



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS - UEA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE – PPG-CLIAMB

**PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA FLORESTA DE TERRA FIRME
NA AMAZÔNIA CENTRAL**

REGIÃO DA COSTA DE OLIVEIRA

MANAUS - AM

Novembro, 2020

REGIÃO DA COSTA DE OLIVEIRA

**PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA FLORESTA DE TERRA FIRME
NA AMAZÔNIA CENTRAL**

Orientador: Dr. Luiz Antônio Cândido

Coorientador: Dr. Robinson I. Negrón-Juárez

Fonte Financiadora: CAPES, NGE-E-Tropics

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA com a Universidade do Estado do Amazonas – UEA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Clima e Ambiente.

MANAUS - AM

Novembro, 2020

048regis Oliveira, Regison da Costa de

PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA FLORESTA DE
TERRA FIRME NA AMAZÔNIA CENTRAL / Regison da Costa de Oliveira;
orientador Luiz Antônio Cândido; coorientador Robinson I. Negrón-Juárez. --
Manaus:[s.l], 2020.

81 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação em Clima e Ambiente) --
Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2020.

1. Partição hídrica; 2. umidade do solo; 3. Evapotranspiração; 4. Amazônia
central. I. Título.

CDD 551.66813

Sinopse:

Estudou-se a dinâmica de água no solo e o particionamento da evapotranspiração, em uma floresta madura na Amazônia Central. Foram avaliados a contribuição do conteúdo de água no solo superficial e profundo, e de três grupos de árvores para a evapotranspiração.



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E AMBIENTE DO INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA E UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS.

Aos 30 dias do mês de novembro do ano de 2020, às 14:00 horas, de forma síncrona remota, reuniu-se a Comissão Julgadora de Defesa Pública, composta pelos seguintes membros Dr. Luiz Antonio Candido (Presidente), Dra. Elisangela Broedel e o Dr. Ricardo Antônio Marengo Mendonza, tendo como suplentes o Dr. Antonio Ocimar Manzi e o Dr. Alessandro Carioca de Araújo, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a avaliação pública do trabalho de Dissertação de Mestrado de Regison da Costa de Oliveira intitulado "PARTIÇÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM UMA FLORESTA DE TERRA FIRME NA AMAZÔNIA CENTRAL", orientado pelo Dr. Luiz Antonio Candido (INPA) e Dr. Robinson I. Negrón-Juaréz (LBNL)

O Presidente da Comissão Julgadora deu início à seção e informou os procedimentos do exame. O aluno fez a exposição do seu trabalho que foi avaliado pelos membros da Comissão Julgadora de Defesa Pública. A Comissão Julgadora, então, se reuniu e os membros emitiram os seguintes pareceres:

Nome	Parecer	Assinatura
Luiz Antonio Candido (*)	(x) Aprovado () Reprovado	
Elisangela Broedel (*)	(x) Aprovado () Reprovado	
Ricardo Antônio Marengo (*)	(x) Aprovado () Reprovado	

Nada mais havendo a relatar, foi lavrada a presente ata que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Julgadora.

(*) Membros que participaram por vídeo conferencia, com parecer reconhecido pelo presidente da banca.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, por ser o arquiteto do universo, por ser essencial em minha vida, meu guia e pelo socorro presente na hora da angústia.

A minha família, especialmente a minha mãe Deusnete, pelo amor e carinho, apoiando-me sempre incondicionalmente, principalmente nos momentos mais difíceis. Aos meus irmãos Ragison e Regiane por me fazerem companhia durante esta trajetória.

A todos meus amigos e colegas que de alguma forma colaboram com minha caminhada acadêmica, em especial aos meus amigos mais próximos Alexandre, Vinicius e Antônia. Quero agradecer também as minhas “colegas” Nayandra e Silvana, por comporem metade da minha turma de pós-graduação e pela parceria durante o desenrolar das disciplinas.

A todos os docentes e colaboradores do Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente, que contribuíram para o meu amadurecimento na pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Cândido, pelas valiosas orientações, ensinamentos e conversas. Principalmente por sua criatividade em resolver problemas.

Ao meu segundo orientador, Dr. Robinson Negrón-Juárez, por sua imensa contribuição na construção do tema, ensinamentos, incentivo, conversas e conselhos.

Ao Dr. Sávio Ferreira, serviu com um terceiro orientador e ao mesmo tempo como um grande companheiro nessa jornada, por me inserir no mundo da hidrologia, sempre me apoiando e auxiliando nas atividades de campo, deixo aqui meu muito obrigado por toda sua contribuição e tempo dedicado a mim.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), pela oportunidade de realizar o mestrado em Clima e Ambiente (CLIAMB), e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal a Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Ao Programa LBA, pelo apoio logístico, material técnico e de consumo, e o uso de sua estrutura para o desenvolvimento da pesquisa. Em especial ao pessoal da base LBA-ZF2: Elisel, França, Dona Gigi, Dona Rose, obrigado por toda a ajuda e apoio no campo durante os momentos que precisei.

Ao Grupo de Hidrologia-LBA pela disponibilização de dados hidrológicos, a Dra. Terezinha Monteiro e Dr. Eduardo Rios, e aos demais pesquisadores que colaboram constantemente para as pesquisas hidrológicas. E aos meus parceiros de campo, Claudenilson e Thomé, meu muito obrigado por toda ajuda, cuja sem ela, não seria possível manter o

funcionamento dos sensores em campo. E meu obrigado ao agora Dr. Marcelo Mota, pela ajuda com a calibração e instalação dos sensores TDR.

Ao grupo de Micrometeorologia-LBA, por disponibilizar os dados de fluxo da torre K34, em especial a Marta e ao Paulo pela ajuda no processamento dos dados.

Ao Dr. Alessandro Araújo e ao Msc. Crisvaldo Cássio pela disponibilização dos dados de inventários da área de estudo provenientes da Chamada MCTI/CNPq/FNDCT - Ação Transversal N° 68/2013, Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia - LBA, processo N°. 458037/2013-3.

Ao Laboratório de Silvicultura da UFAM, pelo compartilhamento dos dados de fluxo de seiva, em especial ao Msc. José Carlos e Msc. Thayane, meu muito obrigado por todo apoio, ajuda e nossas inúmeras aventuras no campo.

Ao projeto NGEE-Tropics, pela disponibilização dos sensores TDR e financiamento do presente estudo. Meu obrigado vai também aos integrantes Msc. Gustavo Spanner e Dr. Bruno Gimenez.

Enfim a todos que, mesmo não citados contribuíram de alguma forma para a concretização deste trabalho. Deixo aqui expresso, os meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical do mundo, possuindo uma importante relevância por sua imensa biodiversidade e pelo seu papel regulatório no sistema climático global. Com destaque para os mecanismos de reciclagem de precipitação em que a transferência de água por evapotranspiração (ET) é importante, e mantida pelo estoque de água no solo, que sustenta o ecossistema de floresta tropical durante a estação seca. Diante de cenários de mudanças climáticas, entender a partição da ET em seus componentes constituintes (evaporação (E) e transpiração (T)) e sua relação com a dinâmica de água no solo e os mecanismos de uso de água pela vegetação, é um grande desafio. Principalmente, quando se considera a diversificada composição de árvores florestais que estão condicionadas e respondem de maneira distinta as variações de água no solo. O presente estudo foi realizado em uma área de platô localizada em uma floresta madura na Amazônia Central, onde foi avaliada a contribuição do conteúdo de água no solo e de três grupos de árvores para a evapotranspiração. O conteúdo de água no solo em camadas profundas mostrou ser uma importante reserva de água para manter a ET no período seco, e em prolongados períodos com ausência de precipitação no período chuvoso. Verificou-se a ocorrência de um mecanismo de extração de água pelas raízes, que acessam as camadas profundas à medida que a disponibilidade de água nas camadas superficiais diminui. Observou-se que as extrações de água podem atingir até 8,80 metros de profundidade do solo. Outro fator observado é que a variação vertical do conteúdo de água no solo é influenciada pelas características físicas do solo que favorecem a formação de zonas preferenciais de extração de água. A partição da ET durante o período analisado mostrou que 35% (476 mm) da precipitação (1409 mm) foram devolvidos para atmosfera no processo de ET, sendo que 13% (61 mm) foram por interceptação, enquanto a transpiração contribuiu com 87 % (415 mm). A maior contribuição às perdas por transpiração veio de árvores de dossel emergente, com 49% (203 mm), seguidas pelas árvores de subdossel e sub-bosque, com 31% (128 mm) e 20% (84 mm), respectivamente. Adicionalmente, as análises de fluxo de seiva relevaram padrões de T específicos para as classes de árvores. As variações de amplitude de T mostram que apesar das árvores emergentes dominarem a perdas de T, as demais árvores possuem papel importante na ET, principalmente durante o período seco, quando ocorre a redução das perdas de T pelas árvores emergentes. Essa redução foi compensada pelo aumento da T nas árvores de subdossel e sub-bosque. Estes resultados mostram a importância das observações

sistemáticas e contínuas para a avaliação da partição de ET em diferentes estratos da floresta tropical amazônica, e para a compreensão da resiliência do ecossistema á potenciais mudanças no regime hidrológico associado à variabilidade e mudança do clima.

Palavras chaves: Partição do balanço hídrico, evapotranspiração, umidade do solo, floresta tropical, Amazônia central.

ABSTRACT

The Amazon Forest is the largest tropical forest in the world, having an important relevance for its immense biodiversity and for its regulatory role in the global climate system. With emphasis on the mechanisms of recycling of precipitation in which the transfer of water by evapotranspiration (ET) is important, and maintained by the stock of water in the soil, which sustains the ecosystem of the tropical forest during the dry season. Faced with climate change scenarios, understanding the partition of ET into its constituent components (evaporation (E) and transpiration (T)) and its relationship with the dynamics of water in the soil and the mechanisms of water use by vegetation is a major challenge. Especially when considering the diverse composition of forest trees that are conditioned and respond differently to changes in water in the soil. The present study was carried out in a plateau area located in a mature forest in Central Amazonia, where the contribution of soil water content and three groups of trees to evapotranspiration was evaluated. The soil water content in the deep layers proved to be an important water reserve to maintain ET in the dry period, and in prolonged periods without precipitation in the rainy season. It was verified the occurrence of a mechanism of water extraction by the roots, which access the deep layers as the availability of water in the superficial layers decreases. It was observed that water extractions can reach up to 8.80 meters deep in the soil. Another factor observed is that the vertical variation of the water content in the soil is influenced by the physical characteristics of the soil that favor the formation of preferential zones of water extraction. The TE partition during the analyzed period showed that 35% (476 mm) of precipitation (1409 mm) returned to the atmosphere in the TE process, with 13% (61 mm) being intercepted, while sweating contributed 87% (415 mm). The greatest contribution to perspiration losses came from trees emerging from the canopy, with 49% (203 mm), followed by subdossel and understory trees, with 31% (128 mm) and 20% (84 mm), respectively. In addition, sap flow analysis revealed specific T patterns for tree classes. Variations in the amplitude of T show that although emerging trees dominate T losses, other trees play an important role in ET, especially during the dry season, when the reduction of T losses by emerging trees occurs. This reduction was offset by the increase in T in the sub-crown and understory trees. These results show the importance of systematic and continuous observations for the evaluation of the ET partition in different strata of the Amazonian forest and for the understanding of the ecosystem's resilience to potential changes in the hydrological regime associated with variability and climate changes.

Keywords: Water balance partition, evapotranspiration, soil moisture, tropical forest, Central Amazon.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO GERAL	6
2.1. Objetivos específicos	6
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	7
3.1. Área de estudo	7
• Localização.....	7
• Clima	8
• Geologia, relevo e solos	8
• Vegetação e composição florística.....	9
3.2. Dados meteorológicos	10
3.3. Medidas de conteúdo de água no solo e estimativa da extração radicular	10
3.4. Determinação da evapotranspiração	15
3.5. Medidas de fluxo de seiva e determinação da transpiração.....	16
• Seleção de indivíduos e instalação dos sensores “Sapflow”	16
• Determinação do fluxo de seiva.....	17
• Determinação da área do xilema ativo	18
• Determinação da Transpiração para a floresta.....	18
4. RESULTADOS.....	20
4.1. Precipitação.....	20
4.2. Distribuição espaço temporal do conteúdo de água no solo	22
4.3. Evapotranspiração e a extração de água pelas raízes.....	26
4.4. Taxas de uso de água e variação sazonal.....	28
4.5. Partição da Evapotranspiração	32
5. DISCUSSÃO	35
5.1. Dinâmica de água no solo.....	35
5.2. Contribuição do conteúdo de água no solo para manter a evapotranspiração.....	38

5.3. Partição da evapotranspiração e incertezas para o balanço hídrico	42
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES.....	46
REFERENCIAS	48
ANEXOS	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo das características da parcela do inventário para 1 Hectare.	19
Tabela 2. Uso de água médio e máximo em 16 indivíduos monitorados entre fevereiro e setembro de 2019.....	29
Tabela 3. Contribuição do conteúdo de água no solo para manter a evapotranspiração no dia 22 de setembro de 2018, considerado o dia mais seco da série de dados analisadas.	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.	7
Figura 2. Esquema representando a integração da umidade do solo entre dois sensores instalados em um perfil de solo.	12
Figura 3. Perfil de ilustração do armazenamento de água no solo (Adaptado de Libardi, 2005)	13
Figura 4. Analisador de gases e anemômetro ultrassônico que compõe o sistema de “eddy covariance”.	15
Figura 5. Esquema do funcionamento do sensor de fluxo, adaptado de Pimentel (2010).	17
Figura 6. Precipitação total diária para o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2019 (A) e precipitação total mensal para os anos de 2018, 2019 e precipitação total mensal média obtida com os dados de 2001 a 2019(B).	21
Figura 7. Precipitação e distribuição espaço temporal do conteúdo de água no solo de novembro de 2018 a janeiro de 2020	22
Figura 8. Variação do conteúdo de água no solo em resposta a fortes eventos de precipitação em um estado antecedente de solo seco (A) e em um estado antecedente de solo úmido (B). 23	
Figura 9. Precipitação (A), conteúdo de água no solo (B) e nível do lençol freático (C) entre setembro de 2018 a janeiro de 2020. Dados de nível do lençol freático foram cedidos pela Coordenação de Pesquisas Hidrológicas do projeto LBA(LBA Fase 2 - CPH - Coordenação de Pesquisas Hidrológicas (inpa.gov.br))	24
Figura 10. Evapotranspiração e déficit de pressão de vapor (A), umidade relativa do ar (B) e conteúdo de água no solo (B), em um período sem ocorrência de chuva, com evidências de umedecimento das camadas superficiais.	25
Figura 11. Correlação entre evapotranspiração estimada pelo método de Covariância de Vórtices Turbulentos (Eddy Covariance) e extração de água pelas raízes estimada pelo balanço de água no solo em um perfil de 15 m (ΔS) para dias com ausência de precipitação. A linha contínua vermelha representa uma relação 1:1, a faixa vermelha o intervalo de confiança, a escala de cor indica a profundidade máxima que ocorreu extração de água pelas raízes.	26
Figura 12. Profundidade de acesso das raízes para extração de água no solo (A), média diária de déficit de pressão de vapor (B), evapotranspiração (C) e disponibilidade de água no solo para o primeiro metro do solo (D)	27

- Figura 13.** Ciclo diurno médio da Taxa de transpiração por indivíduos para o período chuvoso (fevereiro, março, abril) e seco (julho, agosto, setembro) no ano de 2019 e ciclo diurno médio da evapotranspiração obtido pelo Eddy Covariance. O sombreamento nas linhas indica o desvio padrão. 31
- Figura 14.** Balanço mensal de precipitação, evapotranspiração, transpiração total e transpiração em classes entre os meses de fevereiro e agosto de 2019. 33
- Figura 15.** Ciclo diurno médio para período chuvoso e seco durante o particionamento da evapotranspiração. 34
- Figura 16.** Contribuição do conteúdo de água no solo para evapotranspiração por camada... 39

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ET	-Evapotranspirao
T	-Transpirao
E	-Evaporao
INPA	-Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia
ZF2	-Zona florestal 2
LBA	-The Large Scale Atmosphere-Biosphere Experiment in Amazônia
CPH	-Coordenao de Pesquisas Hidrológicas
DAP	-Diâmetro a altura do peito (cm)
NGEET	-Next Generation Ecosystem Experiments in the Tropics
Ka	-Permissividade dielétrica
TDR	-Time Domain Reflectometry
EC	-Eddy Covariance
FS	-Fluxo de seiva
VWC	-Volumetric Water content
ΔS	-Variao de água no solo
DPV	-déficit de pressão de vapor (kPa)
SWA	-Soil Water available

1. INTRODUÇÃO

A floresta Amazônica é a maior floresta tropical do mundo e ocupa 53 % da área tropical do globo (Negrón-Juárez et al., 2018), possuindo uma importante relevância pela imensa biodiversidade que abriga, pelas suas funções ecossistêmicas e serviços ambientais que fornece à biosfera terrestre, e pelo seu papel regulatório no sistema climático, tanto em escala regional como global (Malhi et al., 2015; Nobre et al., 2016).

Uma de suas contribuições está na regulação do ciclo hidrológico e de nutrientes nos seus diferentes compartimentos. A floresta Amazônica é considerada um sistema autossustentável, em parte devido a alta taxa de reciclagem de água e nutrientes, por meio da precipitação e evapotranspiração (Salati e Vose, 1984; Salati, 1987; Silva Dias e Marengo, 1999; Marengo et al., 2004; Van der Ent et al., 2010).

A evapotranspiração (ET) é um dos principais componentes do ciclo hidrológico, e compreende as perdas de água para atmosfera a partir das superfícies de folhas, galhos, solos, lagos, rios (pelo processo de evaporação) e dos interstícios (estômatos) das plantas (pelo processo de transpiração) impulsionada pela radiação solar, déficit de pressão de vapor, e temperatura (Katul et al., 2012). A perda de água no processo de evapotranspiração das superfícies terrestres é responsável por 60 % da umidade atmosférica (Shiklomanov, 1998). Na floresta amazônica esse mecanismo é capaz de reciclar em média de 25 a 56% do equivalente de água precipitada (Eltahir e Bras, 1996). Mudanças no padrão de ET são de fácil detecção, ao contrário da precipitação e do escoamento que são intermitentes e não lineares. Por ser um processo contínuo, a ET é um importante indicador de mudanças climáticas regionais (Douville, 2012).

A bacia Amazônica apresenta em média ET de 1316 mm por ano (Paca et al., 2019). Na parte central da Amazônia há registros indicam ET de 1360 mm por ano (59 % da precipitação), sendo 851 mm (37 %) reciclados através da transpiração das árvores. Essas estimativas variam de um ano para ano, e em diferentes ecossistemas (Kunert et al., 2017), tendo em conta a grande diversidade do ecossistema de floresta tropical, que juntamente com a estrutura do dossel vegetativo regula a eficiência no uso da água (Aparecido et al., 2016; Kunert et al., 2017).

A perda de água por evapotranspiração está diretamente relacionada ao tipo de cobertura do solo e possui influência da morfologia da vegetação e das variáveis ambientais

(Aparecido et al., 2016). De acordo com Paca et al., (2019), na bacia Amazônica há uma forte relação entre evapotranspiração e a densidade da vegetação, na qual os valores mais altos são encontrados em áreas com vegetação densa, e valores baixos são encontrados em áreas com vegetações dispersas. Logo se verifica redução de ET nas zonas de pastagens em comparação com as zonas de florestas densas.

Na região Amazônica os índices de área foliar são muito altos, apresentando valores médios de 6,1 (Marques Filho et al., 2005) e 5,31 (Rosa, 2016) em zonas de platôs, com uma baixa variação sazonal, que pode estar relacionada a grande quantidade de folhas no dossel que se renovam continuamente durante o ano (Negrón-Juárez et al., 2008; Rosa, 2016; Wu et al., 2016). Essa alta densidade de vegetação faz com que a evaporação do solo seja muito pequena para ser considerada no balanço hidrológico. Assim pode-se considerar que a transpiração das plantas e a evaporação da precipitação interceptada pelas copas das árvores determinam a perda por ET na Amazônia.

A perda por interceptação é uma importante parcela de água que fica retida na copa e retorna para atmosfera através da evaporação direta da copa, sem atingir o solo. Estudos na Amazônia central estimam que a perda por interceptação da precipitação é variável e pode chegar a 19,8 % (Franken et al., 1992), 8,9 % (Lloyd e Marques, 1988), 11,6 a 17 % (Ubarana, 1996), 12,9 a 25,8 % (Ferreira et al., 2005) e 16,5 % na reserva de Cuieiras (Cuartas et al., 2007) e 24 % Monteiro et al (dados não publicados). Esses valores sofrem também variação conforme as condições meteorológicas (intensidade e duração dos eventos de chuva, temperatura e velocidade do vento) e as características da vegetação (Cuartas et al., 2007).

Em escala sazonal, a floresta mantém altas taxas de ET mesmo no período seco, onde o estoque de água no solo é praticamente a única fonte de água. Medições de umidade do solo em conjunto com a ET, indicam que as taxas elevadas no período seco são sustentadas pela extração de águas a partir de camadas profundas do solo, desempenhada pelas raízes das plantas (Nepstad et al., 1994; Bruno et al., 2006; Negrón-Juárez et al., 2007; Markewitz et al., 2010; Broedel et al., 2017). Esse processo torna a zona de raízes profundas um importante amortecedor da perda de água pela vegetação durante condições de seca extrema (Wang-Erlandson et al., 2016). Entretanto, em ecossistemas de transição e cerrados, onde o índice

pluviométrico é baixo (<1600 mm) e o período seco dura mais de 4 meses, a ET apresenta declínio (Da Rocha et.al., 2009).

O conteúdo de água no solo é a principal fonte de água para a vegetação, e assim é um fator limitante para o processo de transpiração, por influenciar a partição de energia e as demais componentes do balanço hídrico da superfície (Robock, 2015). A análise do balanço hídrico para a região central da Amazônia (Tomasella et al., 2008), revelou um forte “efeito memória” no sistema de águas subterrâneas, que transfere os efeitos de anomalias climáticas sazonais de um ano para o outro. Esse efeito é responsável por manter o funcionamento ecossistêmico e o equilíbrio hídrico da vegetação no período seco, e por amortecer os efeitos de secas extremas (Tomasella et al., 2008; Broedel et al., 2017).

As florestas possuem padrões de distribuição de raízes distintos para lidar com a seca. Os mecanismos mais relatados para combater os efeitos do estresse hídrico, é o rápido desenvolvimento de raízes finas em camadas com alto teor de umidade (Chauvel et al., 1992; Brunner et al., 2015; Vries et al., 2016; Bristiel et al., 2018; Germon et al., 2019). Estudos sugerem que raízes muito profundas (em profundidades maiores que 10 m) são comuns em solos tropicais altamente intemperizados (Nepstad et al., 1994, Saleska et al., 2007). Mesmo com baixa densidade, as raízes finas podem absorver água suficiente para a manutenção da vegetação durante os períodos de seca (McDowell et al., 2008; Nardini et al., 2016), e assim contribuir para manter as taxas elevadas de evapotranspiração (Nepstad et al., 1994; Bruno et al., 2006; Negrón-Juárez et al., 2007; Broedel et al., 2017).

A transpiração é a principal rota de transferência de água da superfície para a atmosfera, representando 70% do fluxo de água para atmosfera em florestas tropicais (Schlesinger e Jasechko, 2014) e 64 % globalmente (Good, 2015). Sendo o tamanho das árvores o principal componente na interação entre planta e atmosfera (Aparecido et al., 2016).

Estudos apontam que árvores grandes são responsáveis por altas taxas de fluxo de água para a atmosfera (Horna et al., 2011; Aparecido et al., 2016; Kunert et al., 2017; TFWala et al., 2019). Apesar de suas altas taxas de transpiração e da capacidade de acessarem a água disponível em camadas profundas do solo, as árvores emergentes são as mais suscetíveis a mortalidade induzida por estresse hídrico (McDowell et al., 2018), e, portanto, é uma questão que leva a incertezas quanto a partição e equilíbrio hídrico do ecossistema florestal, e da sua resiliência à anomalias climáticas extremas. Acrescenta-se a isso as incertezas causadas pelas características fisiológicas das plantas em relação ao uso da água, cujo comportamento

funcional em relação à mensuração dos fluxos de água de forma ampla e confiável é ainda um grande desafio para fisiologia de plantas (Sack et al., 2016; Shipley et al., 2016). Fenômenos que podem ainda ser influenciados pelas propriedades químicas e físicas do solo (Quesada et al., 2012).

Estudo como de Cosme et al., (2017) realizado na Amazônia Central, indica que as condições hidrológicas locais podem influenciar na arquitetura hidráulica da vegetação e funcionar como filtros que moldam a composição da floresta, contribuindo para uma complexa cobertura vegetal com diferentes magnitudes e estratégias de uso da água. Isso implica em inúmeras incertezas nas estimativas de transferência dos fluxos de água entre o ecossistema florestal e a atmosfera.

Poucos estudos abordam a magnitude e a variação espaço-temporal da ET e da partição de suas componentes na Amazônia em escala de sub-bosque, apesar dos recentes estudos de transpiração em biomas amazônicos (como por exemplo: da Costa et al., 2017; Kunert et al., 2017; Brum et al., 2018). Entretanto, ainda persistem lacunas na compreensão dos fluxos de água para atmosfera, desde a captação de água no solo, transpiração dos diferentes tipos de vegetação e, principalmente, como a dinâmica de sua partição se comporta em escala de árvores e em períodos secos.

Embora os impactos das mudanças de uso da terra na bacia amazônica ainda não tenham ultrapassado a magnitude da variabilidade natural dos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos, há alguns sinais de transições para regimes de desequilíbrio ambiental (Daivison et al., 2012). Globalmente, há crescentes evidências de que a ET já foi perturbada pelas atividades humanas (Douville et al., 2012), com alguns estudos apontando que o desflorestamento pode causar uma diminuição na ET devido do feedback da floresta (Nobre et al., 1991; Koe et al., 2013; Zemp et al., 2017).

A resposta dos fluxos de ET diante de potenciais mudanças climáticas ainda é algo incerto, assim como o próprio entendimento da contribuição de ET nos fluxos a superfície, e o quanto essa falta de conhecimento influencia nas incertezas das projeções de precipitação regional (Joetzjer et al., 2013). Logo, mais estudos são necessários acerca dos diferentes componentes que modificam a magnitude e a variabilidade dos processos inerentes a ET.

A determinação da partição de ET em um ecossistema tão complexo, como a floresta tropical da Amazônia, é uma tarefa difícil devido as estimativas de transpiração da vegetação envolvem diversos fatores ambientais e fisiológicos. Além desses, envolve a forte regulação

da disponibilidade de água no solo, e da grande diversidade de espécies florísticas. No entanto, a mensuração da distribuição da água dentre os vários processos de transferência é crucial para entender como a interação solo-planta-atmosfera influencia na evapotranspiração de ecossistemas florestais. E de que forma o controle dessa perda de água pela vegetação influencia a resiliência do ecossistema no período seco.

Na floresta tropical a principal componente da ET é a perda por transpiração, e esta é regulada pelas características morfológicas e fisiológicas dos indivíduos arbóreos que compõem o ecossistema. Além disso, variáveis ambientais como radiação solar, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e disponibilidade hídrica podem exercer acentuada regulação dessa perda de água para a atmosfera. Apesar de importante, a transpiração ainda é pouco medida, de tal forma que a resposta deste subcomponente à regulação dos processos de transferência de água na floresta representa uma área de lacuna do conhecimento.

Diante disso, o principal objetivo do presente estudo foi avaliar a partição da ET em dois segmentos: 1) avaliando a dinâmica de água no solo e sua contribuição para manter a ET através da captação de água pelas raízes, identificando as camadas que apresentam maior atividade de extração radicular e 2) mensurando a contribuição da transpiração de diferentes tipos de vegetação (emergentes, subdossel e sub-bosque) em nível de estande e individual em uma área de floresta na Amazônia Central em escala sazonal.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar a contribuição do conteúdo de água no solo e de diferentes tipos de vegetação na regulação da transpiração, e na partição da evapotranspiração de um ecossistema de floresta tropical em escala sazonal.

2.1. Objetivos específicos

- i.** Avaliar a dinâmica de água no solo em diferentes perfis, calcular o estoque de água e a extração pelas raízes.
- ii.** Determinar a transpiração da vegetação por meio do fluxo de seiva de uma comunidade florística de platô.
- iii.** Avaliar a influência da dinâmica da água do solo na transpiração de uma comunidade florística de platô.
- iv.** Avaliar a contribuição dos diferentes componentes (perda por interceptação e transpiração) na evapotranspiração de um ecossistema de floresta tropical.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

- **Localização**

A área de estudo se localiza na Amazônia central, especificamente na microbacia experimental do igarapé Asu, na Reserva Biológica do Rio Cuieiras do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA, situada a 80 km a noroeste de Manaus-AM, com latitude $2,609025^{\circ}$ Sul e longitude $60,208785^{\circ}$ Oeste. A microbacia tem acesso pelo km 34 da estrada vicinal ZF-2, que por sua vez inicia-se à esquerda do km 934 da BR 174 (antigo km 50) no sentido Manaus – Boa vista. A microbacia abrange uma área de $14,8 \text{ km}^2$ (Figura 1) e está inserida dentro da base do projeto de Grande Escala Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA.

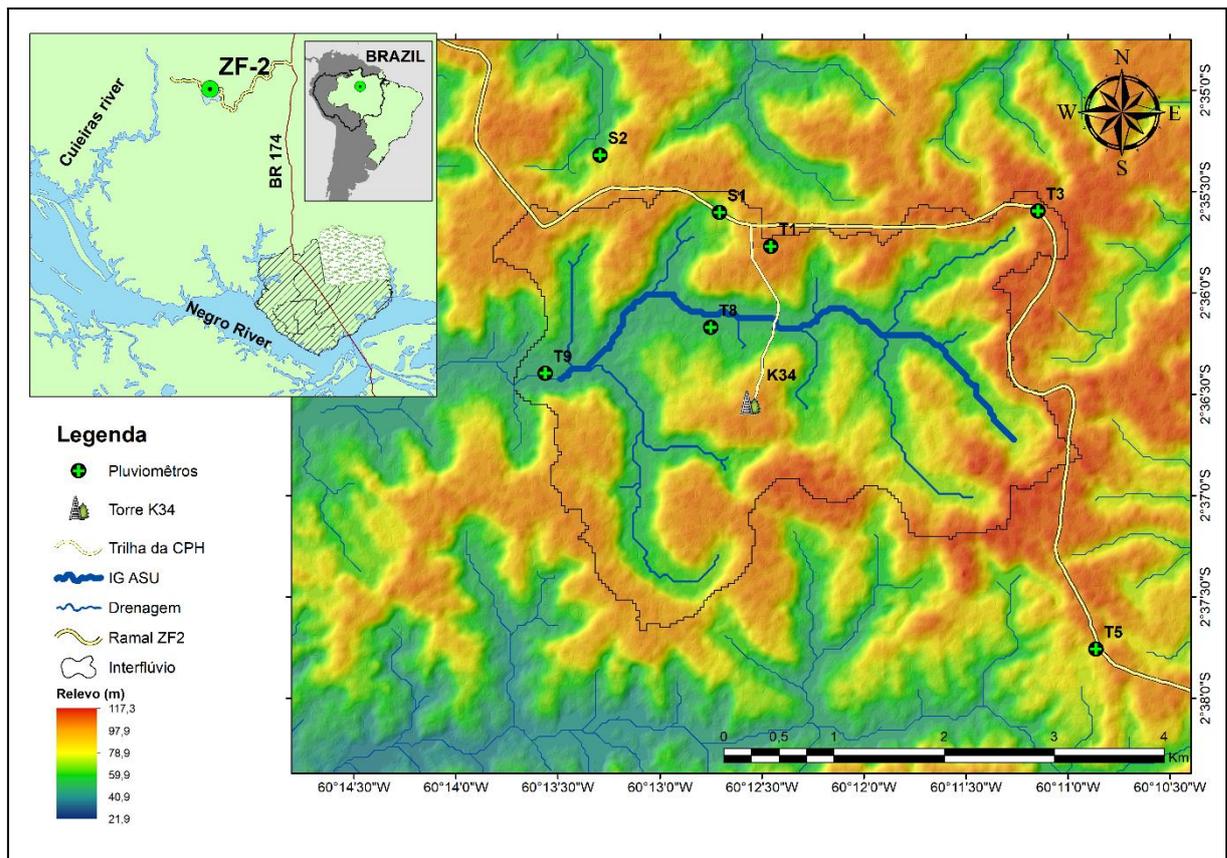


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

- **Clima**

De acordo com a Classificação de Köppen, o clima da região é do tipo “Am” (Radambrasil, 1978), tropical úmido, caracterizado como quente e úmido durante o ano todo. Apresentando temperatura média anual de 26,7 °C, umidade relativa do ar de 80 % e precipitação anual variando de 1800 mm a 2800 mm (Leopoldo et al., 1987). O período mais úmido abrange os meses de novembro a maio, e o período mais seco, de junho a outubro, com os meses de agosto e setembro sendo os meses mais secos (quando o total mensal de precipitação não ultrapassa 100 mm) e março e abril sendo os meses mais chuvosos (precipitação >300 mm) (Araújo et al., (2002), Waterloo et al., (2006), Cuartas et al., (2007) e Tomasella et al., (2008)).

A média anual para precipitação registrada na microbacia do Igarapé Asú (2001-2019) é de 2037 mm, mostrando para essa região os meses de março e abril com precipitação acima de 250 mm, e os meses de agosto e setembro sempre abaixo de 100 mm.

- **Geologia, relevo e solos**

A geologia da Amazônia central constitui-se de rochas cristalinas pré-cambrianas-cambrianas, sendo identificadas três unidades estratigráficas. A mais profunda é a formação Trombetas, que não está exposta, pois é coberta pela formação terciária Alter do Chão, rica em caulinita que, em alguns lugares, é coberta por sedimentos quaternários (Dias et al., 1980). Na área em estudo, o relevo local foi formado pela dissecação de um platô de sedimentos terciários por vales de várias dimensões (Bravard & Righi, 1989). A área é composta por uma sequência de platô, encosta (ou vertente) e baixio (Luizão et al., 2004), com diferença de altura máxima de 60 m.

Nos platôs o solo possui constituintes minerais resistentes a alterações, tais como caulinita, quartzo, óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (Chauvel, 1982). Nos primeiros 30 cm o solo é composto de 65 % a 75% por argila, sendo assim considerado como solos argilosos (Latosolos Amarelos) e abaixo dessa camada (2 a 4 metros de profundidade), são considerados muito argiloso, com 80 % a 90 % de argila (Chauvel et al., 1987).

Nas vertentes, os solos são do tipo Podzólicos vermelho-amarelo, possuindo uma mistura das características dos platôs e baixios (Ferraz et al., 1998). Nessas áreas ocorre a

translocação de argila e de compostos organominerais dentro do perfil entre os horizontes A e B do solo (podzolização), fazendo com que as partes mais altas se caracterizem por solos argilosos e areoargilosos, próximos aos baixios (Ferraz et al., 1998; Laurance et al., 1999).

Os baixios são localizados nas planícies aluviais ao longo das drenagens, onde os solos caracterizam-se por ser predominantemente arenosos, úmidos e rico em alumínio, sendo classificados como Arenossolos hidromórficos ou Espodossolos (Ferraz et al., 1998; Laurance et al., 1999).

- **Vegetação e composição florística**

A vegetação da área de estudo é típica de floresta tropical primária não perturbada ou floresta densa de terra firme, apresentando um índice de área foliar de 6,1 m²/m² (Marquês Filho *et al.*, 2005). É possível distinguir camadas verticais, onde o solo e a topografia são determinantes na estrutura da floresta, com altura da vegetação variando de 35 m a 40 m nos platôs e presença de árvores emergentes (45m); variação de 25 m a 35 m nas zonas de encostas e menor que 25 m em zonas de baixios, que são caracterizados por possuir menor densidade de biomassa e presença de palmeiras (Ferreira et al., 2005; Schietti et al., 2013; Figueiredo et al., 2014).

Em relação a distribuição de raízes, a maior concentração de biomassa radicular encontra-se nas camadas superficiais do solo, com predomínio de raízes finas (menores que 0,2 mm), que contribuem com 78 % da biomassa superficial e um predomínio de 90 % nas camadas profundas (Chauvel et al., 1992).

A floresta possui uma elevada diversidade de árvores, apresentando uma alta taxa de espécies raras (Carneiro et al., 2005; Higuchi et al., 1997; Saito et al., 2003). Há 70 % dos indivíduos apresentando diâmetro a altura do peito (DAP) menor ou igual a 22,1 cm e poucos indivíduos apresentando DAP acima de 90 cm (Oliveira et al., 2002). Tanto na composição florística quanto na análise estrutural, as famílias botânicas mais expressivas são Lecythidaceae e Sapotaceae, sendo estas famílias consideradas as mais importantes desta área em estudo (Oliveira & Amaral, 2004; Carneiro et al., 2005). A área é também caracterizada pelas espécies *Dinizia excelsa* Ducke, *Eschweilera coriacea* (DC.) S.A. Mori, *Protium apiculatum* Swart, *Eschweilera wachenheimii* (Benoist) Sandwith, *Eschweilera truncata*

A.C.Sm., *Scleronema micranthum* e *Micrandropsis scleroxylon* (Oliveira & Amaral, 2004; Carneiro et al., 2005).

3.2. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos por meio de sensores instalados na torre micrometeorológica K34 (54 m), pertencente ao projeto de Grande Escala Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA (<http://lba2.inpa.gov.br/>) e gerenciada pelo grupo de micrometeorologia do LBA. A Torre está situada em uma área de platô e está em funcionamento desde 1999.

As variáveis meteorológicas utilizadas no presente estudo foram: temperatura e umidade relativa do ar (medida com termohigrômetro Vaisala em perfis de 51,1 m; 42,5 m; 35,5 m; 28,0 m; 15,6 m; 5,2 m) e precipitação pluviométrica (medido com pluviômetro TB4 da Hydrological Services America em 51,35 m). Todas as variáveis possuem um intervalo de tempo da média de 30 minutos. Para precipitação foi analisado o período de janeiro de 2018 a janeiro de 2020, para as demais variáveis foi de julho de 2018 a janeiro de 2020. Para mais detalhes sobre a instrumentação e as variáveis são encontrados em Araújo et al., (2002).

3.3. Medidas de conteúdo de água no solo e estimativa da extração radicular

Para determinação do conteúdo de água no solo foram utilizados dados medidos por sensores instalados em um perfil de solo com 15 m de profundidade, acessado via um poço profundo e coletados pela Coordenação de Pesquisas Hidrológicas do projeto de Grande Escala Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA.

O poço está localizado dentro da microbacia experimental do igarapé Asu, com latitude 2,609025° Sul e longitude 60,208785° Oeste à 95 metros de altitude acima do nível do mar, estando a 30 metros de distância da torre micrometeorológica K34. O poço foi construído em 1998 (Avisar et al., 2002) e está operando desde julho de 2002 (Broedel, 2012) com medida de conteúdo de água no solo. Possui uma seção retangular de 1,2 x 1,8 m e

15 m de profundidade, construído com estrutura metálica e suas paredes forradas com folhas de acrílico, para evitar o secamento do solo (ver anexo).

Em julho de 2018, como parte do projeto “Next Generation Ecosystem Experiments in the Tropics (NGEE-Tropics)”, o poço profundo foi reinstrumentado com sensores volumétricos de conteúdo de água CS655 (Campbell Scientific, Inc). O sensor CS655 é composto por 2 hastes de aço inoxidável com 12 cm de comprimento e 0,25 cm de diâmetro, que formam um sistema de transmissão aberta, opera em função do princípio de reflectometria no domínio do tempo, com base na permissividade dielétrica (K_a) do meio que envolve as hastes. O sensor produz uma onda eletromagnética que é refletida por uma das hastes e o tempo de deslocamento bidirecional da onda varia com a K_a , e essa variação está diretamente relacionada ao conteúdo de água no solo (Topp et al., 1980). A água é a principal contribuinte para a permissividade dielétrica do solo, de modo que o tempo de viagem da onda refletida aumenta com o aumento do teor de água e diminui com a diminuição do teor de água.

Antes da instalação, os sensores foram calibrados com amostras de solo de 8 camadas distintas, e desenvolvido um modelo de conteúdo de água no solo calibrado para a área em estudo, conforme descrito por Negrón-Juárez et al., (2020). A calibração mostrou que a equação universal de Topp (Topp et al., 1980) utilizada pelos sensores, subestima os valores do conteúdo de água no solo em até 42 %. Diante disso, os dados de conteúdo volumétrico de água no solo utilizados neste estudo foram determinados aplicando a equação polinomial de terceiro grau, obtida a partir da calibração dos sensores para o sítio experimental, e desenvolvida por Negrón-Juárez et al., (2020), e que é dada a seguir:

$$\theta_v = 0,0841 + 0,0564K_a - 0,002K_a^2 + 2,825 \times 10^{-5}K_a^3$$

Em que θ_v é o conteúdo volumétrico de água no solo e K_a a permissividade dielétrica.

No poço profundo os 8 sensores TDR CS655 foram instalados nas profundidades de 0,8; 1,6; 2,4; 3,2; 4,8; 6,4; 8,8; e 14,2 m. Para evitar efeito de borda da parede, os sensores foram tiveram suas hastes introduzidas à 1,5 m de profundidade da parede do poço (ver anexo

1). Para complementar e detalhar o monitoramento da camada superficial do solo foi instalado um segundo conjunto de sensores, posicionados em uma pequena trincheira de 0,60 m de profundidade, localizada ao lado do poço profundo. Nessa trincheira foram instalados 5 sensores TDR nas profundidades de 0,025; 0,05; 0,15; 0,30 e 0,50 m, que após instalação foram cobertos com o mesmo material do solo escavado da trincheira.

O monitoramento mantém-se ativo desde julho de 2018, com todos os sensores ligados a um datalogger CR1000x (Campbell Sci, INC) (ver anexo) e as medidas são realizadas com intervalos de 30 s com a determinação de médias a cada 15 min.

O estoque de água no solo (S) e o consumo de água via extração radicular foram estimados para todo o perfil (15m), e nas diferentes camadas, de modo a permitir a identificação das camadas que contribuem para a extração de água pelas raízes, e no controle da evapotranspiração. Para isso foi utilizado os métodos de estimativas de variação do estoque de água proposto por Libardi (2005).

O estoque de água para cada camada foi obtido por meio do cálculo de umidade média entre os sensores em dois níveis sucessivos (θ_a e θ_b) que compõe a camada, e pelo produto da umidade média ($\bar{\theta}$) com a espessura da camada (Δz) (Figura 2), conforme a seguinte equação:

$$S = \bar{\theta} \Delta z$$

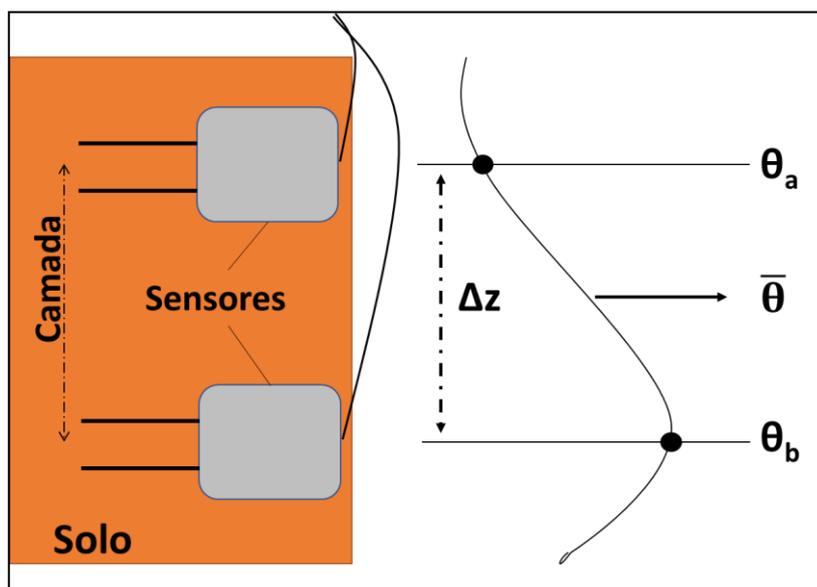


Figura 2. Esquema representando a integração da umidade do solo entre dois sensores instalados em um perfil de solo.

O estoque de água em todo o perfil foi determinado pela integração do estoque de água de todas as camadas, com os incrementos de profundidade e seu determinado conteúdo de água em cada incremento (Figura 3), sendo representado pela equação a seguir:

$$S \cong \sum_i^n \theta_i \Delta Z_i$$

Em que θ_i é o conteúdo de água no solo existente em dada camada de solo (i), ΔZ_i a espessura de uma dada camada do solo (i) e n o número de camada do solo.

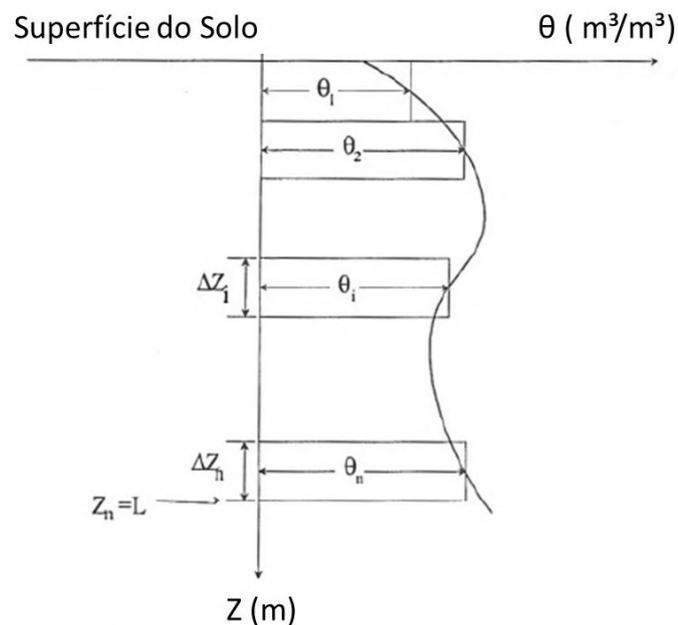


Figura 3. Perfil de ilustração do armazenamento de água no solo (Adaptado de Libardi, 2005)

Para a estimativa de extração de água pelas raízes foram utilizadas as variações do estoque de água no solo (ΔS) em cada camada, em um dado instante de tempo em dias sem ocorrência de precipitação, podendo ser de escala horária à escala de dias, conforme a equação a seguir:

$$\Delta S = S_f - S_i$$

Onde, S_f é o estoque de água em um tempo final e S_i é o estoque de água em um dado tempo inicial.

Para calcular a variação em todo o perfil do solo foram integrados os valores de variação do estoque de água em todas as camadas, conforme a equação a seguir:

$$\Delta S_{Total,t} = \sum_{i=1}^n \Delta S_{i,t}$$

Onde, $\Delta S_{Total,t}$ - é a variação do estoque de água no perfil no tempo t; $\Delta S_{i,t}$ - é a variação do estoque de água na camada i, no tempo t, e n é o número de camadas existentes no perfil de solo.

Para verificar a influência da variabilidade do estoque de água na evapotranspiração, foi avaliado o estoque de água apenas em períodos sem a ocorrência de precipitação. Assim foi possível considerar a inexistência dos demais componentes do balanço hídrico como: infiltração, escoamento lateral, ascensão capilar e precipitação incidente na superfície do solo. Considerou-se, assim, a variação do estoque de água no solo é decorrente apenas das perdas por transpiração (Bruno et al., 2006). Após forte eventos de precipitação considerou-se apenas as medidas realizadas após 3 dias do evento de chuva para evitar efeitos da infiltração e drenagem interna entre as camadas do solo.

3.4. Determinação da evapotranspiração

Para determinação da evapotranspiração real foi utilizada a técnica de medida de fluxos por covariância de vórtices turbulentos (eddy covariance), no qual dados de concentração de vapor d'água (H_2O) estão em covariância com as componentes de vento (u , v , w). As componentes do vento foram medidas através de um anemômetro ultrassônico de três eixos (Figura 4) da Solent 1012R2 (Gill Instruments, UK), instalado no topo da torre K34 (54 m), com medidas obtidas a uma frequência de 10 Hz (10 leituras a cada 1 s). A concentração de H_2O foi medida por um analisador de gases infravermelho LI-6262 (LI-COR, USA), com tempo de resposta de 0,1 s. A entrada de ar do analisador fica a 20 cm de distância do anemômetro, assim ambas as medidas foram obtidas no mesmo nível e em correlação. Os dados brutos armazenados foram processados usando o software EDDYWSC para determinar os fluxos turbulentos de calor latente (LE) e calor sensível (H), suas médias e variâncias a cada instante, com a devida aplicação das correções necessárias. Nas análises realizadas foram utilizadas as médias dos valores de LE (fluxo de calor latente) a cada 30 min. Mais detalhes sobre a metodologia de “Eddy Covariance” são encontradas em Araújo et al., (2002).

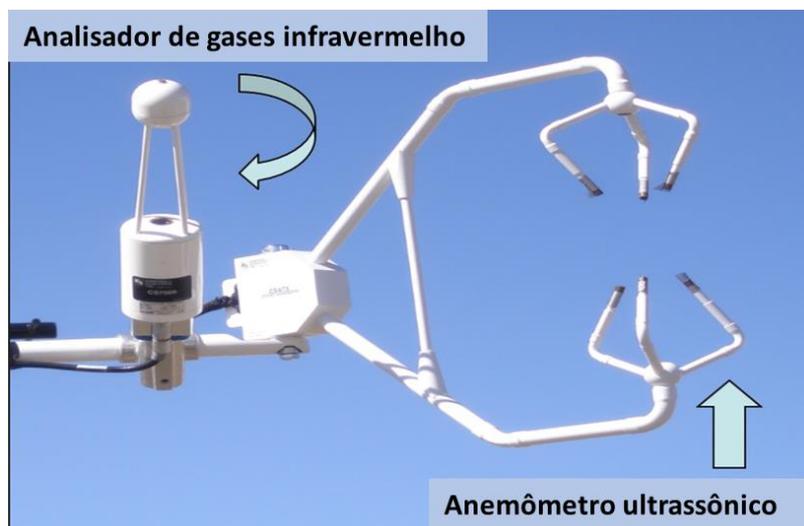


Figura 4. Analisador de gases e anemômetro ultrassônico que compõe o sistema de “eddy covariance”.

3.5. Medidas de fluxo de seiva e determinação da transpiração

Para determinação da transpiração foi utilizada a mesma área da parcela experimental do projeto Goamazon (Understanding the Response of Photosynthetic Metabolism in Tropical Forests to Seasonal Climate Variations), situada ao lado do poço profundo. Esta parcela experimental monitora 21 árvores de diferentes espécies e estrutura vertical, contendo indivíduos emergentes, de subdossel e sub-bosque, e é uma área representativa da escala de comunidade. Os dados utilizados neste estudo foram de 16 árvores monitoradas de fevereiro até setembro de 2019.

- **Seleção de indivíduos e instalação dos sensores “Sapflow”**

Para instalação dos sensores “Sapflow” foi delimitada uma parcela florestal de 30 m x 30m, onde foram escolhidas todas as árvores com diâmetro maior que 10 cm, a partir de medidas do diâmetro à altura do peito (DAP), e então determinadas as alturas das copas. As árvores selecionadas foram inventariadas e identificadas, pois as mesmas se encontram dentro de uma parcela pertencente ao Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA). Para mais detalhes ver tabela no anexo 2.

Nas árvores selecionadas foram instalados sensores do tipo sonda de dissipação de calor (Sapflow), modelo SC-G da marca ECOMATIK (anexo 3). Estes sensores seguem os princípios proposto por Granier (1985), constituído por duas agulhas de 33 mm de comprimento e 1,5 mm de diâmetro, ambas revestidas por fios de termopares. As agulhas foram inseridas perpendicularmente na mesma linha axial nos troncos das árvores, no sentido vertical, com uma distância de 10 a 15 cm entre elas (Figura 5). O aparato instrumental funciona com a agulha superior sendo aquecida constantemente a uma potência elétrica de 0,3 W, enquanto a agulha inferior é utilizada como referência, para auxiliar na correção do valor da diferença de temperatura, devido às plantas possuir gradiente de temperatura em condições naturais em torno de 1,5 °C.

Os sensores de fluxo de seiva (sapflow) foram instalados a 120 cm (altura do peito), e na inserção foram utilizadas brocas com mesmo diâmetro das sondas. Logo após foi introduzido plasticina para evitar que água escoada pelo tronco entre em contato com a agulha

e que a planta expulse a agulha. Para evitar influência da incidência de radiação solar e proteger da água da chuva os sensores foram instalados no sentido norte-sul e cobertos com uma manta térmica. Os sensores foram ligados a um registrador de dados, modelo CR800, com multiplexador AM16/32a (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA). A saída de tensão dos termopares foi lida a cada 40s e determinado médias a cada 2 minutos.

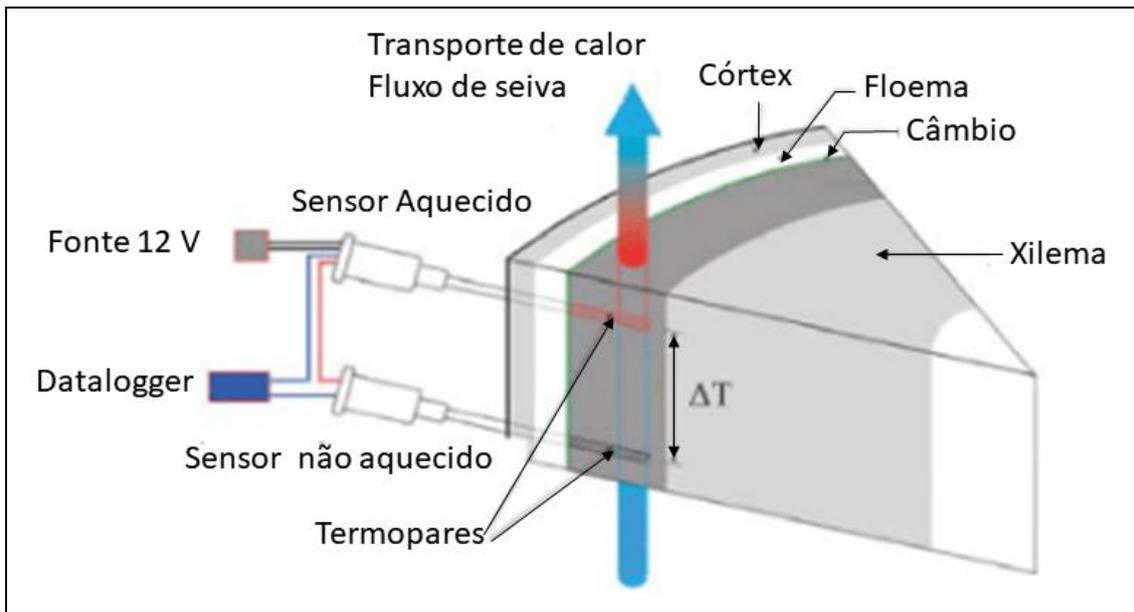


Figura 5. Esquema do funcionamento do sensor de fluxo, adaptado de Pimentel (2010).

- **Determinação do fluxo de seiva**

Para estimar o fluxo de seiva primeiro foi determinada a densidade do fluxo de seiva (J_s) obtida a partir da saída de tensão (mV) usando a relação padrão de Granier (Granier, 1987), dada pela seguinte equação:

$$J_s = 3600 \times 0,0199 \times \left[\frac{\Delta V - \Delta V_{ref}}{\Delta V} \right]^{1,231} \text{ (g/cm}^2\text{/h)}$$

Em que ΔV (mV) é a diferença de tensão medida entre as duas sondas e ΔV_{ref} a diferença de tensão de referência medida em um tempo de fluxo zero, registrado durante a noite.

A variação da diferença de temperatura entre a sonda aquecida e a sonda de referência, em cada instante, é determinada pelo transporte convectivo de calor através da seiva. Assim, a

máxima diferença entre as duas sondas indica que o fluxo de seiva é mínimo ou nulo, enquanto a mínima diferença indica uma taxa máxima de fluxo de seiva, na área onde ocorre o transporte de calor (Granier, 1987).

O fluxo de seiva (FS) foi então determinado pelo produto da densidade de fluxo de seiva (J_s) com a área do xilema ativo (A_x), representado pela seguinte expressão:

$$FS = J_s \times A_x$$

- **Determinação da área do xilema ativo**

Devido à ausência de medidas da área do xilema ativo (A_x) para os indivíduos analisados, foi utilizada uma relação alométrica estabelecida entre A_x e o diâmetro do tronco a altura do peito (DAP), proposta por Kunert et al., (2017) e posteriormente validada por Aparecido et al., (2019). Estes trabalhos demonstram uma forte relação positiva entre A_x e DAP. Esta relação foi verificada nas árvores de uma parcela experimental situada a 400 metros da área onde foram obtidas as medidas de fluxo de seiva utilizadas no presente estudo, e que apresenta composição florística similar, com sobreposições de algumas espécies. Assim, foi utilizado a equação alométrica para A_x definida pela seguinte expressão:

$$A_x = 0.823 \times DAP^{1.781}$$

- **Determinação da Transpiração para a floresta.**

Para estimar a transpiração do ecossistema de floresta foram utilizados os dados de inventário de uma parcela de 1 ha, estabelecida no Programa de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia – LBA, onde está inserida a subparcela das árvores monitoradas neste estudo. Nesta parcela foram inventariadas todas as árvores com diâmetro a altura do peito (DAP) maior que 10 cm, totalizando 631 indivíduos. As árvores foram categorizadas de acordo com diâmetro, levando em conta que nesta área existe uma forte relação entre a altura e o diâmetro (Higuchi et al., 1998). Assim os indivíduos arbóreos foram classificados de acordo com o proposto por Kunert et al., (2017), consistindo em três classes: sub-bosque (10-

19.9 cm), subdossel (20-29.9 cm) e dossel emergente (>30 cm). A estimativa da área do xilema ativo (A_x) para todas as árvores e a área total do xilema ativo nas três classes de vegetação é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo das características da parcela do inventário para 1 Hectare.

Classes	DAP (cm)	árvores/ha	Distribuição (%)	A_x (m ² /há)
Sub-bosque	10-19,9	406	64,3%	2,97
Subdossel	20-29,9	121	19,2%	3,72
Emergentes	>30	104	16,5%	7,93
Total		631	100%	14,62

Para estimar a transpiração (T) das diferentes classes de vegetação foram obtidas as médias de fluxo de seiva (Fs) para cada classe, e aplicadas as respectivas proporções de área de A_x , conforme a seguinte expressão:

$$T_{classe} = \frac{J_{Sm} A_{x_{classe}}}{A_{plot}}$$

Onde T_{classe} é a transpiração para cada classe em mm, J_{Sm} é a densidade média do fluxo de seiva para cada classe (em g/l); $A_{x_{classe}}$ é a área de xilema ativo de cada classe (em m²) e A_{plot} é a área total da parcela inventariada (em m²), que nesse estudo equivale a 10000 m². A transpiração do ecossistema de floresta da área do platô foi determinada utilizando o somatório de todas as classes.

4. RESULTADOS

4.1. Precipitação

A precipitação observada na área de estudo durante os anos de 2018 e 2019 apresentou grande variabilidade na escala diária (Figura 6A), sazonal e entre os anos, particularmente em 2019 (Figura 6B). Em 2018 o total anual de precipitação foi de 2428 mm, enquanto para 2019 foi de 2603 mm. Em 2018 os meses de junho (107 mm) e setembro (103 mm) foram os mais secos, enquanto em 2019 foram os meses de junho (112 mm) e novembro (118 mm). Os meses mais chuvosos de 2018 foram janeiro (324 mm) e dezembro (366 mm), e em 2019 os maiores totais mensais de precipitação ocorreram em janeiro (368 mm) e maio (354 mm). Ambos os anos apresentaram diferenças na distribuição sazonal da precipitação em relação da média climatológica, mas em 2019 as chuvas no período seco foram muito acima do esperado (Figura 6B).

O ano 2019 foi bastante chuvoso na área de estudo e apresentou forte variabilidade da precipitação na escala sazonal e intrasazonal. Os meses de fevereiro (138 mm) e março (172 mm) registram total de precipitação menor em relação a climatologia, enquanto o mês de setembro (300 mm), considerado o mais seco climatologicamente, apresentou um quantitativo mensal de precipitação bastante expressivo (Figura 6B). Isso resultou do elevado número de eventos intensos de totais diários de precipitação (maiores que 30 mm) ocorridos durante a estação chuvosa de 2019, e que foram também frequentes durante a estação seca, com registro de dois eventos extremos de precipitação (maior que 50 mm) (Figura 6A).

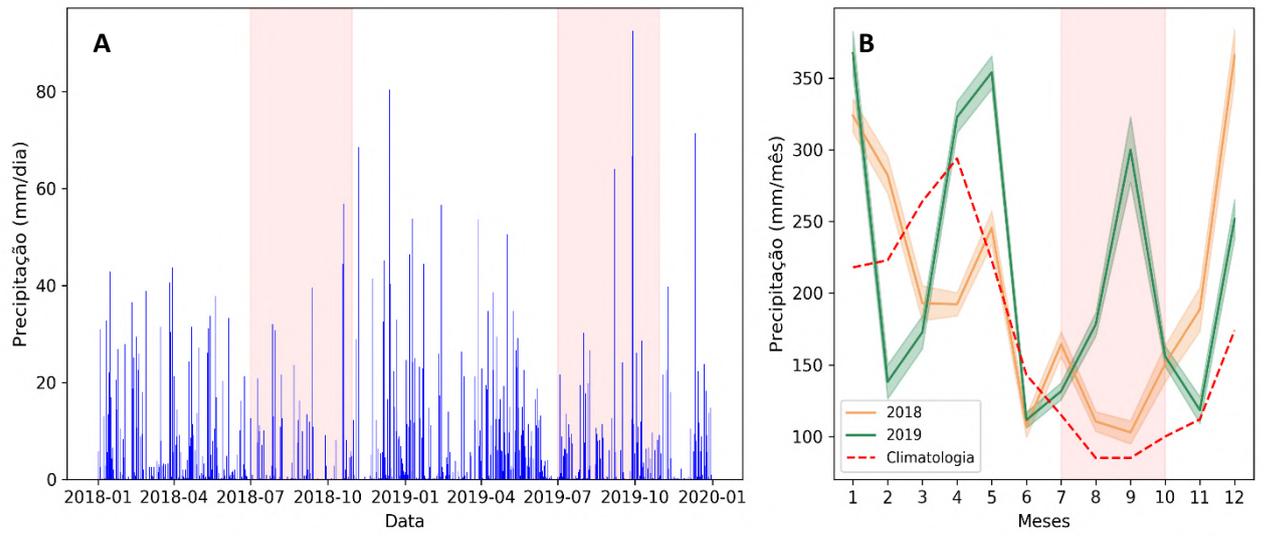


Figura 6. Precipitação total diária para o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2019 (A) e precipitação total mensal para os anos de 2018, 2019 e precipitação total mensal média obtida com os dados de 2001 a 2019(B).

4.2. Distribuição espaço temporal do conteúdo de água no solo

A variabilidade espaço-temporal do conteúdo de água no solo é mostrada na Figura 7. na qual se verifica que as camadas até 3 metros são as de maior declínio de umidade, com um ciclo diário bem definido, além de apresentarem rápida resposta aos eventos de precipitação.

As camadas de 3 a 6 metros apresentam, de maneira geral, um umedecimento mais lento e gradual com a profundidade. A partir do início do período chuvoso, entretanto, essas camadas começam a umedecer mais rapidamente, recarregando assim os 6 primeiros metros. As chuvas mais intensas (>40mm) são as principais responsáveis por essa recarga e quando ocorrem, levam a uma percolação de 6 metros de profundidade em até 24 horas.

Evidenciou-se que a recarga nas camadas de 8 a 15 metros só ocorre após as camadas superiores atingirem sua capacidade de campo. A camada a 9 metros apresenta baixa retenção de água mesmo estando entre 2 camadas com bastante teor de água. As camadas em 0,80 m, 3,20 m, 6,40 m e 14,30 m são as que apresentam maiores retenção de água, mantendo-se úmidas mesmo no período seco.

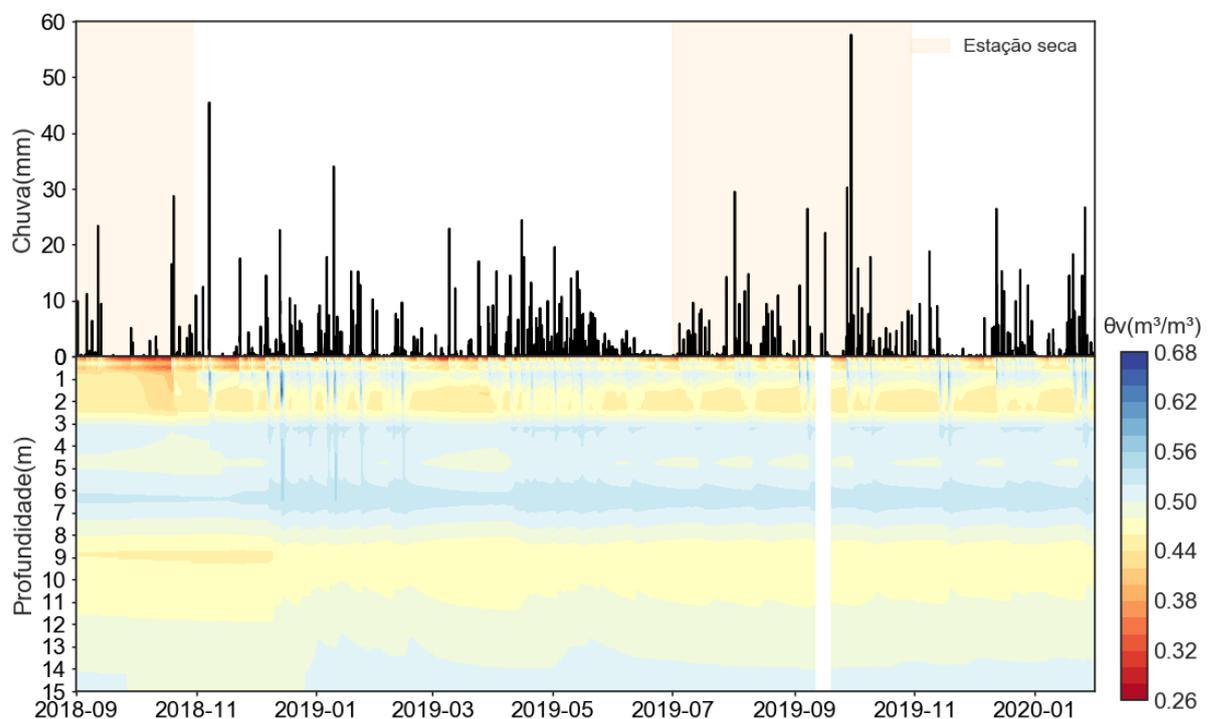


Figura 7. Precipitação e distribuição espaço temporal do conteúdo de água no solo de novembro de 2018 a janeiro de 2020

A condição da umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação mostrou-se um importante componente para redistribuição da água no solo e o recarregamento das camadas mais profundas, conforme demonstrado nas Figuras 8A e 8B. Para melhor análise desse efeito, a variabilidade do conteúdo de água no solo foi avaliada em resposta a dois eventos de precipitação, com intensidades aproximadamente similares, diferenciando apenas no estado de umidade do solo antecedente aos eventos.

Considerando uma condição antecedente em que o solo apresentou menor umidade (Figura 8 A), apenas as camadas mais superficiais responderam aos eventos de forma instantânea, chegando a influenciar até a camada de 2,40 m, após 2 dias da ocorrência do evento. Em uma condição antecedente em que o solo estava úmido (Figura 8B), a resposta ao evento foi mais rápida e afetou os perfis de umidade do solo, ocorrendo respostas instantâneas até a camada de 6,40 m. Após 2 dias da ocorrência do evento de precipitação verificou-se variações do conteúdo de água no solo até a camada de 14,30 m.

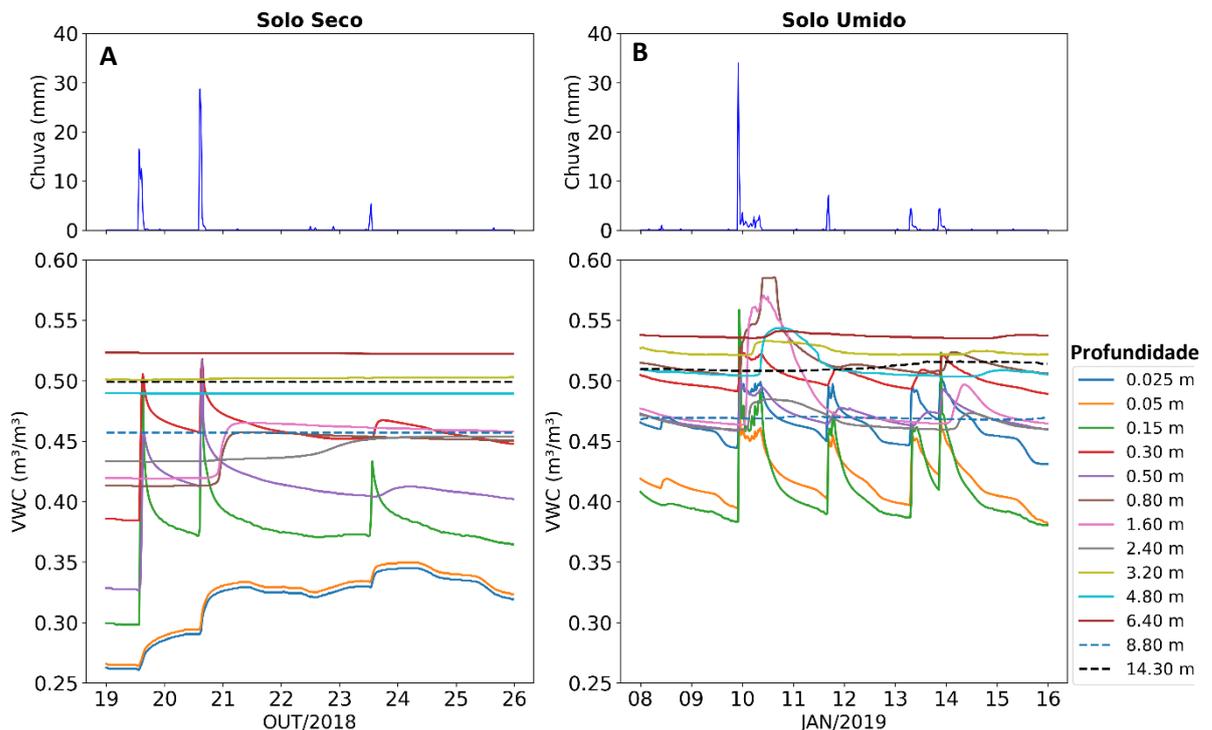


Figura 8. Variação do conteúdo de água no solo em resposta a fortes eventos de precipitação em um estado antecedente de solo seco (A) e em um estado antecedente de solo úmido (B).

O conteúdo de água no solo na camada mais profunda (figura 9B) apresentou variação temporal bastante lenta e uma baixa amplitude. Durante o período analisado (set/2019 a jan/2020) foi possível observar um forte efeito oscilatório do conteúdo de água profundo em relação à variabilidade da precipitação. Em 2018, na transição do período seco para o chuvoso (novembro e dezembro), mesmo com início dos eventos de precipitação, essa camada continuou decaindo até início de janeiro de 2019, quando começou a ser recarregada e aderiu uma pequena sensibilidade aos eventos de precipitação.

Em março de 2019 é possível ver a contribuição do conteúdo de água do solo desta camada para o lençol freático, quando a maior frequência e intensidade dos eventos de precipitação entre janeiro e março de 2019 ocasionou um aumento considerável no estoque de água profundo que contribuiu para o fluxo de recarga subterrânea e aumento do nível de água no lençol freático (figura 9 C). Em virtude do maior acumulado de precipitação nesse ano, é possível observar, na transição do período seco para o chuvoso (2019/2020), que as camadas até 8 metros estão mais úmidas em relação a estação anterior (figura 7). Isso facilitou o umedecimento da camada a 15 metros, que teve seu recarregamento antecipado em 2 meses (para início de novembro), em relação ao mesmo período no ano anterior.

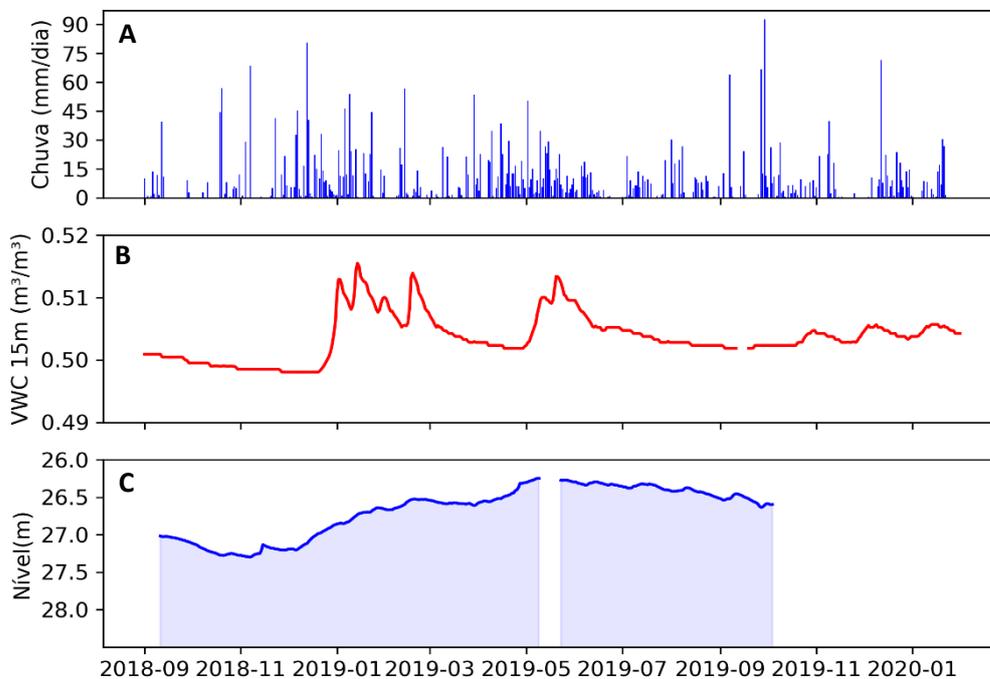


Figura 9. Precipitação (A), conteúdo de água no solo (B) e nível do lençol freático (C) entre setembro de 2018 a janeiro de 2020. Dados de nível do lençol freático foram cedidos pela Coordenação de Pesquisas Hidrológicas do projeto LBA([LBA Fase 2 - CPH - Coordenação de Pesquisas Hidrológicas \(inpa.gov.br\)](http://lba.fase2.cph.inpa.gov.br))

Durante as análises do balanço de água no solo em dias com exclusão de precipitação, foram observadas evidências de umedecimento nas camadas mais superficiais (até 80 cm), conforme exemplo mostrado na Figura 10C. As análises demonstram que a maioria dos casos ocorreu após alguns dias sem precipitação, com ocorrência noturna e entre 4 a 7 horas da manhã (horário local), mesma hora em que ocorre o pico de umidade relativa do ar (figura 10B). Desta forma, esse umedecimento pode está relacionado à formação de neblina que ocorre nesse mesmo horário (observação visual).

Foi observado o mesmo comportamento entre o final da tarde e início da noite (18 a 20, hora local), no mesmo instante que ocorre queda no déficit de pressão de vapor, e a evapotranspiração cessa (figura 10 A). Esse umedecimento ocorre com mais frequência nas profundidades entre 2,5 e 5 cm, mas ocorreu também em camadas abaixo dessas profundidades, em alguns casos.

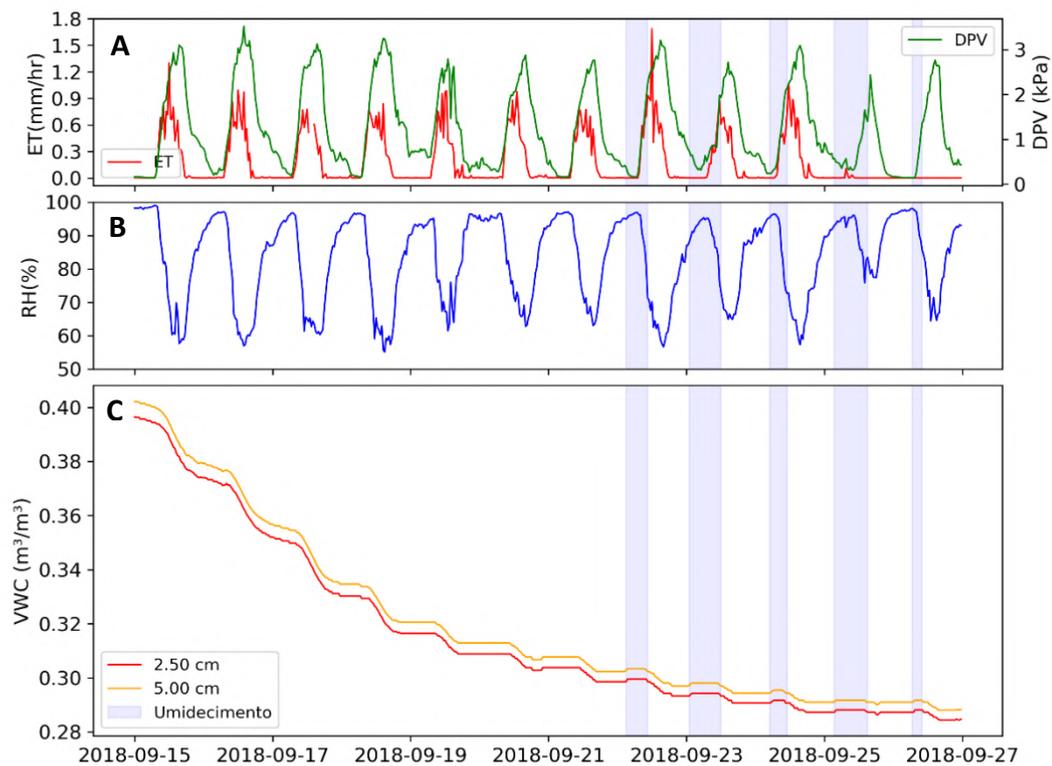


Figura 10. Evapotranspiração e déficit de pressão de vapor (A), umidade relativa do ar (B) e conteúdo de água no solo (B), em um período sem ocorrência de chuva, com evidências de umedecimento das camadas superficiais.

4.3. Evapotranspiração e a extração de água pelas raízes.

A estimativa de extração de água pelas raízes usando o balanço de água no solo após 3 dias de ausência de precipitação, apresentaram uma correlação muito forte com a evapotranspiração medida por “Eddy Covariance” (figura 11), sugerindo assim que o método é bastante eficaz para analisar a dinâmica da extração de água pelas raízes. As extrações de água determinadas pelo método do balanço de água variaram de 1,74 a 6,12 mm/dia, enquanto a evapotranspiração determinada pelo EC variou de 1,76 a 6,20 mm/dia. As maiores taxas demandaram o incremento de extração em camadas profundas, onde foi possível verificar extração de água alcançando 8,80 metros de profundidade.

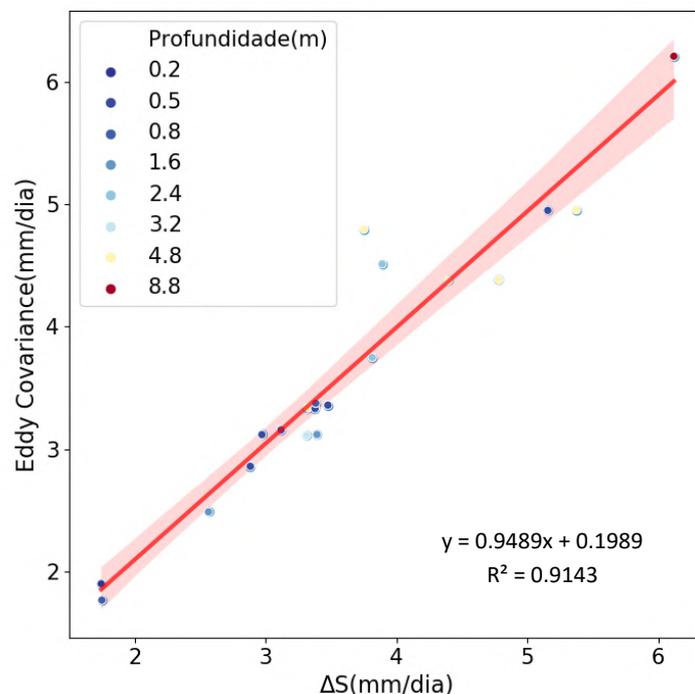


Figura 11. Correlação entre evapotranspiração estimada pelo método de Covariância de Vórtices Turbulentos (Eddy Covariance) e extração de água pelas raízes estimada pelo balanço de água no solo em um perfil de 15 m (ΔS) para dias com ausência de precipitação. A linha contínua vermelha representa uma relação 1:1, a faixa vermelha o intervalo de confiança, a escala de cor indica a profundidade máxima que ocorreu extração de água pelas raízes.

A extração de água nas camadas profundas mostrou estar relacionada com alto déficit de pressão de vapor, que impulsionou as perdas de água por evapotranspiração e pela redução da água disponível na camada do primeiro metro do solo, durante períodos secos (Figura 12). A água disponível para o primeiro metro (figura. 12D) apresentou uma média de 19,5%, com

máximo de 24 % e mínimo de 0,15 %, onde é possível observar um rápido decaimento na disponibilidade de água após ausência de precipitação durante a estação seca de 2018.

As taxas de extração de água que atingiram as maiores profundidades foram observadas após 5 dias de ausência de precipitação. Também foram identificadas taxas extração nas camadas profundas período chuvoso. Por exemplo, entre os dias 3 e 8 de março de 2019, após alguns dias sem ocorrência de precipitação, foi verificado extração de água no solo a cerca de 4,8 metros de profundidade (figura 12A). A busca pela água disponível em solos profundos foi relacionada com a frequência e duração de períodos sem eventos de precipitação

No período seco de 2018, o maior período com ausência de precipitação ocorreu entre 12 a 23 de setembro. Nesse mesmo período a disponibilidade de água no solo para o primeiro metro chegou a quase zero (figura 12D), ocasião em que foi possível perceber que a medida que a disponibilidade no primeiro metro decrescia, as extrações pelas raízes ocorriam em camadas cada vez mais profundas. No período seco de 2019, não foi possível avaliar esse mesmo padrão, devido a ocorrência de apenas um único caso com ausência de precipitação maior que 3 dias.

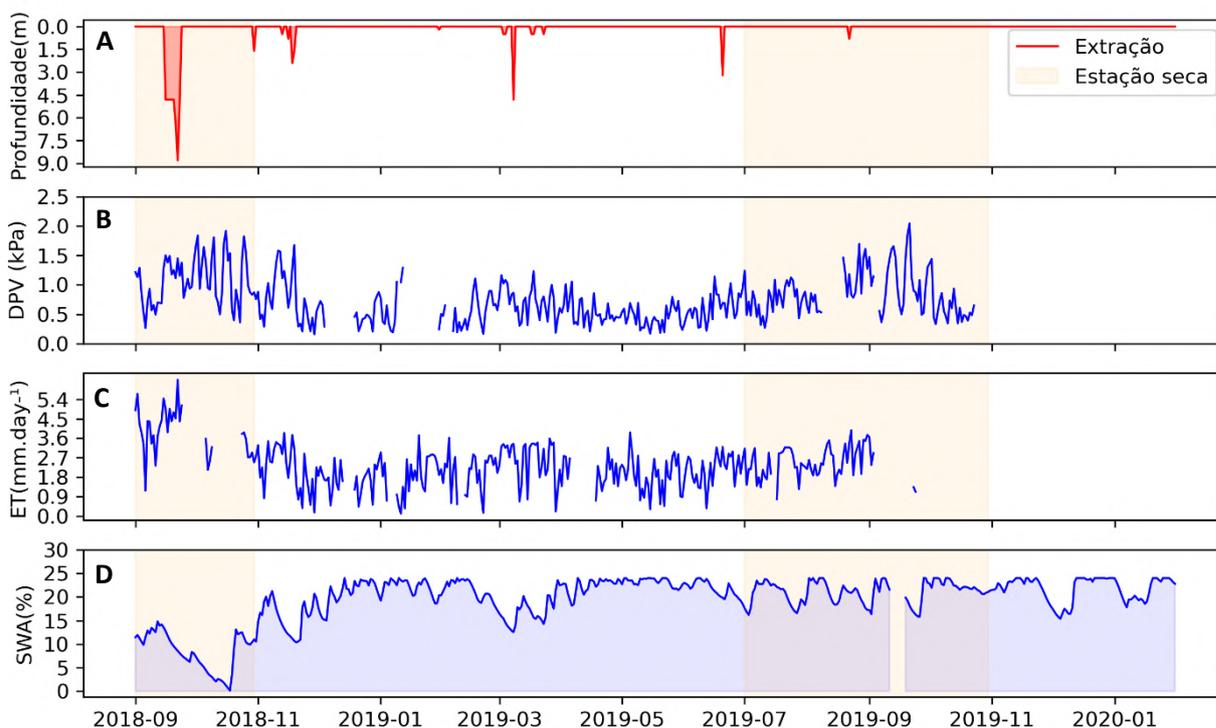


Figura 12. Profundidade de acesso das raízes para extração de água no solo (A), média diária de déficit de pressão de vapor (B), evapotranspiração (C) e disponibilidade de água no solo para o primeiro metro do solo (D).

4.4. Taxas de uso de água e variação sazonal

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios diários, com respectivos desvios padrões, e máximos diários das taxas de consumo de água das espécies arbóreas monitoradas, considerando o período chuvoso e seco. É possível verificar que a maior taxa de consumo de água foi observada para a espécie *Parkia velutina*, com valor médio de $107,82 \pm 40,5$ L/dia, e valor máximo de 169,70 L/dia, sendo que esta espécie foi monitorada apenas no período chuvoso. A menor taxa de consumo de água, por sua vez, foi observada na espécie *Swartzia panacoco*, com valor médio de $0,39 \pm 0,9$ L/dia e valor máximo de 5,76 L/dia para o período chuvoso. No período seco houve um acréscimo na média, que apresentou valor de $2,87 \pm 1,2$ L/dia e redução na taxa máxima, com 5,41 L/dia.

Assim foi encontrada uma ampla gama de taxas médias de consumo de água, sendo que as maiores taxas foram observadas nas espécies de maior porte. A variação sazonal do consumo de água mostrou-se bastante variada, com 10 indivíduos reduzindo o uso de água no período seco, dentre eles, o destaque é para as espécies *Pouteria oblanceolata* e *Andira surinamensis*. Algumas dessas espécies, mesmo reduzindo o consumo de água, apresentaram taxas máximas elevadas no período seco. Entre as 5 espécies que apresentaram aumento no consumo de água no período seco, a *Swartzia panacoco* apresentou taxa máxima similar à observada no período chuvoso.

A variação do consumo de água entre estações apresentou uma relação bastante específica com as espécies, mostrando-se bastante diversificada e com padrões distintos, que não estão atribuídos somente às classes de árvores baseadas no diâmetro a altura do peito (DAP) e na exposição da copa.

Tabela 2. Consumo de água médio (com desvio padrão) e máximo de 16 espécies de árvores monitoradas durante a estação chuvosa e seca de 2019.

Indivíduos	Classe	Chuvoso		Seco	
		Méd(L/dia)	Máx(L/dia)	Méd(L/dia)	Máx(L/dia)
<i>Eugenia citrifolia</i>	Subdossel	26.39 ±10.9	47.22	24.47±9.5	59.16
<i>Buchenavia parvifolia</i>	Sub-bosque	9.72 ±3.8	16.89	8.08±4.9	23.07
<i>Pouteria oblanceolata</i>	Subdossel	4.52 ±1.6	6.51	3.94±1.7	6.13
<i>Anomalocalyx uleanus</i>	Emergente	16.09 ±9.6	27.92	20.26±7.1	28.03
<i>Mouriri nigra</i>	Subdossel	3.76±1.4	5.51	5.61±2.2	8.42
<i>Pouteria oblanceolata</i>	Sub-bosque	11.81±5.9	23.82	2.60±0.9	3.78
<i>Andira surinamensis</i>	Emergente	12.20±1.9	14.42	6.80±2.8	10.01
<i>Pourouma velutina</i>	Subdossel	17.31±5.9	25.22	15.82±4.5	22.45
<i>Eschweilera sp.</i>	Subdossel	2.30±0.8	3.28	2.45±1.1	4.74
<i>Eschweilera rosea</i>	Emergente	9.74±3.5	15.41	8.93±2.9	13.47
<i>Swartzia panacoco</i>	Sub-bosque	0.39±0.9	5.76	2.87±1.2	5.41
<i>Pouteria sp.</i>	Subdossel	4.53±1.4	6.50	2.99±1.9	6.35
<i>Scleronema micranthum</i>	Emergente	22.00±6.8	30.92	11.57±6.8	25.46
<i>Parkia velutina</i>	Emergente	107.82±40.5	169.70	**	**
<i>Pourouma villosa</i>	Subdossel	12.29±6.6	20.98	12.39±3.7	23.66
<i>Eschweilera cyathiformis</i>	Sub-bosque	8.65±3.4	13.75	6.60±2.6	12.41

**sem dados ↑ aumento ↓ redução

Na Figura 13 são apresentados os ciclos diários médios das taxas de transpiração determinadas para a estação seca e chuvosa de 2019, de todas as espécies arbóreas monitoradas, em comparação com as equivalentes medidas de evapotranspiração (ET) obtidas através do sistema de “Eddy Covariance” (EC). As taxas máximas horárias de transpiração variaram de 0,1 mm/h a 1,4 mm/h, enquanto as taxas máximas do EC variaram de 0,2 mm/h a 0,60 mm/h. Essas diferenças resultam do fato que o sistema EC integra as contribuições de diferentes áreas da comunidade arbórea, e que não permite identificar os diferentes padrões de ciclo diário de transpiração, e suas distintas magnitudes observadas individualmente em cada espécie de árvore. Ou seja, as medidas usando as duas técnicas são complementares e essenciais para o melhor entendimento da resiliência do ecossistema de floresta tropical à variabilidade da precipitação e umidade do solo.

O ciclo de diurno da transpiração mostrou ser diversificado e específico das espécies, com variação na amplitude diária, nos horários de início e fim, e nos picos máximos, que muda também entre estação seca e chuvosa. As medidas de ET (pela técnica de EC) integra a contribuição da transpiração de diferentes áreas do ecossistema, dependendo da direção e velocidade do escoamento, em um raio de aproximadamente 1 km. Estas medidas incluem também evaporação das superfícies (solo, galhos e folhas). As medidas de ET pela técnica de EC (Figura 13P) mostra um ciclo diário com valores levemente maiores no período seco, que no chuvoso, mas com variabilidades diárias similares nos períodos seco e chuvoso. Na

comparação com as taxas de transpiração determinadas em escala de árvore a variabilidade diária nas estações, é equiparável, porém menores que as medidas de ET por EC. As taxas de transpiração em escala de árvore são influenciadas pelo número amostral de espécies e suas características distintas quanto às perdas por transpiração. Essa análise mostra que a transpiração no nível de ecossistema é influenciada pela contribuição das diferentes espécies de árvores, do ambiente a que pertencem, e como estas se comportam quanto à perda por transpiração ao longo do ciclo sazonal. No período seco, as árvores que aumentam a sua perda por transpiração possuem maior contribuição para a ET e compensam a redução da transpiração das árvores que apresentam maior sensibilidade a redução do conteúdo de água no solo.

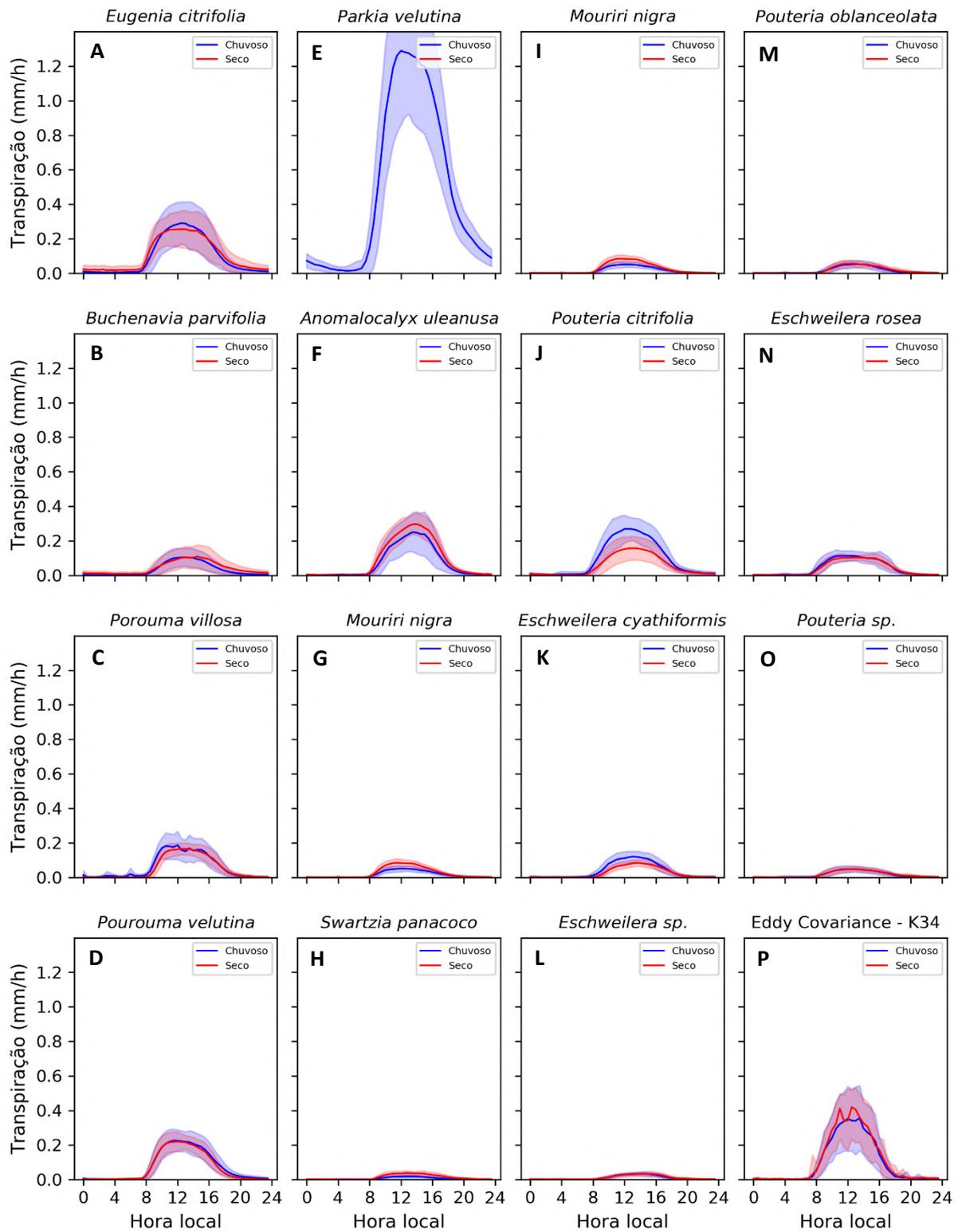


Figura 13. Ciclo diurno médio da Taxa de transpiração por indivíduos para o período chuvoso (fevereiro, março, abril) e seco (julho, agosto, setembro) no ano de 2019 e ciclo diurno médio da evapotranspiração obtido pelo Eddy Covariance. O sombreamento nas linhas indica o desvio padrão.

4.5. Partição da Evapotranspiração

Devido à falta de dados de fluxo de seiva (FS) e evapotranspiração (ET) pelo método de Eddy Covariance (EC) para fechar um balanço anual, a partição da ET foi realizado no período de fevereiro a agosto de 2019, conforme descrito na figura 14, onde os meses de fevereiro, março e abril representaram a condição do período chuvoso e os meses julho e agosto representaram a condição do período seco, durante 2019.

No período de fevereiro a agosto de 2019, a taxa diária média de transpiração do ecossistema foi em média de $1,91 \pm 0,80$ mm/dia, com mínimo de 0,28 mm/dia e máxima de 4,51 mm/dia. Para as emergentes a média foi de $0,90 \pm 0,37$ mm/dia, com mínimo 0,15 mm/dia e máxima de 1,92 mm/dia, para as de subdossel $0,54 \pm 0,40$ mm/dia, com mínimo de 0,05 mm/dia e máxima de 1,89 mm/dia, e para sub-bosque a média foi $0,37 \pm 0,18$ mm/dia, com mínimo de 0,025 mm/dia e máxima de 0,97 mm/dia.

O acumulado de precipitação para esse período foi de 1409 mm, o mês mais chuvoso foi maio (354 mm) e o menos chuvoso foi junho (112 mm). A ET acumulada no período foi de 476 mm (35% da precipitação), com maiores taxas de ET em períodos com baixa frequência de precipitação. A transpiração em nível de ecossistema (T_{estande}) obtida pela integração das medidas de FS mostrou taxas com um acumulado de 415 mm (30% da precipitação), a precipitação interceptada obtida por uma simples subtração no balanço da ET apresentou um acumulado de 60,6 mm (5% da precipitação e 13% da ET). Nos 3 níveis de vegetação classificados, as árvores de dossel emergentes tiveram a maior contribuição, contribuindo aproximadamente com 14 % (203 mm) da precipitação, seguido por subdossel com 9 % (128 mm) e sub-bosque com 6% (84 mm), porém no período seco as árvores emergente apresentaram declínio na transpiração, enquanto as de sub-bosque e, principalmente subdossel, apresentaram um aumento na taxa de transpiração durante o período seco, compensando assim o decaimento na taxa de transpiração das emergentes e mantendo a ET alta no período seco (ver Figuras 14 e 15) .

O conteúdo médio de água no solo para até 1 m de profundidade, durante do período seco, apresentou diminuição à medida que a precipitação foi reduzindo e as perdas por ET

aumentaram, com o menor conteúdo de água no solo observado durante o mês de março ($0,40 \text{ m}^3/\text{m}^3$), que está relacionado a um longo período de ausência de precipitação ocorrido no mês de março conforme abordado na seção anterior, onde prolongados períodos com ausência de precipitação ocasionam rápido decaimento do conteúdo de água nas camadas superficiais mesmo no período chuvoso. Durante o período seco, o conteúdo de água no solo apresentou rápido declínio, porém mesmo com um acumulado de precipitação menor, não apresentou declínio tão acentuado quanto o mês de março, que está relacionado ao fato de neste período mesmo com menor acumulado, os eventos tiveram menor intensidade, porém uma maior frequência durante esse período.

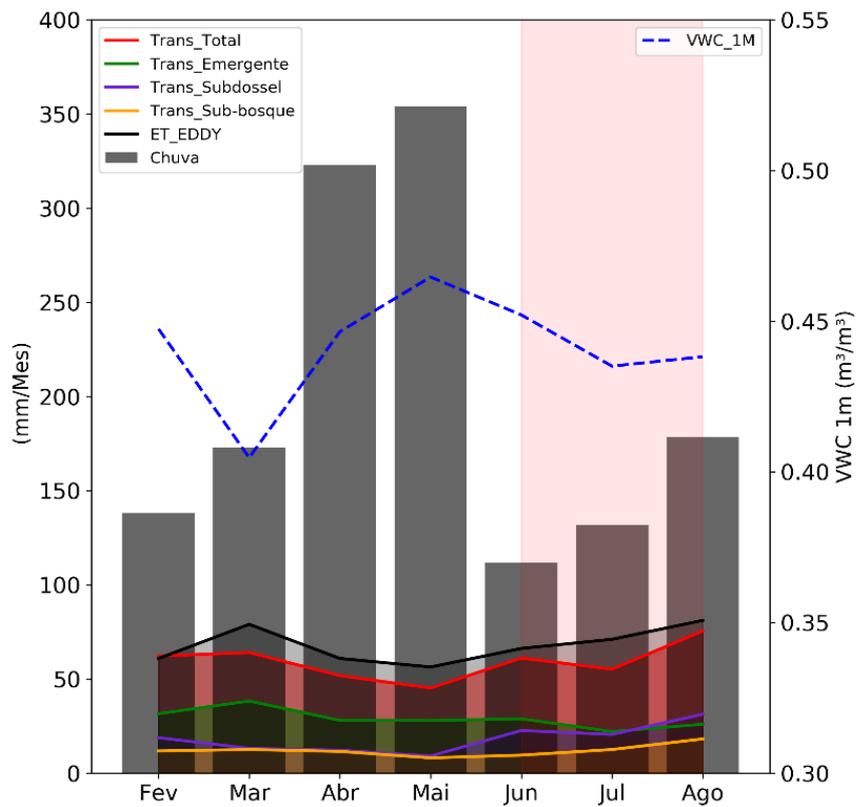


Figura 14. Balanço mensal de precipitação, evapotranspiração, transpiração total e transpiração em classes entre os meses de fevereiro e agosto de 2019.

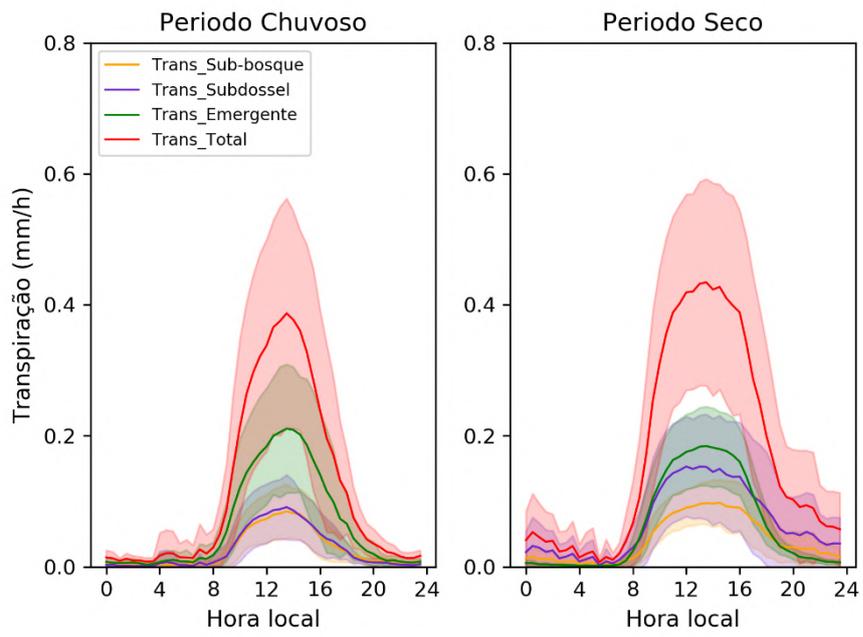


Figura 15. Ciclo diurno médio para período chuvoso e seco durante o particionamento da evapotranspiração.

5. DISCUSSÃO

5.1. Dinâmica de água no solo

A dinâmica de água no solo mostrou ser bastante diversificada, com variações temporal e vertical estando relacionada com a intensidade e frequência dos eventos de precipitação, drenagem e extração de água pelas raízes. As variações na dinâmica de água no solo também estão relacionadas aos processos de infiltração e retenção de água no solo, que dependem das características do solo como: físico-química, granulometria e textura, além das condições antecedentes do solo no momento de ocorrência dos eventos de precipitação, podendo influenciar no modo como a água se distribui no solo.

Assim a água no solo se concentra de acordo com a textura e as características físicas do solo, como a porosidade e a estrutura das partículas do solo. Broedel et al (2017) estudaram a dinâmica de água do solo no mesmo perfil em estudo, nas seguintes profundidades 0,80, 1,60, 2,40, 3,20, 4,80, 6,40, 8,80, 11,20 e 14,30 m. Os maiores valores de porosidade total foram registrados nas profundidades 0,80 e 1,60 m, acima de 58%, e o mais baixo foi registrado na profundidade 14,30 m (47,38 %). O presente estudo corrobora com Broedel et al (2017), onde também se observou a maior variação de umidade nas camadas de até 2,5 m, mostrando rápida reposta à precipitação e rápido decaimento no conteúdo de água no solo, principalmente para o primeiro metro, sendo justificado pelo fato desta camada conter 70% da biomassa de raízes de acordo com Chauvel et al (1992), também maior biomassa microbiana (Chauvel et al. 1987) e maior fração de macroporos (Tomasella & Hodnett, 1996). Assim as maiores variações são observadas a 1m em todas as estações, o mesmo foi observado por Broedel et al (2017) no mesmo local do presente estudo e Ferreira et al (2007) em um local próximo.

Assim é possível observar a presença de camadas distintas, onde a primeira camada consiste nos 2,5 primeiros metros, que apresenta ser altamente dinâmica e com rápido decaimento nos primeiros metros, conforme citado anteriormente. A camada de 2,5 a 8 metros, onde apresenta maiores concentrações de umidade e variação temporal intermediária, podendo ter um aumento de variação no período de chuvoso, especialmente em forte eventos de precipitação. Abaixo de 8 metros, é possível observar uma zona com menor conteúdo de água em relação as camadas superiores, em seguida a camada que se estende até 15 metros, apresenta ser bastante úmida e com baixa variação temporal.

A camada a 15 metros apresentou resposta lenta a precipitação, estando seu recarregamento dependente do estado de umidade das camadas superiores e da intensidade e frequência dos eventos de precipitação da estação chuvosa atual e passada. Isso ocorre devido as diferentes camadas acima, apresentarem heterogeneidade na retenção e drenagem de água, assim se tem um perfil vertical com diferentes amplitudes de condutividade hidráulica variando com o conteúdo de água no solo, tendo camadas com distintas taxas de percolação em respostas aos eventos de precipitação (Reichardt & Timm, 2004). Seguindo por essas premissas, o forte efeito memória observado nessa camada (figura 9B), pode ser reduzido conforme o aumento no armazenamento de água nas camadas superiores (figura 7).

As camadas abaixo de 10 metros são as principais fontes de recarga para o lençol freático (Broedel et al., 2017, Tomassela et al., 2008), Tomassela et al., (2008) relata que na mesma área do presente estudo a recarga no lençol freático (30-35 m) ocorre tipicamente cerca de 4 meses após o início da estação chuvosa. Porém no presente estudo é possível observar, que esse recarregamento pode variar de acordo a frequência e intensidade dos eventos de precipitação somados com estado de umidade do solo no início da estação chuvosa (figura 9), podendo esse recarregamento ser reduzido a aproximadamente 1 a 2 meses, conforme observado em novembro de 2019 (figura 9), que sucedeu um período seco relativamente mais chuvoso e ocasionou uma recarga mais rápida e maior retenção de água nas camadas em relação a estação anterior.

Os pequenos acréscimos no conteúdo de água no solo nas camadas superficiais na ausência de precipitação entre as 4 a 7 horas da manhã e no final da tarde entre as 18 a 20 horas, podem estar relacionados com processos físicos do solo, da vegetação e da interação de ambos com a atmosfera. Podendo esse acréscimo ser indícios de redistribuição hidráulica conforme o relatado no leste da Amazônia por Oliveira et al., (2005), Da Rocha et al., (2004) e Lopes, (2001). Da Rocha et al., (2004) e Lopes, (2001) atribuíram esse acréscimo ao levantamento hidráulico no sistema radicular da planta, onde o sistema radicular serve como uma ponte de baixa resistência entre a camada superficial de solo seco e a camada de solo úmido profundo ou pelo fluxo capilar através das diferentes camadas do solo em resposta a fortes gradientes verticais no potencial matricial. Posteriormente Oliveira et al., (2005) incluindo medidas de fluxo de seiva nas raízes em paralelo com conteúdo de água no solo, observaram uma transferência noturna de água pelas raízes das camadas úmidas para as camadas secas do perfil do solo, onde no período seco encontrou fluxos ascendentes, que

consiste com o conceito de levantamento hidráulico, porém no início o período chuvoso observaram um movimento descendente de água pelas raízes, podemos assim as raízes ter uma papel de zonas preferenciais para o fluxo descendente de água no solo.

No presente estudo é possível observar processos semelhantes aos citados anteriormente, porém ainda não está claro a ocorrência desses processos para Amazônia central, podendo esse acréscimo no conteúdo de água no solo também está relacionado a dois processos ainda não relatados: 1) Contribuição da condensação da umidade do ar causada pela formação de orvalho, devido à noite a atmosfera ser mais úmida e evidências de ocorrência de incremento de água no solo ocorrer no mesmo instante que ocorre inversão térmica (ver figura 10), 2) Fluxo de seiva descendente causado pela queda do déficit de pressão de vapor (DPV) e o cessamento da transpiração a noite, à medida que o solo vai secando a força capilar dos poros aumenta, somando esse processo com a gravidade, pode-se ter um forte gradiente de potencial matricial entre a planta e solo, que quando cessa a transpiração e o DPV cai, essa diferença de potencial matricial pode induzir um fluxo descendente dos vasos das plantas para o solo.

Entender a dinâmica de água no solo na Amazônia Central ainda é complexo devido a não separação de processos, separar a atuação de fatores físicos do solo, biológico e interação com a atmosfera é primordial para entender os mecanismos do ciclo hidrológico e seu feedback com a floresta, assim futuros estudos incluindo dados de fluxo de seiva e tensiômetros para avaliar as diferenças de potencial matricial em perfis vertical de solo devem ser realizado.

5.2. Contribuição do conteúdo de água no solo para manter a evapotranspiração

O presente estudo investigou o conteúdo de água no solo disponível para manter a evapotranspiração (ET) através da absorção de água pelas raízes para a transpiração (T), mostrando que o primeiro metro não é suficiente para manter a ET, mesmo sendo a camada com maior teor de raízes finas (Chauvel et al., 1992), esta camada apresentou um baixo teor de armazenamento de água disponível para as plantas (25 %)(ver figura 12D), o que corrobora com estudos pioneiros na região como de Reichard et al., (1990), Ferreira et al.,(2002) e Ficher et al., (2008). Assim o acesso do sistema radicular as camadas profundas são primordiais para manter a ET e o funcionamento da floresta, podendo chegar a extrair água em diferentes profundidades. Estudos na Amazônia relatam absorção radicular em solos profundos durante o período seco, acessando diferentes profundidades de acordo com a intensidade da seca. No leste da Amazônia várias profundidades foram relatadas como 8 m (Nepstad et al., 1994; Jipp et al., 1998), 10 m (Bruno et al., 2006), 10 m (Markewitz et al., 2010) e 11 m a 18 m (Davidson et al., 2011), e na Amazônia Central Broedel et al. (2017) foram pioneiros e avaliaram que por ser uma região com período seco mais curto, consumos até 4,80 m são suficientes para manter a ET , onde a contribuição do primeiro metro correspondeu a 1,04 mm/dia (41,1 % da ET) no período chuvoso e a integração dos 3 primeiros metros contribuíram com 1,98 mm/dia (78,3 % da ET), e no período seco manteve-se a mesma proporção, com um leve acréscimo de consumo, 1,12 mm/dia (42 % da ET) e 2,03 mm/dia (76,2 %) respectivamente.

O presente estudo indica que a absorção de água pelas raízes é bem mais dinâmica do que o observado por Broedel et al., (2017), onde o acesso a camadas profundas não está limitado apenas a sazonalidade local e sim a frequência de eventos de precipitação e a disponibilidade de água no 1m (ver figura 12 D). Onde a camada de 1 m chegou a contribuir com 100 % da ET em determinados dias do período chuvoso, porém na ausência de precipitação por 9 dias, como ocorrido entre 1 a 9 de março de 2019, chegou a contribuir com apenas 28 % (0,93 mm/dia) da ET e o integrado de 3,2 m contribuiu com 88,8 % (2,95 mm/dia), sendo os demais vindo de um integrado de até 4,80 m (3,34 mm/dia). Já no período seco, a extração nas camadas profundas aconteceu com maior frequência, com evidência de um padrão de extração radicular, onde a medida que a déficit de pressão de vapor (DPV)

aumenta e a disponibilidade de água na camada superficial vai decaindo, a extração de água vai reduzindo no primeiro metro e avançando em camadas profundas, conforme demonstra a figura 16.

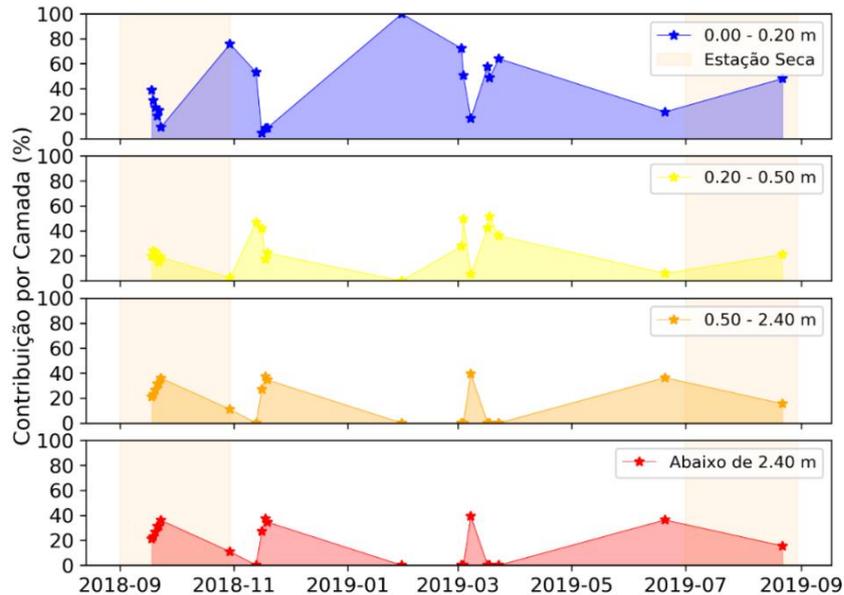


Figura 16. Contribuição do conteúdo de água no solo para evapotranspiração por camada.

No Período seco de 2018, entre 16 a 23 de setembro, foi considerado o período mais seco de toda a série de dados analisados, onde foi possível evidenciar extração de água chegando até 8,80 m. Na tabela 2 está descrito o dia 22 de setembro de 2018, onde a ET chegou a 6,2 mm/dia, o primeiro metro contribuiu com 32,6 % (2,0 mm/dia), o integrado de 3,2 m com 52,4 % (3,21 mm/dia), e 47,6 % (2,91 mm/dia) vieram do integrado de 8,80 m. Sendo que a camada de 2,40 m a 3,20 m não teve ocorrência de extração de água para este dia, elucidando uma preferência de extração em camadas com maior disponibilidade de água, assim como foram observados para outros dias, onde ocorreu variações na proporção de contribuição, o que corrobora com diversos estudos que relatam um padrão de enraizamento para lidar com a seca, onde as plantas apresentam um rápido desenvolvimento de raízes finas em camadas com alto teor de umidade (Exemplo: Chauvel et al., 1992; Stahl et al., 2013; Brunner et al., 2015; Vries et al., 2016; Cristina et al., 2017; Bristiel et al., 2018; Germon et al., 2019), podendo também está relacionado com os diferentes potenciais hídricos exercidos pelas camadas de solo e fração de água disponível. Estudos recentes em florestas tropicais

plantadas (Christina et al., 2017; Germon et al., 2019) avaliaram a dinâmica espaço-temporal de raízes finas em paralelo com conteúdo de água no solo em perfis de 17 m, apontando que o enraizamento profundo é uma estratégia eficiente para manter as demandas de uso da água, onde mesmo com baixa densidade de raízes nessas camadas, existe uma alta intensidade de extração.

Tabela 3. Contribuição do conteúdo de água no solo para manter a evapotranspiração no dia 22 de setembro de 2018, considerado o dia mais seco da série de dados analisadas.

CAMADAS(M)	CONTRIBUIÇÃO		CONTRIBUIÇÃO ACUMULADA	
	mm/dia	%	mm/dia	%
0 - 0.2	1.04	17.0%	1.04	17.0%
0.2 - 0.5	0.71	11.5%	1.75	28.6%
0.5 - 0.8	0.25	4.1%	2.00	32.6%
0.8 - 1.6	0.80	13.1%	2.80	45.7%
1.6 - 2.4	0.41	6.7%	3.21	52.4%
2.4 - 3.2	0.00	0.0%	3.21	52.4%
3.2 - 4.8	0.37	6.1%	3.58	58.5%
4.8 - 6.4	1.12	18.4%	4.70	76.9%
6.4 - 8.8	1.42	23.1%	6.12	100.0%

Apesar de na Amazônia Central não existir estudos de dinâmica espaço-temporal de raízes finas em camadas profundas, estudos como de Cordeiro et al., (2019) em camadas superficiais, elucidam que a disponibilidade de água no solo afeta diretamente a produtividade de raízes finas, assim o mesmo pode ocorrer em camadas profundas. Mesmo que no presente estudo não foi avaliado a dinâmica de raízes finas, o balanço de água no solo indica a existências de padrões de extração de água moldado pela disponibilidade de água em diferentes camadas e as características do solo (como textura e morfologia), onde as camadas profundas são essenciais para manter a ET no período seco (Nepstad et al., 1994; Bruno et al., 2006; Negrón-Juárez et al., 2007; Broedel et al., 2017) ou em prolongados períodos sem precipitação, podendo também ser um amortecedor da perda de água pela vegetação durante condições de seca extrema (Miguez-Macho e Fan, 2012; Pokhrel et al., 2015; Wang-Erlardson et al., 2016) em caso de não suprir toda a demanda evaporativa. Porém as medições de fluxo de seiva (ver Tabela 2) fornecem informações adicionais sobre os padrões de transpiração (T) específico dos indivíduos avaliados, dentre os 16 indivíduos avaliados, 10 apresentaram declínio na T durante o período seco, sendo a disponibilidade de água no solo um dos fatores que afetam esse declínio, já que nem todos os indivíduos conseguem ter uma arquitetura hidráulica desenvolvida para acessar as camadas profundas do solo. Assim o presente estudo

destaca que pode haver uma limitação hídrica no solo para Amazônia central, contrariando observações (Broedel et al., 2017) e simulações numéricas (Fang et al., 2017) para mesma área de estudo, evidenciando que a extração de água pelas raízes vai além dos 4,80 m considerados com suficientes para manter a ET.

Estudos e projeções climáticas indicam que na bacia Amazônica, os períodos secos podem estar mais longos e mais intensos (He & Soden, 2017; Marengo et al., 2017), além de mudanças nos padrões de precipitação já relatados na Bacia Amazônica (Satyamurty et al., 2009; Davidson et al., 2012; Marengo et al., 2017; Chambers & Artaxo 2019 e Zemp et al., 2017) e incrementos sistemáticos no DPV (Barkhordarian et al., 2019), podendo induzir a mortalidade de árvores causadas por falhas hídricas (McDowell et al., 2018) e assim afetando os fluxos de água no continuum solo-planta-atmosfera. O presente estudo destaca o conteúdo de água no solo em camadas profundas como substancial para manter a T no período seco ou em períodos com baixa frequência de precipitação e alta demanda de água para ET, mostrando que possa existir uma limitação específica de indivíduos que não consigam acessar essas camadas. Podendo o acesso a essas camadas ser uma adaptação essencial para evitar ou reduzir o estresse hídrico diante as mudanças climáticas, assim avaliar a dinâmica de água no solo em diferentes profundidades e sua contribuição para ET é essencial para entender mudanças nas componentes do ciclo hidrológico, além de ser importante para entender a sucessão da floresta sob possíveis mudanças climáticas e melhorar modelos numéricos de superfície terrestre (MST), já que convencionalmente, a grande maioria dos MSTs só contemplam os 2 primeiros metros e apresentam dificuldades em representar a dinâmica de água no solo e sua interação com a vegetação.

5.3. Partição da evapotranspiração e incertezas para o balanço hídrico

Durante o período avaliado a evapotranspiração da floresta devolveu para atmosfera, via transpiração, o equivalente a aproximadamente 29 % da precipitação acumulada, sendo que do total da transpiração, 49 % (203 mm) vieram das perdas de árvores emergentes, seguido por 31 % (128 mm) e 20 % (84 mm) de árvores de subdossel e sub-bosque, respectivamente. Estudos recentes realizados na Amazônia, com dados de fluxo de seiva (FS) obtiveram proporções T/P da ordem de 67-74 % para a região de Caxiuana (Da Costa et al., 2017), 57 % na região leste da Amazônia (Brum et al., 2018) e 37 % na Amazônia Central (Kunert et al., 2017), este último próximo à área do presente estudo. As diferenças entre proporções estimativas neste trabalho e as de Kunert et al., (2017) estão relacionadas as condições climáticas que foram bem distintas (período analisado por Kunert et al., 2017, foi menos chuvoso, inclusive na estação seca), ao número de árvores monitoradas e ao período de monitoramento que foi de apenas 8 meses, e ao fato de que as análises não incluíram os dados do período dos meses mais secos, quando se espera que a proporção T/P seja maior. Salati e Vose (1984) analisaram o balanço de água na Amazônia Central e estimaram que 50 % da precipitação é reciclada via perda por transpiração. Recentemente Kunert et al., (2017) mostrou que as árvores com diâmetro maior que 30 cm (emergentes) são as principais contribuintes para as perdas por transpiração do ecossistema (71 %), tanto no período seco quanto no chuvoso, o que corrobora com outros estudos realizados em florestas tropicais (Por exemplo: Horna et al., 2011; Aparecido et al., 2016; Moore et al., 2017; Brum et al., 2018; TFwala et al., 2019). Este estudo reforça o fato de que a maior contribuição da transpiração do ecossistema venha de árvores emergentes, porém indica uma menor magnitude (49 % da transpiração vinda das árvores emergentes) e aponta mudanças sazonais na contribuição individual da estrutura do dossel, mostrando que as árvores emergentes apresentam decaimento na transpiração durante o período seco, e que o aumento da contribuição de árvores de subdossel e sub-bosque, chegando as de subdossel ultrapassar a contribuição das emergentes em determinados períodos, é que mantem as altas taxas de transpiração do ecossistema durante o período seco.

Apesar de seu menor porte, as árvores de subdossel e sub-bosque, juntas representaram 84 % da dominância da área monitorada e 46 % (6,7 m²/ha) da área de xilema ativo, sendo bastante significativas para a estimativa da transpiração do ecossistema. Pelo fato

de estarem sob influência das árvores emergentes com menor exposição à radiação solar, as árvores de subdossel e sub-bosque estão sujeitas a um menor déficit de pressão de vapor (DPV) devido ao molhamento foliar (Granier et al., 1996; Horna et al., 2011).

Em relação às diferenças de magnitude das contribuições para a ET, pode ser destacado que a partição da ET tem diversas incertezas devido à complexa estrutura da floresta amazônica, em que estimativas de transpiração derivadas via técnica de fluxo de seiva tem vantagens para análise de indivíduos de forma isolada, porém o escalonamento para o nível de ecossistema, e posterior comparação com sistemas de fluxos turbulentos (Eddy Covariance - EC), carrega incertezas relacionadas as diferentes escalas espaciais de representatividade dos métodos e, principalmente, depende do número de árvores monitoradas, representa apenas uma pequena amostra ecossistêmica diante da alta diversidade florística observada na área de estudo, e que contribui de maneira não homogênea para os fluxos medidos em torre alguns metros acima do dossel, que também sofrem influencia do escoamento atmosférico e de sua zona de influência (“footprint”). Desta maneira, existe limitações para escalonamento da transpiração desde o nível de árvore até do ecossistema de floresta, onde as principais fontes de incertezas envolvem os diversos padrões de fluxo de seiva específico de indivíduos, variação radial e azimutal (Moon et al., 2015). Para a técnica de EC as incertezas são ainda maiores, em medidas de EC integram áreas grandes (1 a 3 km de raio para à área de estudo, segundo Araújo et al., 2002). Apesar de ser um sistema amplamente aceito, a técnica de EC apresentam problemas relacionados à subestimativa dos fluxos turbulentos de calor latente e sensível, que estão ligados a significativa heterogeneidade dos processos de trocas de fluxos em escalas maiores de paisagem (Foken, 2008).

Apesar das incertezas na magnitude relacionadas ao nível de escala, as variações sazonais da partição da evapotranspiração e transpiração em nível de ecossistema apresentadas neste estudo, trazem novos dados e importantes resultados sobre o complexo uso da água em diferentes estratos da vegetação do ecossistema de floresta tropical, em que indivíduos de sub-bosque e subdossel podem desempenhar importante ação reguladora no balanço hídrico superficial em relação às árvores de dossel emergentes, em especial durante o período seco, quando as árvores de dossel emergente apresentaram decaimento nas taxas de transpiração mesmo com déficit de pressão de vapor (DPV) maior. As árvores de sub-bosque e subdossel apresentam elevação da taxa de transpiração, e apesar desse aumento não superar

a contribuição das emergentes, é suficiente para compensar o decaimento da taxa de transpiração das emergentes durante o período seco. O decaimento da transpiração pode ter relação com a redução da umidade do solo, ou até mesmo ao maior controle estomático no gerenciamento do uso da água pelas árvores. Além disso, pode está relacionado também às trocas de folhas (Nelson et al., 2014). Já se sabe que o aumento das taxas de transpiração é fortemente induzido pelo aumento do DPV durante o período seco. Diversos estudos em florestas tropicais mostram que existe uma forte relação entre o DPV e a transpiração (Horna et al., 2011; Aparecido et al., 2016; Moore et al., 2017; Brum et al., 2018; TFWala et al., 2019; Gimenez et al., 2019). O fato de grandes árvores apresentarem decaimento na transpiração em determinado período, com alto DPV, fortalece a hipótese de que, mesmo com uma arquitetura hidráulica mais desenvolvida e com habilidade de buscar água em camadas mais profundas do solo, as árvores emergentes podem ser mais vulneráveis as falhas hidráulicas em situações de déficit hídrico. Esse tem sido apontado como o principal fator para a mortalidade de grandes árvores nas florestas tropicais relacionada às secas intensas recentes (Phillips et al., 2010; Bennett et al., 2015; Brienen et al., 2015; McDowell et al., 2018). Resultados similares foram observados durante o experimento de exclusão de chuva no leste da Amazônia, em que grandes árvores mostraram-se mais sensíveis à condição imposta de seca (Brando et al., 2008; Meir et al., 2009; Costa et al., 2010).

Assim, o estabelecimento de uma rede de monitoramento contínuo das perdas por transpiração em diferentes espécies de árvores e que constituem estratos distintos do ecossistema florestal, traz informações adicionais sobre o comportamento e habilidades do ecossistema as variações na disponibilidade hídrica que também é medida de maneira continua em um perfil de solo profundo. O comportamento diferenciado entre as árvores emergente e de subdossel para a contribuição as perdas de ET, mudam em escala sazonal e mostraram que em momentos distintos os diferentes estratos arbóreos mantem as altas taxas de transpiração, particularmente durante o período seco. Esse mecanismo ecossistêmico só foi possível observar usando-se esse conjunto sistemático de diferentes medidas. Mostrando que a floresta responde de forma heterogênea à variação sazonal do clima que é regulador da disponibilidade hídrica, e indica que mudanças na composição da floresta poderão ser desencadeadas por anomalias climáticas que afetarão diretamente o balanço hídrico a superfície. Se mudanças climáticas futuras intensificarem o período seco, conforme abordado na seção anterior, a resiliência da floresta pode ser afetada. Apesar da complexidade e

desafios de monitoramento de longo prazo uma floresta tão diversificada como a Amazônica, com detalhamento dos processos biofísicos em uma escala tão diversa de padrões de uso da água é fundamental para aprofundar o conhecimento e reduzir as incertezas na representação desse ambiente nos estudos de impactos e nas projeções futuras do clima com modelos numéricos que incorporem o ecossistema de floresta tropical.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

O presente estudo avaliou a partição da evapotranspiração em um ecossistema de floresta tropical na Amazônia central considerando na avaliação a contribuição do conteúdo de água no solo e sua variação sazonal, nas perdas por transpiração de indivíduos arbóreos representativos de diferentes estratos vegetativos (árvores emergentes, de subdossel e sub-bosque). Pela primeira vez na Amazônia Central se tem evidências de extração de água pelas raízes abaixo de 4,80 metros de profundidade do solo, com extração de água chegando à profundidade de até 8,80 metros em condições extremas. Também foi verificado que nas camadas superficiais do solo (até 2 m de profundidade) a dinâmica da água é bastante ativa podendo alcançar condições limitantes de disponibilidade de água para a vegetação em um curto intervalo de tempo.

A extração de água a partir de camadas profundas do solo mostrou-se bastante intensa durante o período seco. Essa extração também foi verificada durante o período chuvoso, mas em menor profundidade do solo (até 4,80 metros), e foi ocasionada por ausência prolongada de precipitação (acima de 5 dias). Isso evidencia que a extração de água nessas camadas não é restrita apenas ao período seco, e que a ausência de eventos de precipitação influencia na dinâmica de extração de água do solo em um período mais curto. O balanço de água no solo indica uma extração de água pelas raízes com padrões de consumo induzido pela disponibilidade de água nos primeiros metros. Isso implicou em um fator limitante do uso da água nas árvores com arquitetura hidráulica de distribuição de raízes predominante nos primeiros metros do solo. Assim, as camadas profundas do solo mostram-se como importante reserva de água para manter a transpiração.

Dados de fluxo de seiva trouxeram informações adicionais sobre a magnitude específica de uso da água pelas árvores nos diferentes estratos, onde o agrupamento em classes alométricas destaca as árvores de dossel emergente como principais fontes de transpiração. Entretanto, esse grupo de árvores apresentou decaimento da transpiração durante o período seco, sendo esse decaimento compensado pelo aumento na transpiração de árvores de subdossel e sub-bosque. Isso reforça o fato de que mudanças na composição da floresta podem suceder fortes efeitos no ciclo hidrológico. Apesar do reduzido número amostral de árvores monitoradas, as estimativas de transpiração por fluxo de seiva permitiram identificar padrões distintos de árvores na contribuição as perdas de ET, em que árvores que apresentam

redução da transpiração no período seco podem estar sobre um possível estresse hídrico, fato que não tinha sido observado em dados de fluxos turbulentos de EC. Esse resultado contraria a ideia de que a floresta na região central da Amazônia não está sujeita às condições mais secas. Pelo contrário, a existência de uma heterogeneidade de árvores pode esconder diferentes respostas às secas sazonais, e que um grupo de árvores pode ser favorecido diante do aumento da demanda atmosférica por vapor d'água, enquanto outros grupos podem ser mais vulneráveis.

Estudos que determinam a partição dos fluxos de água, desde o solo profundo até a atmosfera, ainda são desafiadores, pois ainda existem muitas incertezas tanto nas estimativas de extração de água no solo quanto nos padrões de uso da água de diferentes espécies de árvores, e sua resposta a condições de seca. Além da limitação de disponibilidade de dados, os processos envolvidos variam na escala da paisagem e com a sazonalidade dos elementos climáticos. Desta maneira, a continuidade das estratégias de medidas de transpiração e umidade do solo apresentadas nesse trabalho é fundamental, e deve ser persistida e combinada com novas técnicas e sensores que permitam a convergência de resultados obtidos por diferentes abordagens, para elucidar questões relacionadas à resiliência da floresta e sua resposta às alterações hídricas decorrentes de condições climáticas anômalas.

REFERENCIAS

- Aparecido, L. M. T., Dos Santos, J., Higuchi, N., & Kunert, N. (2019). Relevance of wood anatomy and size of amazonian trees in the determination and allometry of sapwood area. *Acta Amazonica*, 49(1), 1–10. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201800961>
- Aparecido, L.M.T., Miller, G.R., Cahill, A.T., Moore, G.W., 2016. Comparison of tree transpiration under wet and dry canopy conditions in a Costa Rican premontane tropical forest. *Hydrol. Processes* 30 (26), 5000–5011.
- Araújo AC, Nobre AD, Kruijt B, Elbers JA, Dallarosa R, Stefani P, von Randow C, Manzi.. AO, Culf AD, Gash JHC, Valentini R, Kabat P (2002) Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: the Manaus LBA site. *J Geophys Res* 107
- Avissar, R., Dias, P.L.S., Dias, M. and Nobre, C., 2002. The Large-Scale Biosphere-atmosphere Experiment in Amazonia (LBA): Insights and future research needs. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 107(D20).
- Barkhordarian, A., Saatchi, S.S., Behrangi, A. *et al.* A Recent Systematic Increase in Vapor Pressure Deficit over Tropical South America. *Sci Rep* **9**, 15331
- Bennett, A., McDowell, N., Allen, C. *et al.* Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Nature Plants* **1**, 15139 (2015).<https://doi.org/10.1038/nplants.2015.139>
- Brando PM, Nepstad DC, Davidson EA, Trumbore SE, Ray D, Camargo P. 2008. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbón cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* **363**: 1839–1848.
- Bravard, S. & Righi, D. 1989. Geochemical differences in an Oxisol-Spodosol Toposequence of Amazonia, Brazil. *Geoderma*, 44: 29-42.

- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., ... Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344–348. <https://doi.org/10.1038/nature14283>
- Bristiel, P., Roumet, C., Violle, C., Volaire, F., 2018. Coping with drought: root trait variability within the perennial grass *Dactylis glomerata* captures a trade-off between dehydration avoidance and dehydration tolerance. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-11018-13854-11108>.
- Broedel, E. (2012). Estudo da Dinâmica de Água no Solo em uma área de floresta primária não perturbada na Amazônia Central. PhD thesis, Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente - CLIAMB.
- Broedel, E., Tomasella, J., Candido, L.A. and von Randow, C., 2017. Deep soil water dynamics in an undisturbed primary forest in central Amazonia: Differences between normal years and the 2005 drought. *Hydrological Processes*, 31(9): 1749-1759.
- Brum, M., López, J. G., Asbjornsen, H., Licata, J., Pypker, T., Sanchez, G., & Oliveira, R. S. (2018). ENSO effects on the transpiration of eastern Amazon trees. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1760). <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0085>
- Brunner, I., Herzog, C., Dawes, M.A., Arend, M., Sperisen, C., 2015. How tree roots respond to drought. *Front. Plant Sci.* 6, 547.
- Bruno, R.D.; Rocha, H.R.; Freitas, H.C.; Goulden, M.L.; Miller, S.D. 2006. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrological Processes*, 20: 2477-2489.
- Campbell Scientific, I., 2018. CS650 and CS655 Water Content Reflectometers.
- Carneiro, V.M.C. et al., 2005. Floristic composition and structural analysis of terra firme forests in Manaus, Amazonas, Brazil, V Congresso Florestal Nacional: A Floresta e as Gentes. Actas das Comunicações–Inventário, Modelação e Gestão, Viseu, Portugal, pp. 1-12.

- Carneiro, V.M.C. et al., 2005. Floristic composition and structural analysis of terr firme forests in Manaus, Amazonas, Brazil, V Congresso Florestal Nacional: A Floresta e as Gentes. Actas das Comunicações–Inventário, Modelação e Gestão, Viseu, Portugal, pp. 1-12
- Chambers, J. Q., & Artaxo, P. (2017). Deforestation size influences rainfall. **Nature Climate Change**, 7, 175-176.
- Chauvel, A. 1982. Os latossolos amarelos, álicos, argilosos dentro dos ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região vizinha. *Acta Amazonica*, 12:47-60.
- Chauvel, A.; Lucas, Y.; Boulet, R. 1987. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, central Amazonia. Brazil. *Experientia*, 43: 234-241.
- Chauvel, A.; Vital, A.R.T.; Lucas, Y.; Desjardins, T.; Franken, W.K.; Luizão, F.J.; Araguás, L.A.; Rozanski, K.; Bedmar, A.P. 1992. O papel das raízes no ciclo hidrológico da floresta amazônica. *Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 298-302.
- Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.P., Stape, J.L., Bouillet, J.P., Lambais, G.R., Maire, G., 2017. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. *Funct. Ecol.* 31, 509–519.
- Cordeiro, A. L., Norby, R. J., Andersen, K. M., Valverde-Barrantes, O., Fuchslueger, L., Oblitas, E., ... Quesada, C. A. (2020). Fine-root dynamics vary with soil depth and precipitation in a low-nutrient tropical forest in the Central Amazonia. *Plant-Environment Interactions*, 1(1), 3–16. <https://doi.org/10.1002/pei3.10010>
- Cosme, L. H. M., Schiatti, J., Costa, F. R. C., & Oliveira, R. S. (2017). The importance of hydraulic architecture to the distribution patterns of trees in a central Amazonian forest. *New Phytologist*, 215(1), 113–125. <https://doi.org/10.1111/nph.14508>
- Cuartas, L. A.; Tomasella, J.; Nobre, A. D.; Hodnett, M. G.; Waterloo, M. J.; Munera, J. C. 2007. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145: 69-83.

- da Costa ACL, Galbraith D, Almeida S, Portella BTT, da Costa M, de Athaydes Silva Junior J, Braga AP, de Gonçalves PHL, de Oliveira AAR, Fisher R *et al* . 2010. Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest. *New Phytologist* **187**: 579–591.
- da Costa, A. C., Rowland, L., Oliveira, R. S., Oliveira, A. A., Binks, O. J., Salmon, Y., ... & Mencuccini, M. (2017). Stand dynamics modulate water cycling and mortality risk in droughted tropical forest. *Global change biology*, 24(1), 249-258.
- da Rocha, H. R. et al. Patterns of water and heat flux across a biome gradient from tropical forest to savanna in Brazil. *J. Geophys. Res.* 114, G00B12, <http://dx.doi.org/10.1029/2007JG000640> (2009).
- da Rocha, H.R. et al., 2004. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecological Applications*, 14(4): S22-S32.
- da Rocha, H.R., et al., 2004. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical forest in eastern Amazonia. *Ecol. Appl.* 14 (sp4), 22–32.
- Davidson EA, de Araújo AC, Artaxo P, Balch JK, Brown IF, Bustamante C, MercedesM, Coe MT, Defries RS, Keller M, Longo M, Munger JW, Schroeder W, Soares-Filho BS, Souza CM, Wofsy SC (2012) The Amazon Basin in transition. *Nature* 481(7381):321–328.
- Davidson, E.; Lefebvre, P.A.; Brando, P.M.; Ray, D.M.; Trumbore, S.E.; Solorzano, L.A.; Ferreira, J.N.; Bustamante, M.M.C.; Nepstad, D.C. (2011) Carbon inputs and water uptake in deep soils of an eastern amazon forest. *Forest Science*, **57**, 51–58.
- Dias, A., Neve, A., e Barbosa, R. (1980). Levantamento de solos da Estação Experimental Rio Negro. *Boletim Técnico da CEPLAC*, 71:1–13.
- Eltahir, E.A.B., Bras, R.L., 1996. Precipitation recycling. *Rev. Geophys.* 34 (3),367–378.
- Fang, Y., Leung, L. R., Duan, Z., Wigmosta, M. S., Maxwell, R. M., Chambers, J. Q., & Tomasella, J. (2017). Influence of landscape heterogeneity on water available to tropical forests in an Amazonian catchment and implications for modeling drought

response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(16), 8410–8426.
<https://doi.org/10.1002/2017JD027066>

- Ferraz, J.; Ohta, S.; Sales, P.C. 1998. Distribuição dos solos ao longo de dois transectos em floresta primária ao norte de Manaus (AM). Pesquisas florestais para a conservação da floresta e reabilitação de áreas degradadas da Amazonia- Manaus. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, 111-143.
- Ferreira, S.J., Luizao, F. and Dallarosa, R., 2005. Throughfall and rainfall interception by an upland forest submitted to selective logging in Central Amazonia. *Acta Amazonica*, 35(1): 55-62.
- Ferreira, S.J.F.; Fajardo, J.D.V.; Azulay, A.M.; Marques, A.O.F.; Vital, A.R.T.; Miranda.; Fonseca, S.A.; Oliveira, J.A.D.; Franken, W.K. 2007. Umidade e armazenamento de água em diferentes topossequencia em floresta primária na Amazônia Central. In: Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste Cuiabá, 24-27 junho. Cuiabá.
- Ferreira, S.J.F.; Luizão, F.J.; Mello-Ivo, W.; Ross, S.M.; Biot, Y. 2002. Propriedades físicas do solo após extração seletiva de madeira na Amazônia central. *Acta Amazonica*, 32(3): 449-466.
- Figueiredo, F.O.G., Costa, F.R.C., Nelson, B.W., Pimentel, T.P., 2014. Validating forest types based on geological and land-form features in central Amazonia. *J. Veg. Sci.* 25, 198–212. doi:10.1111/jvs.12078
- Fischer, R.A.; Williams, M.; Ruivo, M.L.; de Costa, A.L.; Meir, P. 2008. Evaluating climatic and soil water controls on evapotranspiration at two Amazonian rainforest sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, 48: 850-861.
- Foken, T. (2008), THE ENERGY BALANCE CLOSURE PROBLEM: AN OVERVIEW. *Ecological Applications*, 18: 1351-1367. doi:[10.1890/06-0922.1](https://doi.org/10.1890/06-0922.1)
- Franken, W., Leopoldo, P.R., Matsui, E., Ribeiro, M., de, N.G., 1992. Estudo da interceptação da água de chuva na cobertura florestal Amazônica do tipo terra firme. *Acta Amazonica* 12, 327–331.

- Germon, A., Jourdan, C., Bordron, B., Robin, A., Nouvellon, Y., Chapuis-Lardy, L., Golçavez, J.L.M., Pradier, C., Guerrini, I.A., Laclau, J. P. (2019). Consequences of clear-cutting and drought on fine root dynamics down to 17 m in coppice-managed eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 445(May), 48–59. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.010>
- Gimenez, B. O., Jardine, K. J., Higuchi, N., Negrón-Juárez, R. I., Sampaio-Filho, I. de J., Cobello, L. O., ... Chambers, J. Q. (2019). Species-specific shifts in diurnal sap velocity dynamics and hysteretic behavior of ecophysiological variables during the 2015–2016 el niño event in the amazon forest. *Frontiers in Plant Science*, 10(June), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00830>
- Good, S. P., Noone, D., & Bowen, G. (2015). Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes. *Science*, 349(6244), 175–177. doi:10.1126/science.aaa5931.
- Granier, A., 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. For. Sci.* 42 (2), 193–200.
- Granier, A., 1987. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sapflow measurements. *Tree Physiol.* 3 (4), 309–320.
- He, J., Soden, B. A re-examination of the projected subtropical precipitation decline. *Nature Clim Change* 7, 53–57 (2017). <https://doi.org/10.1038/nclimate3157>
- Higuchi, N. Santos, J. dos; Ribeiro, RJ; Freitas, J.V; Vieirn. G. G.: Coic. A.R: Minette. 1997. Crescimento e Incremento de uma Floresta Amazônica de Terra-Firme Manejada Experimentalmente. Em: Biomassa e Nutrientes Florestais - Projeto Bionte. MCT-INPA/DFID. Manaus Am, p. 4-6. Relatório Final.
- Higuchi, N., Santos, J. dos, Ribeiro, R. J., Minette, L., & Biot, Y. (1998). Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra - firme da Amazônia brasileira. *Acta Amazonica*, 28 (2), 153–166. Retrieved from <http://www.scielo.br/pdf/aa/v28n2/1809-4392-aa-28-2-0153.pdf>

- Horna, V., Schuldt, B., Brix, S., Leuschner, C., 2011. Environment and tree sizecontrolling stem sap flux in a perhumid tropical forest of Central Sulawesi, Indonesia. *Ann. For. Sci.* 68, 1027–1038.
- Jipp P.; Nepstad D. C.; Cassel K et al. 1998. Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally- dry Amazonia. *Climatic Change*, 39: 395-412.
- Joetzjer, E., Delire, C., Douville, H., Ciais, P., Decharme, B., Fisher, R., Christoffersen., Calver., J.C, da Costa., A. C. L, Ferreira., L. V, and Meir., P. (2014). Predicting the response of the Amazon rainforest to persistent drought conditions under current and future climates: a major challenge for global land surface models. *Geoscientific Model Development Discussions*, 7(4), 5295–5340. doi:10.5194/gmdd-7-5295-2014.
- Joetzjer, E., Douville, H., Delire, C., & Ciais, P. (2013). Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3. *Climate Dynamics*, 41(11-12), 2921–2936. doi:10.1007/s00382-012-1644-1.
- Katul, GG, Oren, R, Manzoni, S, Higgins, C, Parlange, MB. 2012. Evapotranspiration: a process driving mass transport and energy exchange in the soil plant atmosphere climate system. *Reviews of Geophysics* 50 (RG3002): 1– 25.
- Kunert, N., Aparecido, L. M. T., Wolff, S., Higuchi, N., Santos, J. dos, Araujo, A. C. de, & Trumbore, S. (2017). A revised hydrological model for the Central Amazon: The importance of emergent canopy trees in the forest water budget. *Agricultural and Forest Meteorology*, 239, 47–57. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.002>
- Laurance, W.F.; Fearnside, P.M.; Laurance, S.G.; Delamonica, P.; Lovejoy, T.E.; Rankin-de-Merona, J.M.; Chambers, J.; Gascon, C. 1999. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, 118: 127-138.
- Leopoldo, P.R., Franken, W., Salati, E. and Ribeiro, M.N., 1987. Towards a water-balance in the Central Amazonian region. *Experientia*, 43(3): 222-233.
- Libardi, P. L. 1995. Dinâmica da água no solo. Piracicaba, São Paulo. 497pp.

- Lloyd, C.R., Marques, F.A.O., 1988. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in Amazonian rainforest. *Agric. Forest Meteorol.* 42, 63–73.
- Lopes, J.L.M. 2001. Variabilidade da umidade do solo em floresta e pastagem de Rondônia com medidas de refletômetro no domínio da frequência. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosféricas. Universidade de São Paulo, São Paulo. 62pp.
- Luizão, R.C.C.; Luizão, F.J.; Paiva, R.Q.; Monteiro, T.F.; Souza, L.S.; Kruijt, B. 2004. Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. *Global Change Biology*, 22: 592-600.
- Malhi Y, Roberts JT, Betts RA, Killeen TJ, Li W, Nobre CA (2015) Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science* 319:169–172.
- Marengo, J. A. Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theor. Appl. Climatol.* 78, 79–96 (2004).
- Marengo, J.A. et al., 2017. Meteorological context of the onset and end of the rainy season in Central Amazonia during the GoAmazon2014/5. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(12): 7671-7681.
- Markewitz, D.; Devine, S.; Davidson, E. A.; Brando, P.; Nepstad, D. C. 2010. Soil moisture depletion under simulated drought in the Amazon: impacts on deep root uptake. *New Phytologist*, 187: 592-607.
- Marques Filho, A. de O., Dallarosa, R.G., Pachêco, V.B., 2005. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta - Reserva Biológica do Cuieiras ZF2, Manaus. *Acta Amazônica*. 35, 427–436. doi:10.1590/S0044-59672005000400007.
- McDowell, N., Allen, C. D., Anderson-Teixeira, K., Brando, P., Brien, R., Chambers, J., Christoffersen, B., Davis, S., Doughty, C., Duque, A., Espirito-Santo, F., Ficher, R., Fontes, C.G., Galbraith, D., Goodsman, D., Grossiord, C., Hartmann, H., Holm, J., Johnson, D.J., Kassim, A.R., Keller, M., Koven, C., Kueppers, L., Kumagai, T., Malhi, Y., McMahon, S.M., Mencuccini, M., Meir, P., Moorcroft, P., Muller-Landau,

- H.C., Phillips, O.L., Powell, T., Sierra, C.A, Sperry, J., Warren, J., Xu, C., Xu, X. (2018). Drivers and mechanisms of tree mortality in moist tropical forests. *New Phytologist*, 219(3), 851–869. <https://doi.org/10.1111/nph.15027>
- Meir P, Brando PM, Nepstad D, Vasconcelos S, Costa ACL, Davidson E, Almeida S, Fisher RA, Sotta ED, Zarin D *et al.* 2009. The effects of drought on Amazonian rain forests. In: Keller M, Bustamante M, Gash J, Silva Dias P, eds. Washington, DC, USA: AGU, *Amazonia and Global Change, Geophysical Monograph Series* **186**: 429–449.
- Miguez-Macho, G., & Fan, Y. (2012). The role of groundwater in the Amazon water cycle: 1. Influence on seasonal streamflow, flooding and wetlands. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(15), 1–30. <https://doi.org/10.1029/2012JD017539>
- Minkyu Moon, Taekyu Kim, Juhan Park, Sungsik Cho, Daun Ryu & Hyun Seok Kim (2015) Variation in sap flux density and its effect on stand transpiration estimates of Korean pine stands, *Journal of Forest Research*, 20:1, 85-93, DOI: [10.1007/s10310-014-0463-0](https://doi.org/10.1007/s10310-014-0463-0)
- Monteiro, M.T.F.; Tomasella, J.; Candido, L.A.; Luizão, F. Application of D-SEM to a catchment in Central Amazonia: calibration and validation of the carbon and nitrogen cycles. *Ecohydrology & Hydrobiology* 15 (2015) 192–207. 2015.
- Moore, G. W., Orozco, G., Aparecido, L. M. T., & Miller, G. R. (2018). Upscaling transpiration in diverse forests: Insights from a tropical premontane site. *Ecohydrology*, 11(3). <https://doi.org/10.1002/eco.1920>
- Negrón-Juárez, R., Ferreira, S. J. F., Mota, M. C., Faybishenko, B., Monteiro, M. T. F., Candido, L. A., Ribeiro, R. P., Oliveira, R. C., Araujo, A. C., Warren, J. M., Newman, B. D., Gimenez, B. O., Varadharajan, C., Agarwal, D., Broma, L., Tomassella, J., Higuchi, N., Chambers, J. Q. (2020). Calibration, measurement, and characterization of soil moisture dynamics in a central Amazonian tropical forest. *Vadose Zone Journal*, 19(1), 1–16. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20070>
- Negrón Juárez, R. I., da Rocha, H. R., e Figueira, A. M. S., Goulden, M. L., & Miller, S. D. (2009). An improved estimate of leaf area index based on the histogram analysis of

- hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6), 920–928. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.11.012>
- Negrón-Juárez, R.I. et al., 2018. Vulnerability of Amazon forests to storm-driven tree mortality. *Environmental Research Letters*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabe9f> .
- Negrón-Juárez, R.I., Hodnett, M.G., Fu, R., Goulden, M.L. and von Randow, C., 2007. Control of Dry Season Evapotranspiration over the Amazonian Forest as Inferred from Observations at a Southern Amazon Forest Site. *Journal of Climate*, 20(12): 2827-2839.
- Nelson, B. W.; Tavares, J. V.; Wu, J.; Valeriano, D. M.; Lopes, A. P.; Marostica, S. F.; Martins, G.; Prohaska, N.; Albert, L.; Araujo, A. C.; Manzi, A. O.; Saleska, S. R.; Huete, A. R.; (2014). Seasonality of Central Amazon Forest Leaf Flush Using Tower-Mounted RGB Camera. **2014 AGU Fall Meeting**.
- Nepstad, D.C. et al., 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, 372(6507): 666-669.
- Nepstad, D.C.; Carvalho, C.R.; Davidson, E.A.; Jipp, P.H.; Lefebvre, P.A.; Negreiros, G.H.; Silva, E.D.; Stone, T.A.; Trumbore, S.E.; Vieira, S. 1994. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, 372: 666-669.
- Nobre CA, Sampaio G, Borma LS, Castilla-Rubio JC, Silva JS, Cardoso M (2016) Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113:10759–68
- Nobre, C. A., Sellers, P. J., & Shukla, J. (1991). Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. *Journal of Climate*, 4(10), 957–988. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2)
- Oliveira, A. N.; Amaral, I. L.; Nobre, A. D.; Couto, L. B.; Sato, R. M.; Santos, J. L.; Ramos, J. 2002. Composição e diversidade florística de uma floresta ombrófila densa de terra

firme na Amazônia central, Amazonas, Brasil. II LBA Scientific Conference, Manaus. 42pp.

Oliveira, A.N.; Amaral, I.L. 2004. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. *Acta Amazonica*, 34:21-34.

Oliveira, R.S., Dawson, T.E., Burgess, S.S.O. and Nepstad, D.C., 2005. Hydraulic redistribution in three Amazonian trees. *Oecologia*, 145(3): 354-363.

Paca, V., Espinoza-Dávalos, G.E., Hessels, T.M. et al. The spatial variability of actual evapotranspiration across the Amazon River Basin based on remote sensing products validated with flux towers. *Ecol Process* 8, 6 (2019). <https://doi.org/10.1186/s13717-019-0158-8>

Phillips, O. L., Heijden, G. Van Der, Lewis, S. L., Lo, G., Lloyd, J., Malhi, Y., ... Vilanova, E. (2010). Drought–mortality relationships for tropical forests Oliver. *New Phytologist*, 187, 631–646.

Pokhrel, Y. N., Koirala, S., Yeh, P. J.-F., Hanasaki, N., Longuevergne, L., Kanae, S., & Oki, T. (2015). Incorporation of groundwater pumping in a global Land Surface Model with the representation of human impacts. *Water Resources Research*, 51, 78–96. <https://doi.org/10.1002/2014WR015602>

Quesada, C.A. et al., 2010. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, 7(5): 1515-1541.

Radambrasil, 1978. Brasil. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral (1973-1987). Projeto Radambrasil. Levantamento de recursos naturais. 34 vols. Rio de Janeiro.

Reichardt, K. & Timm, L.C. 2004. Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações. Editora Manole, São Paulo. 478pp.

Robock, A., 2015. Hydrology, floods and droughts: Soil Moisture. In: G.R. North, J. Pyle and F. Zhang (Editors), *Encyclopedia of Atmospheric Science*, 2nd edition. Academic Press, pp. 232-239.

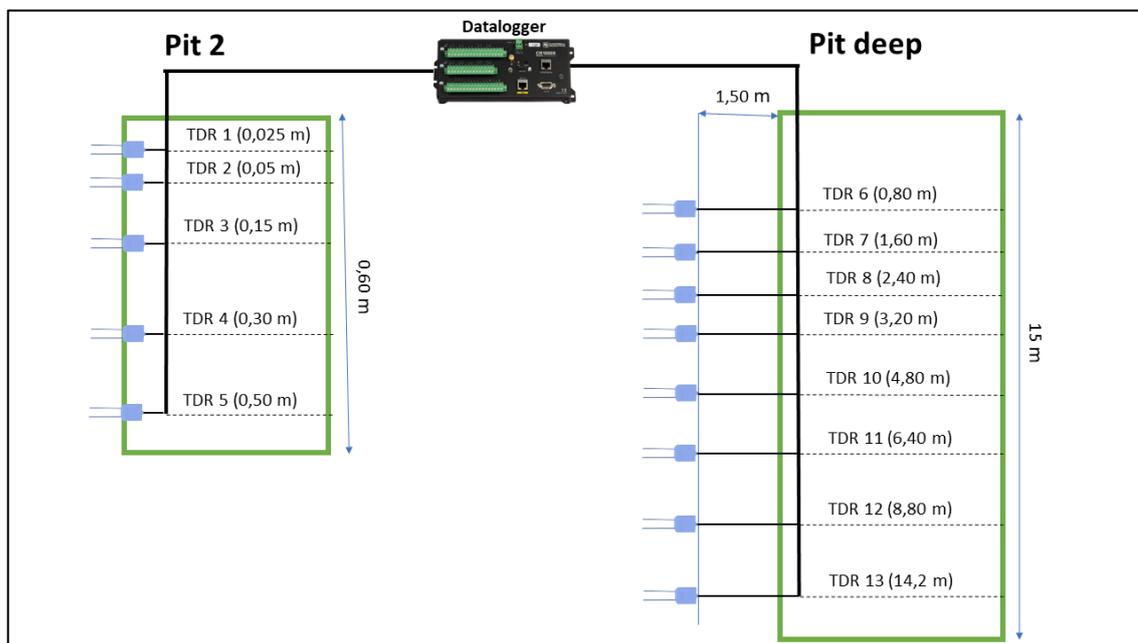
- Rosa, Diogo Martins. Estrutura do dossel e sazonalidade do índice de área foliar em ambientes de terra firme na Amazônia Central, com uso do LiDAR portátil terrestre. 2016. 52 pag. Dissertação (Ciências de Florestas Tropicais (CFT)) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2016.
- Sack, L., Ball, M. C., Brodersen, C., Davis, S. D., Des Marais, D. L., Donovan, L. A., ... Holbrook, N. M. (2016). Plant hydraulics as a central hub integrating plant and ecosystem function: meeting report for “Emerging Frontiers in Plant Hydraulics” (Washington, DC, May 2015). *Plant, Cell & Environment*, 39(9), 2085–2094. doi:10.1111/pce.12732
- Saito, S., Sakai, T., Nakamura, S. and Higuchi, N., 2003. Three types of seedling establishments of tree species in an Amazonian terra-firme forest. In: N. Higuchi (Editor), Projeto Jacaranda Fase II: Pesquisas florestais na Amazônia. INPE, Manaus, Amazonas, Brasil, pp. 33-41.
- Salati, E (1987) The forest and the hydrological cycle. In *The geophysics of Amazonia: vegetation and climate interactions*, ed. R.E. Dickson. Washington, D. C.: Wiley, 432–60
- Salati, E.; Vose, P. B. 1984. Amazon Basin: a system in equilibrium. *Science*, 225(4658):129-138.
- Satyamurty, P., De Castro, A. A., Tota, J., Da Silva Gularte, L. E., & Manzi, A. O. (2009). Rainfall trends in the Brazilian Amazon Basin in the past eight decades. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1–2), 139–148. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0133-x>
- Schietti, J., Interações entre floresta, chuva e solo em áreas com lençol freático superficial na Amazônia Central. Manaus: [s.n.], 2013. xiii, 144p. Tese (Biologia (Ecologia)) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.
- Schlesinger, W. H., & Jasechko, S. (2014). Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189-190, 115–117. doi:10.1016/j.agrformet.2014.01.011.

- Shiklomanov, A. I. 1998. *World Water Resources: A New Appraisal and Assessment for the Twenty-First Century* UNESCO: Paris; 37.
- Shiple, B., De Bello, F., Cornelissen, J. H. C., Laliberté, E., Laughlin, D. C., & Reich, P. B. (2016). Reinforcing loose foundation stones in trait-based plant ecology. *Oecologia*, 180(4), 923–931. doi:10.1007/s00442-016-3549-x.
- Silva Dias, P.L. e J. Marengo, *Águas Doces do Brasil: Águas Atmosféricas, Capital Ecológico, Uso e Conservação*. Editado por A.Rebouças, B. Braga e J. Tundizi. Instituto de Estudos Avançados e Academia Brasileira de Ciências, pp 65-115, 1999.
- Stahl, C., Hérault, B., Rossi, V. *et al.* Depth of soil water uptake by tropical rainforest trees during dry periods: does tree dimension matter?. *Oecologia* **173**, 1191–1201 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00442-013-2724-6>
- Synnott, T. J. A manual of permanent plot procedures for tropical rainforests. Oxford: Commonwealth Forestry Institute, 1979. 67 p. (Occasional Paper, 14).
- Tfwala, C.M., Van Rensburg, L.D., Schall R., Ziersman, P.C., Dlamini, P., Whole tree water use: Effects of tree morphology and environmental factors, *Ecological Indicators*, Volume 102, 2019, Pages 366-373, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.02.054>.
- Tomasella, J. & Hodnett, M.G. 1996. Soil hydraulic properties and van Genuchten parameters for an oxisol under pasture in central Amazonia. In *Amazonian Deforestation and Climate*, Gash JHC, Nobre CA, Roberts JM, Victoria RL (eds). John Wiley and Sons: West Sussex, 101-124.
- Tomasella, J.; Hodnett, M.G.; Cuartas, L.A.; Nobre, A.D.; Waterloo, J.; Oliveira, S.M. 2008. The water balance of an Amazonia microcatchment: the effect of interannual variability of rainfall on hydrological behaviour. *Hydrological Processes*, 22: 2133-2147.
- Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content - Measurements in coaxial transmission-lines. *Water Resources Research*, 16(3): 574-582.

- Van der Ent, R.J., Savenije, H.H.G., Schaefli, B. and Steele-Dunne, S.C., 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46.
- Vries, F.T.d., Brown, C., Stevens, C.J., 2016. Grassland species root response to drought: consequences for soil carbon and nitrogen availability. *Plant Soil* 409, 297–312.
- Wang-Erlandsson L, Bastiaanssen WGM, Gao H, Jägermeyr J, Senay GB, van Dijk AIJM, Guerschman JP, Keys PW, Gordon LJ and Savenije HHG (2016) Global root zone storage capacity from satellite-based evaporation. *Hydrol Earth Syst Sci*, 20:1459–1481.
- Waterloo, M. J., Oliveira, S. M., Drucker, D. P., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M. G., ... Múnera Estrada, J. C. (2006). Export of organic carbon in run-off from an Amazonian rainforest blackwater catchment. *Hydrological Processes*, 20(12), 2581–2597. doi:10.1002/hyp.6217
- Wu, J., Albert, L.P., Lopes, A.P., Restrepo-Coupe, N., Hayek, M., Wiedemann, K.T., Guan, K., Stark, S.C., Christoffersen, B., Prohaska, N., Tavares, J. V., Marostica, S., Kobayashi, H., Ferreira, M.L., Campos, K.S., da Silva, R., Brando, P.M., Dye, D.G., Huxman, T.E., Huete, A.R., Nelson, B.W., Saleska, S.R., 2016. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in Amazon evergreen forests. *Science* 351, 972–6. doi:10.1126/science.aad5068.
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M. J., & Rammig, A. (2017). Deforestation effects on Amazon forest resilience. *Geophysical Research Letters*, 44(12), 6182–6190. <https://doi.org/10.1002/2017GL072955>

ANEXOS

Anexo 1: Esquema de montagem dos sensores na pequena trincheira e no poço profundo.

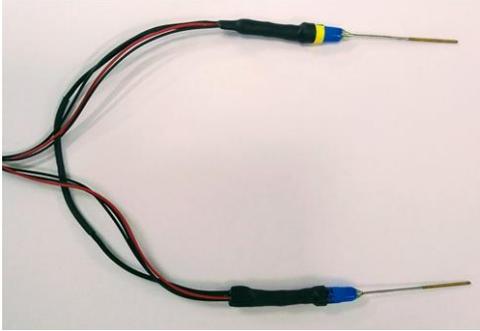


Anexo 2: Tabela com a descrição dos indivíduos monitorados.

Cod	Família	Espécie	Altura	CAP (cm)	DAP (cm)
1	Myrtaceae	Eugenia citrifolia	20.6	88.7	28.23
2	Lecythidaceae	Eschweilera sp.	22.5	74	23.55
3	Moraceae	Ficus americana	25.1	99	31.51
4	Fabaceae	Parkia velutina	30	225.2	71.68
5	Euphorbiaceae	Anomalocalyx uleanus	16.9	121.3	38.61
6	Sapotaceae	Pouteria oblanceolata	21.4	70.3	22.38
7	Sapotaceae	Pouteria oblanceolata	22	57	18.14
8	Malvaceae	Scleronema micranthum	27.9	152	48.38
9	Malvaceae	Eschweilera rosea	26.6	112.4	35.78
10	Violaceae	Rinorea paniculata	12.6	57	18.14
11	Lecythidaceae	Eschweilera cyathiformis	25.9	112.4	35.78
12	Combretaceae	Buchenavia parvifolia	15.9	58.3	18.56
13	Cecropiaceae	Porouma villosa	23.1	68	21.65
14	Euphorbiaceae	Anomalocalyx uleanus	17.2	68.3	21.74
15	Urticaceae	Pourouma minor	20.2	91.9	29.25
16	Fabaceae	Swartzia panacoco	19.9	61.5	19.58
17	Sapotaceae	Pouteria sp.	20	69.8	22.22
18	Melastomataceae	Mouriri nigra	18.4	71	22.60
19	Fabaceae	Macrolobium multijugum	20.4	72	22.92
20	Fabaceae	Andira surinamensis	20.6	96.6	30.75
21	Urticaceae	Pourouma velutina	22.5	85.8	27.31

Anexo 3: Esquema de montagem dos sensores de fluxo de seiva.

Sensor modelo SF-G



Protetor térmico

