 2, p. 189–200, 2007.

GOTELLI, N. J.; ELLISON, A. M. **Princípios de estatística em ecologia**. Porto Alegre: Artmed, 2011, 528 p.

HARRIS, R. R.; KOCHER, S. D.; GERSTEIN, J. M.; OLSON, C. **Monitoring effectiveness of riparian vegetation restoration**. Berkeley: University of California, Center for Forestry, 2005. 33 p.

HOLANDA, F. S. R.; SANTOS, L. G. C.; SANTOS, C. M.; CASADO, A. P. B.; PEDROTTI, A.; RIBEIRO, G. T. Riparian vegetation affected by bank erosion in the Lower São Francisco River, Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 29, n. 2, p. 327–336, 2005.

- HOLWERDA, F.; SCATENA, F. N.; BRUIJNZEEL, L. A. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rain forest: a comparison of sampling strategies. **Journal of Hydrology**, v. 327, p. 592–602, 2006.
- HSUEH, Y.-H.; ALLEN, S. T.; KEIM, R. F. Fine-scale spatial variability of throughfall amount and isotopic composition under a hardwood forest canopy. **Hydrological Processes**, v. 30, p. 1796–1803, 2016.
- JOHNSON, J. B.; OMLAND, K. S. Model selection in ecology and evolution. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 19, n. 2, p. 101–108, 2004.
- KEIM, R. F.; SKAUGSET, A. E.; WEILER, M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. **Journal of Hydrology**, v. 314, n. 1–4, p. 263–274, 2005.
- KOWALSKA, A.; BOCZON, A.; HILDEBRAND, R.; POLKOWSKA, Z. Spatial variability of throughfall in a stand of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) with deciduous admixture as influenced by canopy cover and stem distance. **Journal of Hydrology**, v. 538, p. 231–242, 2016.
- KRAJEWSKI, W. F.; CIACH, G. J.; HABIB, E. An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, n. 2, p. 151–162, 2003.
- LEVIA, D. F.; FROST, E. E. Variability of throughfall volume and solute inputs in wooded ecosystems. **Progress in Physical Geography**, v. 30, p. 605–632, 2006.
- LIMA, W. P. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2ª ed. Piracicaba: ESALQ, USP, Departamento de Ciências Florestais, 2008.
- LIMIN, S. G.; OUE, H.; SATO, Y.; BUDIASA, I. W.; INDRA SWTIAWAN, B.. Partitioning rainfall into throughfall , stemflow , and interception loss in Clove (*Syzygium aromaticum*) plantation in upstream Saba River Basin, Bali. **Procedia Environmental Sciences**, v. 28, p. 280–285, 2015.
- LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; LEITE, H. G. Precipitação efetiva e interceptação da chuva em um fragmento florestal com diferentes estágios de regeneração. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 619–627, 2013.
- MAIR, A.; FARES, A. Throughfall characteristics in three non-native Hawaiian forest stands. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, p. 1453–1466, 2010.
- MANFROI, O. J.; KURAJI, K.; SUZUKI, M.; TANAKA, N.; KUME, T.; NAKAGAWA, M.; KUMAGAI, T.; NAKASHIZUKA, T. Comparison of conventionally observed interception evaporation in a 100-m<sup>2</sup> subplot with that estimated in a 4-ha area of the same Bornean lowland tropical forest. **Journal of Hydrology**, v. 329, p. 329–349, 2006.
- MELÃO, M. G. G.; MOSCHINI, L. E.; MILANO, C. B.; LOCATELLI, E. T. **Diagnóstico e caracterização ambiental da UFSCar, campus de São Carlos**: relatório apresentado ao Ministério Público Federal e CETESB. São Carlos, 2011.

MOLINA, A. J.; DEL CAMPO, A. 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, 2012.

MOURA, A. E. S. S.; CORREA, M. M.; SILVA, E. R.; FERREIRA, R. L. C.; FIGUEIREDO, A. C.; POSSAS, J. M. C. 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, 2009.

NAIMAN, R. J.; DÉCAMPS, H. The ecology of interfaces: riparian zones. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 28, n. 1, p. 621–658, 1997.

OLIVEIRA, L. L.; COSTA, R. F.; COSTA, A. C. L.; SOUSA, F. A. S.; BRAGA, A. P. Modelagem da interceptação na Floresta Nacional de Caxiuanã, no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 3, p. 318–326, 2008.

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

OZIEGBE, M. B.; MUOGHALU, J. I.; OKE, S. O. Litterfall , precipitation and nutrient fluxes in a secondary lowland rain forest in Ile-Ife , Nigeria. **Acta Botanica Brasilica**, v. 25, n. 3, p. 664–671, 2011.

PAESE, A. **Caracterização e análise ambiental do *campus* da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, SP.** 1997. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1997.

PALMER, M. A.; FILOSO, S.; FANELLI, R. M. From ecosystems to ecosystem services: stream restoration as ecological engineering. **Ecological Engineering**, v. 65, p. 62–70, 2014.

PARK, A.; CAMERON, J. L. 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, 2008.

PEREZ-MARIN, A. M.; MENEZES, R. S. C. Ciclagem de nutrientes via precipitação pluvial total, interna e escoamento pelo tronco em sistema agroflorestal com *Gliricidia sepium*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2573–2579, 2009.

PÉREZ-SUÁREZ, M.; ARREDONDO-MORENO, J. T.; HUBER-SANNWALD, E.; SERNA-PÉREZ, A. Forest structure, species traits and rain characteristics influences on horizontal and vertical rainfall partitioning in a semiarid pine-oak forest from Central Mexico. **Ecohydrology**, v. 7, p. 532–543, 2014.

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

PYPKER, T. G.; BOND, B. J.; LINK, T. E.; MARKS, D.; UNSWORTH, M. H. The importance of canopy structure in controlling the interception loss of rainfall: Examples from a young and an old-growth Douglas-fir forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 130, n. 1–2, p. 113–129, 2005.

QUINN, G. P.; KEOUGH, M. J. **Experimental design and data analysis for biologists**. Cambridge University Press, 2002.

RITTER, A.; REGALADO, C. M. Roving revisited, towards an optimum throughfall sampling design. **Hydrological Processes**, v. 28, p. 123–133, 2014.

RODRIGO, A.; ÀVILA, A. Influence of sampling size in the estimation of mean throughfall in two Mediterranean holm oak forests. **Journal of Hydrology**, v. 243, p. 216–227, 2001.

ROSIER, C. L.; VAN STAN, J. T.; MOORE, L. D.; SCHROM, J. O. S.; WU, T.; REICHARD, J. S.; KAN, J. Forest canopy structural controls over throughfall affect soil microbial community structure in an epiphyte-laden maritime oak stand. **Ecohydrology**, v. 8, n. 8, p. 1459–1470, 2015.

SANCHES, R. G. **As chuvas na região de São Carlos/SP: estudo do comportamento pluviométrico a partir de dados de estações climáticas, 1993-2014**. 184 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

SCATENA, F. N.; PLANOS-GUTIERREZ, E. O.; SCHELLEKENS, J. Natural disturbances and the hydrology of humid tropical forests. In: BONELL, M.; BRUIJNZEEL, L. A. (Eds.). **Forests, water and people in the humid tropics: past, present and future hydrological research for integrated land and water management**. New York: Cambridge University Press, 2005. p. 489-512.

SHACHNOVICH, Y.; BERLINER, P. R.; BAR, P. Rainfall interception and spatial distribution of throughfall in a pine forest planted in an arid. **Journal of Hydrology**, v. 349, p. 168–177, 2008.

SHINOHARA, Y.; ONOZAWA, Y.; CHIWA, M.; KUME, T.; KOMATSU, H.; OTSUKI, K. Spatial variations in throughfall in a Moso bamboo forest: sampling design for the estimates of stand-scale throughfall. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 253–259, 2010.

SIEGERT, C. M.; LEVIA, D. F.; HUDSON, S. A.; DOWTIN, A. L.; ZHANG, F.; MITCHELL, M. J. Small-scale topographic variability influences tree species distribution and canopy throughfall partitioning in a temperate deciduous forest. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 109–117, 2016.

SOUSA, M. M. M.; RIBEIRO FILHO, J. C.; SANTOS, J. C. N.; BRASIL, J. B.; BATISTA, F. J. A. Influência do manejo da vegetação em microbacias hidrográficas e suas respostas hidrosedimentológicas. **Revista Equador**, v. 5, n. 4, p. 43-55, 2016.

SOUZA, A. L. T.; FONSECA, D. G.; LIBÓRIO, R. A.; TANAKA, M. O. Influence of riparian vegetation and forest structure on the water quality of rural low-order streams in SE Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 298, p. 12–18, 2013.

SOUZA, V. V.; DIAS, H. C. T.; COSTA, A. A.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. C. Análise da qualidade das águas das precipitações em aberto e efetiva em um fragmento secundário da Mata Atlântica, no município de Viçosa, MG. **Revista Árvore**, v. 31, n. 4, p. 737–743, 2007.

STAELENS, J.; DE SCHRIJVER, A.; VERHEYEN, K.; VERHOEST, N. E. C. Spatial variability and temporal stability of throughfall water under a dominant beech (*Fagus sylvatica* L.) tree in relationship to canopy cover. **Journal of Hydrology**, v. 330, p. 651–662, 2006.

STAELENS, J.; DE SCHRIJVER, A.; VERHEYEN, K.; VERHOEST, N. E. C. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. **Hydrological Processes**, v. 22, p. 33–45, 2008.

STYGER, J.; KIRKPATRICK, J. B.; UNWIN, G. Throughfall and its spatial variability in a temperate rainforest of simple structure. **Physical Geography**, v. 37, n. 3–4, p. 251–263, 2016.

TABACCHI, E.; LAMBS, L.; GUILLOY, H.; PLANTY-TABACCHI, A-M.; MULLER, E.; DÉCAMP, H. Impacts of riparian vegetation on hydrological processes. **Hydrological Processes**, v. 14, n. 16–17, p. 2959–2976, 2000.

TEALE, N. G.; MAHAN, H.; BLEAKNEY, S.; BERGER, A.; SHIBLEY, N.; FRAUENFELD, O. W.; QUIRING, S. M.; RAPP, A. D.; ROARK, E. B.; WASHINGTON-ALLEN, R. Impacts of vegetation and precipitation on throughfall heterogeneity in a tropical pre-montane transitional cloud forest. **Biotropica**, v. 46, n. 6, p. 667–676, 2014.

TETI, P. A.; PIKE, R. G. Selecting and testing an instrument for surveying stream shade. **BC Journal of Ecosystems and Management**, v. 6, n. 2, p. 1–16, 2005.

THOMAZ, E. L. Avaliação de interceptação e precipitação interna em capoeira e floresta secundária em Guarapuava-PR. **Geografia**, v. 14, n. 1, p. 47–60, 2005.

TOGASHI, H. F.; MONTEZUMA, R. DE C. M.; LEITE, A. F. Precipitação incidente e fluxo de atravessamento das chuvas em três estágios sucessionais de floresta atlântica no maciço da Pedra Branca, Rio de Janeiro. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 907–918, 2012.

TONELLO, K. C.; GASPAROTO, E. A. G.; SHINZATO, E. T.; VALENTE, R. O. A.; DIAS, H. C. T. Precipitação efetiva em diferentes formações florestais na Floresta Nacional de Ipanema. **Revista Árvore**, v. 38, n. 2, p. 383–390, 2014.

VAN STAN, J. T.; GAY, T. E.; LEWIS, E. S. Use of multiple correspondence analysis (MCA) to identify interactive meteorological conditions affecting relative throughfall. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 452–460, 2016.

VOGEL, H. F.; ZAWADZKI, C. H.; METRI, R. Florestas ripárias: importância e principais ameaças. **SaBios: Revista de Saúde e Biologia**, v. 4, n. 1, p. 24–30, 2009.

WANG, S.; FU, B. J.; HE, C. S.; SUN, G.; GAO, G. Y. A comparative analysis of forest cover and catchment water yield relationships in northern China. **Forest Ecology and Management**, v. 262, n. 7, p. 1189–1198, 2011.

WULLAERT, H.; POHLERT, T.; BOY, J.; VALAREZO, C.; WILCKE, W. Spatial throughfall heterogeneity in a montane rain forest in Ecuador: extent, temporal stability and drivers. **Journal of Hydrology**, v. 377, p. 71–79, 2009.

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. 5<sup>a</sup> ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010. 944 p.

ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W.; NULLET, M. A.; SUTHERLAND, R. A.; TANTASARIN, C.; VOGLER, J. B.; NEGISHI, J. N. 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, 2009.

ZIMMERMANN, A.; GERMER, S.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEER, H. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest. **Journal of Hydrology**, v. 360, p. 87–102, 2008.

ZIMMERMANN, A.; VOSS, S.; METZGER, J. C.; HILDEBRANDT, A.; ZIMMERMANN, B. Capturing heterogeneity: the role of a study area's extent for estimating mean throughfall. **Journal of Hydrology**, v. 542, p. 781–789, 2016.

ZIMMERMANN, A.; WILCKE, W.; ELSENBEER, H. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. **Journal of Hydrology**, v. 343, p. 80–96, 2007.

ZIMMERMANN, A.; ZIMMERMANN, B. Requirements for throughfall monitoring: the roles of temporal scale and canopy complexity. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 189–190, p. 125–139, 2014.

ZIMMERMANN, A.; ZIMMERMANN, B.; ELSENBEER, H. Rainfall redistribution in a tropical forest: spatial and temporal patterns. **Water Resources Research**, v. 45, n. 11, 2009.

ZIMMERMANN, B.; ZIMMERMANN, A.; LARK, R. M.; ELSENBEER, H. Sampling procedures for throughfall monitoring: A simulation study. **Water Resources Research**, v. 46, n. 1, p. 1–15, 2010.

ZOU, C. B.; CATERINA, G. L.; WILL, R. E.; STEBLER, E.; TURTON, D. Canopy interception for a tallgrass prairie under juniper encroachment. **PLoS ONE**, v. 10, n. 11, 2015.

ZUECCO, G.; PENNA, D.; VAN MEERVELD, H. J.; DALLA FONTANA, G.; BORGA, M. Comparison of two different types of throughfall collectors. **Bodenkultur**, v. 65, n. 3–4, p. 51–56, 2014.