



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**JOSÉ VIDAL DE FIGUEIREDO**

**INICIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA E  
RELAÇÕES HÍDRICAS NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA NO BIOMA  
CAATINGA**

**FORTALEZA**

**2018**

JOSÉ VIDAL DE FIGUEIREDO

INICIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA E RELAÇÕES  
HÍDRICAS NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA NO BIOMA CAATINGA

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas no semiárido.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Melo Vellame.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- F49i Figueiredo, José Vidal de.  
Iniciação do Escoamento em Microbacia Hidrográfica e Relações Hídricas no Sistema Solo-Planta-Atmosfera no Bioma Caatinga / José Vidal de Figueiredo. – 2018.  
171 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.  
Coorientação: Prof. Dr. Lucas Melo Vellame.
1. Condutividade hidráulica. 2. Umidade do solo. 3. Semiárido. 4. Caatinga. 5. Transpiração noturna. I.  
Título.

CDD 630

---

JOSÉ VIDAL DE FIGUEIREDO

INICIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA E RELAÇÕES  
HÍDRICAS NO SISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA NO BIOMA CAATINGA

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Doutorem Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 11 de maio de 2018.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Lucas Melo Vellame (Coorientador)  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB

---

Dr. Rubens Sonsol Gondim (Conselheiro)  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA

---

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Claudivan Feitosa de Lacerda (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

A Deus.

Aos meus Pais, José Luiz e M<sup>a</sup> Elizete Vidal,  
pelo modelo de valores.

Ao meu filho Luiz Antonio, que me ensina a  
cada dia a beleza da vida.

A minha esposa Marilyn Ferreira por enfrentar  
ao meu lado todos os desafios.

A todos que acreditaram e contribuíram para a  
realização deste trabalho.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a DEUS por todas as obras realizadas em minha vida.

Aos meus pais, pelo apoio, ensinamentos e a confiança depositado a mim.

A minha esposa Marilyn e ao meu filho Luiz Antonio, pelo amor e companheirismo em todos os momentos.

Ao professor Carlos Alexandre Gomes Costa pela disponibilidade, confiança, conselhos, amizade, ensinamentos e pelas orientações.

Ao coorientador Lucas Melo Vellame pela disponibilidade, conselhos sensatos, orientação e amizade.

Ao professor José Carlos de Araújo pela honra de poder partilhar de sua vasta experiência.

Aos professores Claudivan Feitosa de Lacerda, Iran Eduardo Lima Neto e Rubens Sonsol pela disponibilidade em participar da banca examinadora

Os amigos do Grupo de pesquisa HIDROSED e do DENA, Junior Moreira, Carlos Henrique, Carlos Salinas, Christine Farias, Thayslan, Gabriela Barroso, Francisco Jairo, Léa Moraes, Cicero Lima, Aldenia Mendes, Camila, David Bruno, Valéria Ramos, Adão Barros, Esmayle Alves, Karine Gobira, Pedro Medeiros, Viana, Esmayle, Alisson, Glauber e Juliana pela colaboração nas viagens a campo e incentivos.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, especialmente aos que tive a oportunidade de trabalhar: Adunias Texeira, Claudivan Feitosa de Lacerda, Luiz Alberto, Eunice Maia, Fernando Bezerra Lopes, Pedro Henrique Augusto Medeiros e Luis Camboim.

A Dona Socorro, Cícero e Hosana Oliveira, Benilda, moradores de Aiuaba, pela incansável disposição nas coletas de campo.

A Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFC (DENA).

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), em especial o campus Juazeiro do Norte pelo apoio.

Ao Instituto Chico Mendes e aos funcionários da Estação Ecológica de Aiuaba, pelo apoio.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, apoiaram e colaboraram para que este trabalho alcançasse os seus objetivos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro através do projeto WAR-CAATINGA (431639/2016-7), que auxiliou na execução deste trabalho.

**MUITO OBRIGADO!**

*“O otimista é um tolo. O pessimista, um chato.  
Bom mesmo é ser um realista esperançoso.”*

*Ariano Suassuna*

## RESUMO

As principais saídas no balanço hídrico do solo em uma bacia hidrográfica no semiárido são: escoamento, evaporação e transpiração. No bioma Caatinga, localizado na região semiárida brasileira, tem-se observado que a vegetação afeta consideravelmente a variação da umidade no perfil do solo e que são raros os eventos de escoamento superficial. Além disso, as investigações sobre a transpiração em espécies da Caatinga em condições naturais ainda são pouco abrangentes e compreender o uso da água pelas árvores é crucial para a restauração ecológica sustentável e para a compreensão ecohidrológica. Nesse contexto, objetivou-se analisar as condições que promovem o início do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica semiárida, e estudar a dinâmica temporal da transpiração através de medidas do fluxo de seiva (FS), em plantas representativas do bioma Caatinga. O estudo foi desenvolvido na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA, 12 km<sup>2</sup>). O trabalho encontra-se dividido em dois capítulos principais: i) Iniciação do escoamento em microbacia hidrográfica do semiárido sob Caatinga preservada no nordeste brasileiro; ii) Transpiração em plantas do bioma Caatinga. No primeiro capítulo foram analisadas as condições necessárias para ocorrência do escoamento superficial. Entre os dados analisados no período de 2005 a 2014 (10 anos) estão: a precipitação total; precipitação com cinco dias antecedentes; umidade antecedente do solo; duração da precipitação; e intensidade de chuva (média e máxima dentro de 5, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos). Ao todo foram monitorados 118 eventos com precipitação superior a 10 mm, proporcionando 45 eventos com escoamento, 25 com escoamento desprezível e 49 sem escoamento. A partir dos resultados avalia-se que o coeficiente de escoamento anual foi inferior a 0,5% e ocorreu escoamento superficial apenas quatro dias por ano em média, caracterizando a escassez de água superficial do bioma Caatinga. As variáveis mais relevantes para explicar o início do escoamento foram precipitação total e intensidade máxima de precipitação em 60 min ( $I_{60}$ ). O escoamento ocorreu sempre que a precipitação total ultrapassou 31 mm, mas nunca ocorreu para precipitação abaixo de 14 mm ou para  $I_{60}$  abaixo de 12 mm.h<sup>-1</sup>. O fato de a duração da intensidade crítica (60 min) ser semelhante ao tempo de concentração da bacia (65 min) e que o valor do limiar de infiltração se aproxima da condutividade hidráulica saturada do leito fluvial suportam o pressuposto de que prevalece o escoamento superficial Hortoniano; No segundo capítulo avaliou-se o processo de transpiração de espécie (*P. pyramidalis*) representativa da Caatinga empregando a metodologia do fluxo de seiva no xilema hidroativo, durante o período de dois anos, abrangendo os períodos seco, chuvoso e de transição. Avaliou-se também a influência dos fatores climáticos que interferem no fluxo de seiva (FS), como

radiação global, déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura. O fluxo de seiva (FS) foi medido *in situ* durante 365 dias ininterruptos. Os valores diários de FS variaram entre 1,4 (maio/2016) e 47,0 L.dia<sup>-1</sup>(outubro/2016). Para análise da distribuição temporal do FS os dados foram agrupados em quatro regimes hídricos: chuvoso; transição chuvoso-seco; seco e transição seco-chuvoso. O fluxo de seiva (FS) em *P. pyramidalis* diminuiu com o aumento da umidade do solo, visto que neste período o DPV é pequeno quando comparado ao período seco. Observou-se que o FS aumentou durante o período de transição chuvoso-seco e seco em comparação com o período chuvoso. Esta constatação indica que a influência, neste regime hídrico pluvial, dos baixos valores de déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura do ar e ET<sub>0</sub> fazem com que FS seja menor durante o período úmido em comparação ao período seco. Outro resultado interessante observado foi a ocorrência de transpiração noturna tanto em espécies caducifólias (*P. pyramidalis*) como em plantas *sempre verdes* (*Ziziphus. joazeiro*) no bioma Caatinga. A transpiração noturna nas duas espécies variou de 4% a 36%, segundo o método de dissipação térmica; e de 10% a 16% pelo método IRGA (*infrared gas analyzer*) em relação à transpiração diária. A partir deste resultado suscita-se a hipótese, a ser testada, que a transpiração noturna ocorra em função do fechamento incompleto dos estômatos, associado à elevada demanda evaporativa atmosférica na Caatinga, oriunda de ventos com baixo teor de umidade. Estes resultados destacam alguns aspectos únicos na medição de transpiração em florestas tropicais sazonalmente secas, que são relevantes para estudos futuros em diversos níveis. Verificou-se ainda que a transpiração média anual de *P. pyramidalis* corresponde a 44-69% da precipitação média anual na BEA; e que o método da sonda de dissipação térmica se mostrou eficaz na estimativa da transpiração em plantas do bioma Caatinga.

**Palavras-chave:** Condutividade hidráulica. Umidade do solo. Semiárido. Caatinga. Transpiração noturna. Ecohidrologia.

## ABSTRACT

The main outputs in the soil water balance in a semi-arid basin are: flow, evaporation and transpiration. In the Caatinga biome, located in the Brazilian semi-arid region, vegetation has been observed to affect soil moisture variability considerably and surface runoff events are rare. In addition, investigations into perspiration in Caatinga species under natural conditions are still poorly understood and understanding the use of water by trees is crucial for sustainable ecological restoration and ecohydrological understanding. In this context, the objective was to analyze the conditions that promote the beginning of surface runoff in a semi-arid watershed, and to study the temporal dynamics of transpiration through sap flow measurements in representative plants of the Caatinga biome. The study was developed in the Aiuaba Experimental Basin (AEB, 12 km<sup>2</sup>). The work is divided in two main chapters: i) Initiation of the drainage in the hydrographic microbasin of the semi-arid under Caatinga preserved in the Brazilian northeast; ii) Transpiration in plants of the Caatinga biome. In the first chapter the necessary conditions for the occurrence of surface runoff were analyzed. Among the data analyzed in the period from 2005 to 2014 (10 years) are: total precipitation; precipitation with five days antecedent; soil moisture; duration of precipitation; and rainfall intensity (average and maximum within 5, 15, 30, 45, 60 and 120 minutes). In all, 118 events with precipitation greater than 10 mm were monitored, providing 45 events with flow, 25 with negligible flow and 49 with no flow. From the results, it was evaluated that the annual flow coefficient was less than 0.5% and the surface runoff occurred only four days per year on average, characterizing the scarcity of surface water of the Caatinga biome. The most relevant variables to explain the onset of runoff were total precipitation and maximum precipitation intensity in 60 min ( $I_{60}$ ). The runoff occurred whenever the total precipitation exceeded 31 mm, but never occurred for precipitation below 14 mm or for  $I_{60}$  below 12 mm.h<sup>-1</sup>. The fact that the duration of the critical intensity (60 min) is similar to the basin concentration time (65 min) and that the value of the infiltration threshold approaches the saturated hydraulic conductivity of the riverbed supports the assumption that surface runoff prevails Hortoniano; In the second chapter, the transpiration process of species (*P. pyramidalis*) representative of the Caatinga was evaluated using the sap flow methodology in the hydrological xylem during the two-year period, covering dry, rainy and transition periods. The influence of climatic factors that interfere with sap flow (SF), such as global radiation, vapor pressure deficit (VPD) and temperature were also evaluated. The sap flow (SF) was measured in situ during 365 uninterrupted days. The daily SF values ranged between 1.4 (May / 2016) and 47.0 L.dia<sup>-1</sup> (October / 2016). For analysis of the temporal

distribution of SF, the data were grouped in four water regimes: rainy; rainy-dry transition; dry and dry-rainy transition. Sap flow (SF) in *P. pyramidalis* decreased with increasing soil moisture, since in this period the VPD is small when compared to the dry period. It was observed that SF increased during the rainy-dry and dry transition period compared to the rainy season. This finding indicates that the influence of the low values of vapor pressure deficit (VPD), air temperature and ET<sub>0</sub> on the rainwater regime mean that SF is lower during the wet period compared to the dry period. Another interesting result was the occurrence of nocturnal transpiration both in deciduous species (*P. pyramidalis*) and in evergreen plants (*Ziziphus. Joazeiro*) in the Caatinga biome. The nocturnal perspiration in the two species ranged from 4% to 36%, according to the thermal dissipation method; and from 10% to 16% by IRGA (infrared gas analyzer) method in relation to daily transpiration. From this result, it is hypothesized that the nocturnal transpiration occurs due to the incomplete closure of the stomata, associated with the high atmospheric evaporative demand in the Caatinga, from low humidity winds. These results highlight some unique aspects in the measurement of transpiration in seasonally dry tropical forests, which are relevant for future studies at several levels. It was also verified that the average annual transpiration of *P. pyramidalis* corresponds to 44-69% of the annual mean precipitation in the AEB; and that the thermal dissipation probe method proved effective in estimating transpiration in plants of the Caatinga biome.

**Keywords:** Hydraulic conductivity. Soil moisture. Semi-arid. Caatinga. Nocturnal transpiration. Ecohydrology.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Mapa de localização da área de estudo. EF1 e 2 - Estação Fluviométrica 1 e 2; EP1, EP2 e EP3 – Estação Pluviométrica 1, 2 e 3.....	22
Figura 2 -	Normal climatológica para a Bacia Experimental de Aiuba - BEA. A) Precipitação média mensal (mm); B) Precipitação média acumulada.....	23
Figura 3 -	Esquema mostrando a relação entre a taxa de infiltração e a intensidade de chuva ou de irrigação. Fonte: adaptado de Torres (2017).....	30
Figura 4 -	Fluxograma das atividades previstas no desenvolvimento deste capítulo....	39
Figura 5 -	Precipitação da EP1 (a cada 5 min) e hidrograma da EF1 (a cada 5 min) e EF2 (a cada 15 min) do evento chuva-deflúvio de 21/3/2010.....	48
Figura 6 -	Influência da precipitação total (H) e intensidade máxima de precipitação para 60 minutos (I60) na geração de escoamento na BEA (2005 - 2014) para 118 eventos (H> 10 mm). A eficiência é dada por $\eta$ .....	50
Figura 7 -	Análise temporal da umidade da BEA (2005-2014). Regressão entre o tempo decorrido desde o início da estação chuvosa (admitido 01 de dezembro) e o coeficiente de escoamento (A). Sazonalidade da geração de escoamento na BEA. (B).....	52
Figura 8 -	Box-plot da condutividade hidráulica saturada (Ksat) na Bacia Experimental de Aiuaba (2009 - 2010), com base em 179 medições de campo; Localizado no leito do rio (A), nas margens do rio (B) e nas encostas (C). As caixas esquerda e direita referem-se a camadas de solo de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente. O comprimento da caixa representa o intervalo interquartil da amostra; A barra e a cruz na caixa são a mediana e a média, respectivamente. Pontos de dados com valores discrepantes são representados por círculos.....	54
Figura 9 -	Mudanças de direção do fluxo no sistema solo-planta atmosfera, mostrando os cenários a, b e c. Fonte: Goldsmith (2013).....	75
Figura 10 -	Correlação entre número de Reynolds, número de Prandtl e número de Nusselt. Para água, óleo e ar. Fonte: Moreira, (2017).....	81
Figura 11 -	Gráfico da calibração original de Granier com relação entre K e a densidade do fluxo de Seiva U (adotamos a simbologia Fd) para três espécies. Fonte: Granier, (1985).....	83

Figura 12 - Resultado do Índice de Área Foliar (IAF) para o ano 2016, na BEA para as três Associações Solo Vegetação (ASV`s), pelo método da coleta de serrapilheira. Estação Pluviométrica 1 (EP1). Fonte: Almeida, (2016).....	88
Figura 13 - Fluxograma das atividades previstas para obtenção da transpiração através de sondas de dissipação térmica.....	90
Figura 14 - Processo de construção e instalação da sonda de dissipação térmica. Agulhas com resistência (A). Sonda de dissipação térmica completamente montada (B). Fonte de tensão ajustável (C). Sonda de dissipação térmica instalada no campo (D) .....	91
Figura 15 - Layout do sistema de medição de fluxo de seiva usando sensor de dissipação térmica.....	92
Figura 16 - Representação esquemática de corte transversal no tronco de uma árvore de catingueira tipo.....	94
Figura 17 - Lisímetro de Pesagem. A – Detalhe da plataforma de pesagem; B – Estrutura de proteção.....	95
Figura 18 - Processo de calibração do lisímetro de Pesagem. A – Célula de carga; B – plataforma de pesagem carregada com massas conhecidas aferidas pelo IMETRO.....	96
Figura 19 - Relação entre o diâmetro do caule (Db) e área do xilema ativo (Ax) para a espécie <i>P. pyramidalis</i> (Tul.) em diferentes escalas e períodos do ano.....	103
Figura 20 - Relação entre o diâmetro do caule e a espessura radial do xilema ativo para a espécie <i>P. pyramidalis</i> (Tul.).....	104
Figura 21 - Gráficos de calibração da célula de carga. A – carregamento da massa padrão. B – descarregamento da massa padrão.....	103
Figura 22 - Histerese no processo de carregamento e descarregamento da massa padrão.....	105
Figura 23 - Comparação dos valores de transpiração no Lisímetro com o fluxo de seiva obtido pela SDT (equação de Granier original) para a espécie <i>P. pyramidalis</i> (Tul.).....	106
Figura 24 - Regressão linear entre o fluxo de seiva (FS) estimado e real(transpiração do lisímetro) para <i>P. pyramidalis</i> (Tul.). O valor estimado de FS foi calculado aplicando os valores originais do parâmetro de dissipação	

	térmica ( $\alpha = 119$ , $\beta = 1,231$ ) para obtenção do coeficiente de ajuste do parâmetro alfa da equação de Granier.....	107
Figura 25 -	Relação entre as medidas de transpiração com lisímetro e fluxo de seiva acumulado diariamente, usando a equação de Granier original e modificada.....	108
Figura 26 -	Box plot do gradiente térmico natural (GTN) de <i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.) para os períodos chuvoso e seco na Bacia experimental de Aiuaba...	109
Figura 27 -	Séries temporais de (a) precipitação diária (P) e umidade do solo ( $\theta$ ), (b) déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV), (c) potencial hídrico do ar ( $\Psi_{ar}$ ) e (d) evapotranspiração potencial (ET0) da bacia experimental de Aiuaba.....	111
Figura 28 -	Box plot comparando os dados de fluxo de seiva medidos durante dois anos em duas plantas de <i>P. pyramidalis</i> (Tul). (P1 e P2). Os dados foram agrupados por período: úmido (PU), transição chuvoso-seco (PT-CS), seco (PS) e transição seco-chuvoso (PT-SC).....	113
Figura 29 -	Temperatura e umidade relativa do ar para dias representativos da estação úmida nos anos 2016 e 2017 na BEA.....	115
Figura 30 -	Fluxo de seiva em duas plantas de <i>P. Pyramidalis</i> , déficit de pressão de vapor (DPV) e radiação global para dias representativos da estação úmida dos anos de 2016 e 2017 na BEA. P1 – Planta 01; P2 – Planta 02.....	116
Figura 31 -	Relação entre o déficit de pressão de vapor (DPV) e o fluxo de seiva (FS) em duas plantas de <i>P. Pyramidalis</i> (P1 e P2), durante a estação úmida para os anos 2016 e 2017 na BEA. A direção das setas indica o curso de aumento e diminuição de DPV ao longo do dia.....	118
Figura 32 -	Temperatura e umidade relativa do ar para dias representativos da estação de transição nos anos 2016 e 2017 na BEA.....	120
Figura 33 -	Fluxo de seiva em duas plantas de <i>P. Pyramidalis</i> , déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos da estação de transição dos anos de 2016 e 2017 na BEA. P1 – Planta 01; P2 – Planta 02.....	121
Figura 34 -	Relação entre o déficit de pressão de vapor (DPV) e Fluxo de seiva (FS) em duas plantas de <i>P. Pyramidalis</i> (P1 e P2), durante a estação de transição para os anos 2016 e 2017 na BEA. A direção das setas indica o curso de aumento e diminuição de DPV ao longo do dia.....	123

Figura 35 - Temperatura e umidade relativa do ar para dias representativos da estação seca nos anos 2016 e 2017 na BEA.....	124
Figura 36 - Fluxo de seiva em duas plantas de <i>P. pyramidalis</i> , déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos da estação secados anos de 2016 e 2017 na BEA.P1 – Planta 01; P2 – Planta 02.....	125
Figura 37 - Relação entre o déficit de pressão de vapor (DPV) e o Fluxo de seiva (FS) em duas plantas de <i>P. Pyramidalis</i> (P1 e P2), durante a estação seca para os anos 2016 e 2017 na BEA. A direção das setas indica o curso de aumento e diminuição de DPV ao longo do dia, para o ano 2016.....	126
Figura 38 - Série temporal da transpiração (T) estimada através de medições do fluxo de seiva (FS) em duas plantas de <i>P.Pyramidalis</i> (P1-planta 01 e P2- planta 02)na bacia experimental de Aiuaba.....	128
Figura 39 - (A) Valores de temperatura do ar ( $T_{air}$ ), radiação solar ( $R_g$ ) e déficit de pressão de vapor (VPD) medidos durante 24 horas. (B) box plot comparando o comportamento a cada três horas da taxa de transpiração e condutância estomática entre as duas espécies ( <i>P. pyramidalis</i> e <i>Z. joazeiro</i> ) durante 24 horas.....	129
Figura 40 - Correlação linear entre valores de transpiração e condutância estomática em plantas de <i>P. pyramidalis</i> ( <i>Tul</i> ) e <i>Z. joazeiro</i> ( <i>Mart.</i> ) para um período de 24 horas; box plot paralelo aos eixos apresentando a dispersão de T e $g_s$ .....	131
Figura 41 - A - Transpiração total - diurna e noturna; B - transpiração acumulada em duas espécies ( <i>P. pyramidalis</i> ( <i>Tul.</i> ) e <i>Z. joazeiro</i> ( <i>Mart.</i> )) período de 24 horas.....	132

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação das intensidades de chuva.....	33
Tabela 2 -	Dados monitorados dos 118 eventos com precipitação total superior a 10 mm na Bacia Experimental de Aiuaba (2005 - 2014) e respectiva data, precipitação, escoamento, coeficiente de escoamento (RC), intensidade da precipitação (I <sub>av</sub> : média; I <sub>5</sub> : 5 minutos ; I <sub>15</sub> : 15 minutos; I <sub>30</sub> : 30 minutos; I <sub>45</sub> : 45 minutos; I <sub>60</sub> : 60 minutos e I <sub>120</sub> : 120 minutos) e teor de umidade do solo antecedente à profundidade de 0,20 m .....	45
Tabela 3 -	Resultados estatísticos do escoamento (118 eventos na BEA de 2005 a 2014) versus um conjunto de variáveis usando a Análise de Componentes Principais e a Correlação Canônica. ....	49
Tabela 4 -	Eventos com e sem escoamento na Bacia Experimental de Aiuaba (2005 - 2014) e critérios de separação. A eficiência $\eta$ é definida pela Equação 2; e 'N' é o ranking de desempenho.....	50
Tabela 5 -	Dados de calibração da célula de carga .....	96
Tabela 6 -	Parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas na ASV1, Bacia experimental de Aiuaba. DA= Densidade Absoluta (ind.ha-1), DR= Densidade Relativa (%), AbS= Área Basal (m <sup>2</sup> .ha-1), DoR= Dominância Relativa (%), FR= Freqüência Relativa (%), IVC= Índice. Fonte: Tillesse (2017)).....	102
Tabela 7 -	Dados das quatro coleta realizadas para análise do xilema ativo na <i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.) .....	103
Tabela 8 -	Regressão do gradiente térmico natural (GTN) com os parâmetros atmosféricos: Potencial hídrico atmosférico ( $\Psi_{ar}$ ), déficit de pressão de vapor (DPV), radiação solar global e temperatura do ar nos períodos úmido: abril/maio de 2016 e seco nov/dez de 2016. Para duas unidades (P1 e P2).....	110
Tabela 9 -	Características das plantas em que o fluxo de seiva foi monitorado. P1 – Planta 01; P2 – Planta 02; P-L1 – Planta do lisímetro 01 .....	112

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>INICIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO SOB CAATINGA PRESERVADA NO NORDESTE BRASILEIRO.....</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS DO BIOMA CAATINGA .....</b>	<b>65</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>152</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>153</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Panoramas de escassez d'água parecem fazer cada vez mais parte do cotidiano da população de regiões áridas e semiáridas. No nordeste do Brasil, igualmente, enfrentam-se seis anos (2012-2017) consecutivos de precipitações abaixo da média histórica, uma das maiores secas do século. Nesta conjuntura, entender como se dá o processo de saídas de água (escoamento e transpiração) numa bacia hidrográfica preservada poderá nos ajudar a planejar melhor possíveis alterações ecohidrológicas. Nesta pesquisa foram avaliadas as saídas (escoamento e transpiração) em uma microbacia hidrográfica semiárida preservada.

A transpiração em regiões áridas e semiáridas é um processo hidrológico complexo, que liga as interações solo-planta-água-atmosfera. No bioma Caatinga, localizado na região semiárida brasileira, tem-se observado que a vegetação afeta consideravelmente a variação da umidade no perfil do solo (COSTA *et al.*, 2013) e que há poucos eventos de escoamento superficial (De FIGUEIREDO *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2016). Com isso, a relação entre transpiração vegetal e escoamento superficial apresenta menor representatividade no balanço hídrico em termos de bacia hidrográfica (ZHENG e WANG, 2015). No entanto, as investigações sobre a transpiração em espécies da Caatinga em condições naturais ainda são pouco abrangentes. É necessário compreender bem o uso da água pelas árvores, fenômeno crucial para a restauração ecológica sustentável e para a compreensão ecohidrológica, especialmente em regiões áridas e semiáridas, onde a disponibilidade de água é o principal fator limitante para a sobrevivência e desenvolvimento das plantas (CHEN *et al.*, 2014a).

Para avaliação do escoamento e da transpiração em florestas é importante que a mesma se encontre sem grandes perturbações antrópicas para que os resultados sejam utilizados como valores de referência para condições naturais. Isso justifica a importância das pesquisas que estão sendo desenvolvidas na ESEC de Aiuaba, visto que a mesma se encontra preservada há, aproximadamente, quarenta anos. A Caatinga é um bioma complexo, em vista da heterogeneidade que apresenta, não só quanto à fisionomia vegetal e topográfica, como quanto à composição florística e fitossociologia, variando de acordo com a altitude, o substrato e o índice pluviométrico.

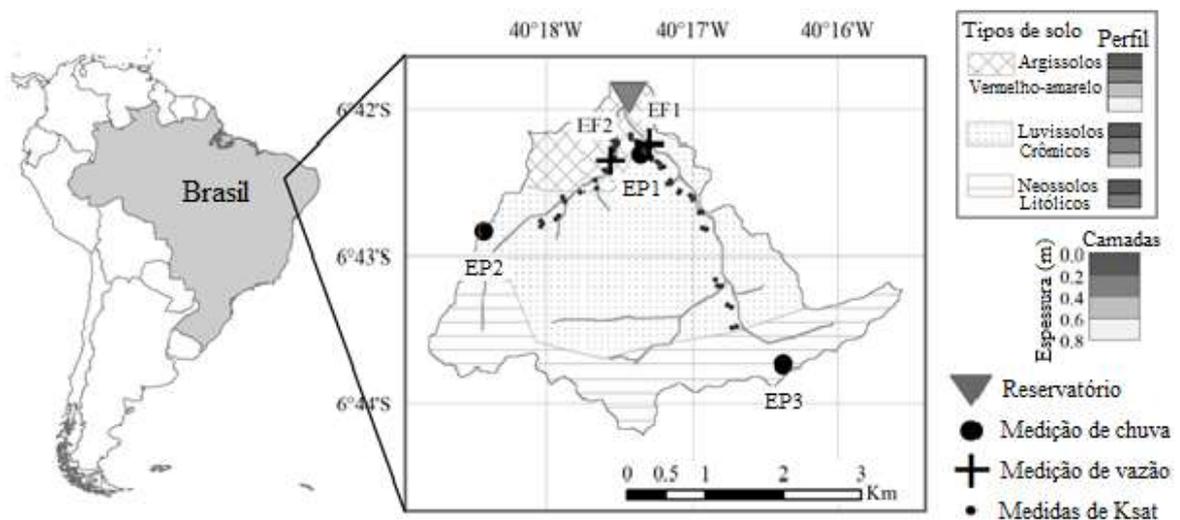
A tese está dividida em dois capítulos principais. No primeiro foram estudadas as condições necessárias para ocorrência do escoamento superficial. Entre os dados analisados no período de 2005 a 2014 (10 anos) estão: precipitação total e com cinco dias antecedentes; umidade antecedente do solo; duração da precipitação; e intensidade de chuva (média e máxima

para 5, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos). Para o segundo capítulo, foi avaliado o processo de transpiração de espécies representativas da Caatinga empregando a metodologia do fluxo de seiva no xilema hidroativo, durante o período de dois anos (2016-2017), abrangendo o período seco e chuvoso e de transição. Foram medidos e analisados dados de transpiração noturna na Caatinga. Além disso, foram avaliados os fatores climáticos que interferem no fluxo de seiva, como: radiação global, déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura e umidade do solo.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Experimental de Aiuaba (BEA, 12 km<sup>2</sup>) tem rede de drenagem composta por riachos intermitentes, com dois riachos principais e está localizada em município homônimo e faz parte da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, na região do Estado do Ceará denominada Sertão de *Inhamuns* (Figura 1). Considerando o sistema de coordenadas UTM (Zona 24S, SAD-69 datum), a BEA está entre as coordenadas 9.260.000 m - 9.255.000 m e 355.000 m - 361.000 m (COSTA *et al.*, 2007; De ARAÚJO e PIEDRA, 2009; COSTA *et al.*, 2016). A bacia localiza-se no setor sudoeste da Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba. Estabelecida em 1978, a ESEC de Aiuaba tem área total de 11.746,60 hectares e está associada à manutenção da biodiversidade florística e faunística do bioma Caatinga e representa um importante papel para o ciclo hidrológico da região devido, principalmente, a sua cobertura florestal densa (ARAÚJO *et al.*, 2004). Para descrição mais detalhada da ESEC de Aiuaba e de seu entorno, referir-se a Belo (2007).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo. EF1 e 2 - Estação Fluviométrica 1 e 2; EP1, EP2 e EP3 – Estação Pluviométrica 1, 2 e 3

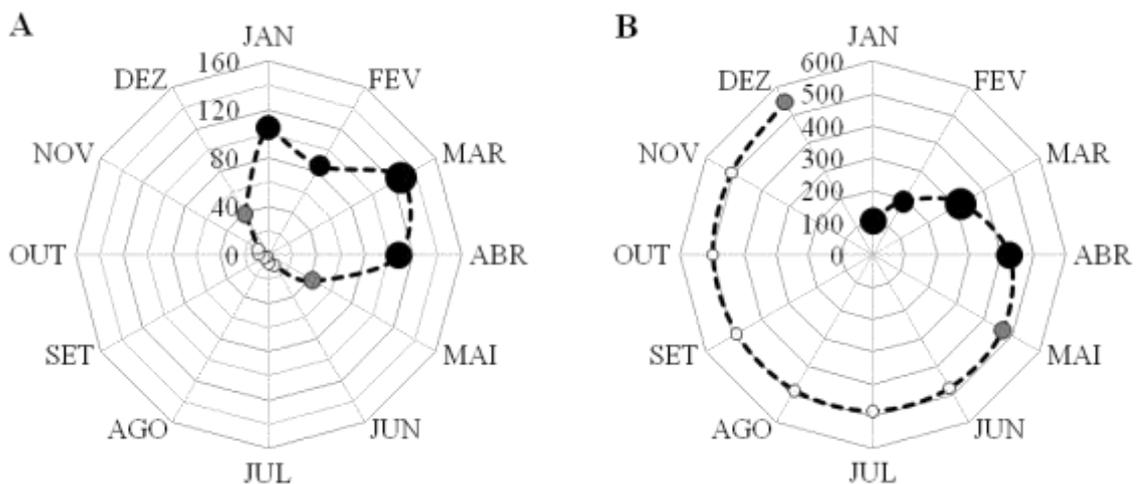


Fonte: De Figueiredo *et al.*, (2016)

A BEA tem sido monitorada desde janeiro de 2003 pelo HIDROSED - Grupo de Pesquisa Hidrosedimentológicas do Semiárido ([www.hidroсед.ufc.br](http://www.hidroсед.ufc.br)). Neste período, tem sido realizadas medições e análises de variáveis hidrológicas (e.g. precipitação, evaporação, umidade do solo e escoamento superficial), além de estudo de perdas por interceptação em um sítio experimental (MEDEIROS, 2005; ARAÚJO, 2005) e estudos hidrogeológicos e sedimentológicos (COSTA, 2007; FARIAS 2008; WIEGAND *et al.*, 2008; LOPES *et al.*, 2010; LIMA *et al.*, 2010; De FIGUEIREDO, 2011; PINHEIRO *et al.*, 2012; COSTA *et al.*, 2013, COSTA *et al.*, 2016; De FIGUEIREDO *et al.*, 2016).

A região de estudo apresenta dois períodos bem definidos: chuvoso (janeiro, fevereiro, março e abril) e seco (junho, julho, agosto, setembro, outubro e novembro). Intercalado por dois períodos de transição: chuvoso-seco (maio) e seco-chuvoso (dezembro), como podemos observar na Figura 2. Esses períodos de transição merecem atenção especial na análise ecohidrológica de forma mais ampla porque têm influência direta tanto no início da geração de escoamento como nas relações hídricas dos biomas em geral, principalmente no bioma Caatinga devido à caducifolia na maioria de suas espécies vegetais. A BEA apresenta para que período de 2004 à 2017 uma média de precipitação pluviométrica de 570 mm, temperatura média anual de 26,6°C; temperatura máxima média anual de 31,6°C; temperatura mínima média anual de 21°C; umidade relativa do ar média anual de 61,6%; insolação média anual de 2.540 horas (COSTA, 2007).

**Figura 2** -Normal climatológica para a Bacia Experimental de Aiuba - BEA. A) Precipitação média mensal (mm); B) Precipitação média acumulada.



\* Círculos em preto representam precipitação em meses do período chuvoso; círculos brancos representam a precipitação em meses secos. Círculos em cinza representam meses de transição seco-chuvoso (dezembro); e de transição chuvoso-seco (maio).

### 3 INICIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO SEMIÁRIDO SOB CAATINGA PRESERVADA NO NORDESTE BRASILEIRO<sup>1</sup>

#### RESUMO

Objetivou-se neste estudo analisar processos hidrológicos relacionados a precipitação e suas inter-relações com o início do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica semiárida de Caatinga (12 km<sup>2</sup>), no Nordeste do Brasil; e compreender a dinâmica do início do escoamento superficial. Para isso, utilizou-se o seguinte critério de separação dos eventos de chuva: volume precipitado maior que 10 mm e separado por, no mínimo, seis horas sem chuvas. O escoamento superficial foi medido através do monitoramento do reservatório na saída da bacia, aplicando-se o método do balanço hídrico. A análise estatística dos dados foi realizada através da Análise da Componente Principal e Análise de Correlação Canônica. Além disso, realizou-se uma análise gráfica (visual) para descobrir a influência de cada variável na geração do escoamento. Durante o período de análise (2005 - 2014), foram monitorados 118 eventos com precipitação superior a 10 mm, proporcionando 45 eventos com escoamento, 24 com escoamento desprezível e 49 sem escoamento. Os resultados mostraram que o coeficiente de escoamento anual foi inferior a 0,5% e o escoamento superficial ocorreu apenas quatro dias por ano em média, fornecendo uma visão da escassez de água superficial do bioma Caatinga. As variáveis mais relevantes para explicar o início do escoamento foram precipitação total e intensidade máxima de precipitação em 60 min ( $I_{60}$ ). O escoamento ocorreu sempre que a precipitação ultrapassou 31 mm, mas nunca ocorreu para precipitação abaixo de 14 mm ou para  $I_{60}$  abaixo de 12 mm.h<sup>-1</sup>. O fato de que a duração da intensidade crítica é semelhante ao tempo de concentração da bacia (65 min) e que o valor do limiar de infiltração se aproxima da condutividade hidráulica saturada do leito fluvial suportam o pressuposto de que o escoamento superficial que prevalece é Hortoniano. No entanto, nenhuma das variáveis analisadas (precipitação total ou antecedente, teor de umidade do solo, intensidade de chuva ou duração da chuva) tem sido capaz de explicar o início do escoamento em todos os eventos monitorados: o melhor critério, por exemplo, não conseguiu explicar 25 eventos (27%). É possível que a iniciação do fluxo de superfície no bioma Caatinga seja fortemente influenciada pela dinâmica do sistema radicular (absorção de água), que altera o status de macroporosidade e, portanto, a abstração inicial.

**Palavras-chave:** Condutividade hidráulica. Umidade do solo. Sistema radicular. Semiárido. Caatinga, Conectividade.

---

<sup>1</sup> Artigo publicado: De FIGUEIREDO, J. V., De ARAÚJO, J. C., MEDEIROS, P. H. A., COSTA, A. C. (2016) Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrol. Process.**, 30: 2390–2400. doi: 10.1002/hyp.10801

## ABSTRACT

The objective of this study was to analyze hydrological processes related to precipitation and their interrelations with the beginning of surface runoff in a semi-arid Caatinga basin (12 km<sup>2</sup>), in Northeast Brazil; and to understand the dynamics of the beginning of surface runoff. For this purpose, the following rainfall separation criteria were used: rainfall volume greater than 10 mm and separated by at least six hours without rainfall. The runoff was measured by monitoring the reservoir at the outlet of the basin, applying the water balance method. Statistical analysis of the data was performed through Principal Component Analysis and Canonical Correlation Analysis. In addition, a graphical (visual) analysis was carried out to discover the influence of each variable in the flow generation. During the analysis period (2005 - 2014), 118 events with a precipitation greater than 10 mm were monitored, providing 45 events with flow, 24 with negligible flow and 49 with no flow. The results showed that the annual flow coefficient was less than 0.5% and surface runoff occurred only four days per year on average, providing a view of the scarcity of surface water in the Caatinga biome. The most relevant variables to explain the onset of runoff were total precipitation and maximum precipitation intensity in 60 min ( $I_{60}$ ). The flow occurred whenever the precipitation exceeded 31 mm, but never occurred for precipitation below 14 mm or for  $I_{60}$  below 12 mm.h<sup>-1</sup>. The fact that the critical intensity duration is similar to the basin concentration time (65 min) and that the infiltration threshold value approaches the saturated hydraulic conductivity of the riverbed supports the assumption that the prevailing surface runoff is Hortonian. However, none of the analyzed variables (total or antecedent precipitation, soil moisture content, rainfall intensity or rainfall duration) has been able to explain the onset of runoff in all monitored events: the best criterion, for example, is not was able to explain 25 events (27%). It is possible that the initiation of surface flow in the Caatinga biome is strongly influenced by the dynamics of the root system (water absorption), which changes the macroporosity status and, therefore, the initial abstraction.

**Keywords:** Hydraulic conductivity. Soil moisture. Root system. Semi-arid. Caatinga, Connectivity.

## INTRODUÇÃO

O aumento contínuo pela demanda de água tem sido motivo de preocupação. Exigem-se sistemas de gestão cada vez mais eficientes e isto é ainda mais relevante em regiões com escassez de água, como o bioma Caatinga, que está inserido em uma zona semiárida de, aproximadamente, um milhão de km<sup>2</sup>, onde vivem, aproximadamente, 25 milhões de pessoas. Na Caatinga, os rios são quase que exclusivamente intermitentes e as águas subterrâneas são escassas e/ou salgadas devido à prevalência de aquíferos fissurais em rochas cristalinas (FRISCHKORN *et al.*, 2003). Como resultado, para superar a escassez de água nos anos secos, uma rede densa de reservatórios artificiais foi construída desde o século passado (PETER *et al.*, 2014, De ARAÚJO e MEDEIROS, 2013, MAMEDE *et al.*, 2012). No Estado do Ceará, com 150.000 km<sup>2</sup> e 8,5 milhões de habitantes, 90% da demanda é atendida pelas águas armazenadas nos reservatórios (De ARAÚJO *et al.*, 2004). No entanto, a eficácia da política baseada na construção de barragens é limitada, pois várias forças motrizes levam ao lento, mas consistente declínio da disponibilidade hídrica, como a poluição e a sedimentação dos reservatórios (De ARAÚJO *et al.*, 2006). Para avaliar a disponibilidade de água no bioma Caatinga, o conhecimento da iniciação do escoamento superficial é central não apenas para entender a origem ou caminho da água, mas também dos sedimentos e poluentes.

Além da precipitação, da topografia e da vegetação, a condutividade hidráulica saturada (K<sub>sat</sub>) desempenha um papel importante para a geração de escoamento, fluxo subterrâneo, processos de erosão e transporte de solutos. O K<sub>sat</sub> depende do material originário, da estrutura do solo, do uso da terra e da macroporosidade biogênica (ZIMMERMANN *et al.*, 2012). Em regimes Hortonianos, o excedente da infiltração terrestre só se transforma em escoamento superficial quando a intensidade da chuva é maior do que a taxa de infiltração, que se aproxima de K<sub>sat</sub> à medida que se avança no tempo. Em áreas onde ocorre uma diminuição acentuada de K<sub>sat</sub> na camada superficial do solo e coincide com a ocorrência de grandes e intensos eventos de precipitação, o excesso de escoamento superficial ocorre frequentemente (BONELL e GILMOUR, 1978; GERMER *et al.*, 2010). Em áreas com extensas camadas de impedimento próximas à superfície, isto é, em áreas cujos valores de K<sub>sat</sub> sejam desprezíveis, tais como rochas sãs, o escoamento terrestre pode ser generalizado (BONELL e GILMOUR, 1978). Um ou uma combinação dos processos de geração de escoamento acima mencionados impulsiona principalmente o escoamento superficial nas bacias hidrográficas das zonas áridas, que são dominadas por correntes endogênicas. O escoamento também pode ser gerado em porções desconectadas da captação, que atinge a saída depois de superar as perdas

de transmissão da encosta e/ou do canal. Portanto, é provável que o padrão de Ksat reflita a organização espacial do fluxo terrestre, ou vice-versa (ZIMMERMANN *et al.*, 2012). Além disso, as medidas de Ksat podem ser comparadas às intensidades de chuva para obter uma compreensão básica das consequências hidrológicas e dos padrões observados (CHAPPELL e SHERLOCK, 2005). Por exemplo, uma superação espacialmente significativa do Ksat do solo na camada superficial pelas intensidades de chuva predominantes indica a possibilidade de geração de fluxo (excedente da infiltração) por via terrestre (ZIMMERMANN *et al.*, 2012). A observação de escoamento por intensidades de chuva menores do que o Ksat da camada superficial do solo indica a possibilidade de excesso de saturação.

## **QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS**

### **Questões científicas**

A pesquisa tem como fundamentos duas questões científicas, a saber:

- i) Como se dá o início do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica preservada?
- ii) Quais os fatores que melhor indicam o início do escoamento superficial?

### **Hipóteses**

1. Há ocorrência de escoamento na BEA com chuvas de intensidades menores que o Ksat do solo; e
2. O início do escoamento nunca acontece quando o solo está seco, ou seja, umidade do solo está baixa.

### **Objetivos**

Diante da escassez de informações sobre a estimativa do conteúdo de água do solo e da relação solo-planta-atmosfera em regiões semiáridas brasileiras no bioma Caatinga, o objetivo geral deste capítulo da tese é entender a dinâmica do início do escoamento superficial em ambiente semiárido, tomando como base a Bacia Experimental de Aiuaba. A partir do monitoramento hidrológico contínuo realizada na BEA foram abordados os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar quais as variáveis que melhor explicam o início do escoamento superficial;
- Analisar qual processo prevalece em relação à formação do escoamento superficial.

## REVISÃO DE LITERATURA

### A teoria Infiltração-Escoamento superficial Hortoniano.

A compreensão dos mecanismos de geração de escoamento remete ao pioneiro trabalho de Horton, publicado em 1933, no qual é proposto o primeiro modelo clássico de hidrologia para a teoria de infiltração-escoamento. O autor descreve quantitativamente o mecanismo de geração de escoamento superficial a partir da intensidade de precipitação e a capacidade de infiltração do solo. Neste sentido, o escoamento superficial como excedente da infiltração é proposto por Horton (1933) ao considerar que o escoamento superficial ocorre como resultado de chuvas prolongadas a uma intensidade maior que a capacidade de infiltração do solo, o excesso de precipitação se acumula em pequenas depressões superficiais, eventualmente transbordando se a chuva continuar.

De acordo com Horton (1933), quando a intensidade da chuva ( $i$ ) é menor que a capacidade de infiltração do solo ( $f$ ) toda a água é absorvida pelo solo e não há escoamento superficial, caso contrário o escoamento superficial (Hortoniano) ocorre a uma taxa de  $(i - f)$ . A contribuição do escoamento superficial cresce com o tempo até atingir um valor sensivelmente constante à medida que a precipitação prossegue. Cessada esta, ele vai diminuindo até anular-se.

Segundo Reichardt (1987), quando a água de precipitação não se infiltra totalmente no solo, o excesso esco pela superfície, indo depositar-se em depressões, ou, quando se trata de declividade acentuada, saindo da área de interesse. Portanto, a água que não se infiltra escorre e forma a enxurrada, processo denominado de escoamento superficial ou *run-off*. O autor ressalta que são muitos os fatores que afetam o processo de escoamento superficial, sendo os principais: a declividade do terreno e as características de infiltração do solo.

O papel da infiltração na estimativa dos picos de inundação e dos rendimentos foi sugerido por Horton, como primeira aproximação: a taxa de escoamento é igual à intensidade da chuva menos a taxa das "perdas de chuva". As perdas de chuva incluem os diversos processos: interceptação, retenção na superfície, armazenamento na superfície e nos rios. Esta base de estimativas foi subsequentemente denominada "teoria de infiltração de escoamento" (TURNER, 1963).

Para Costa (2007), van de Giesena *et al.*, (2011) e Santos *et al.*, (2016) o escoamento superficial Hortoniano ocorre quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo e as depressões locais se enchem. Depois que essas depressões são

preenchidas, a água começará a escoar, estas condições ocorrem com frequência em chuvas de grande magnitude.

Ainda segundo a teoria de infiltração-escoamento proposta por Horton, o conceito de capacidade de infiltração do solo seria constante no espaço, podendo-se considerar que o escoamento superficial provinha de todas as partes da bacia (CHORLEY, 1978).

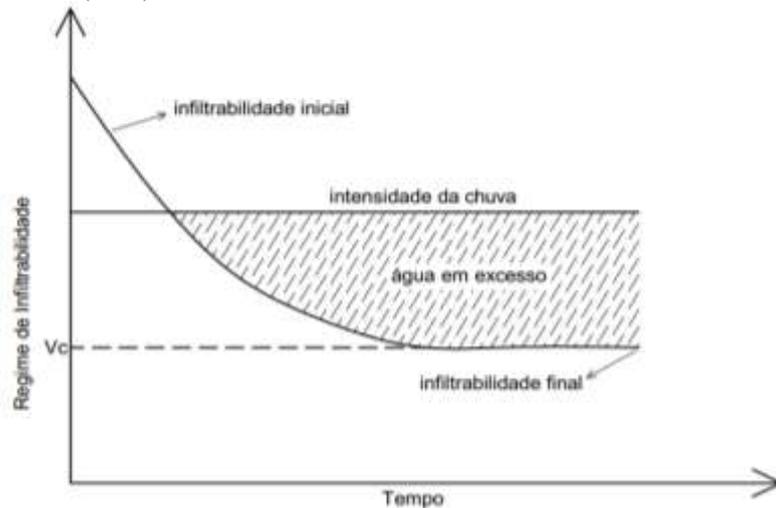
Para Loague *et al.*, (2010) o fluxo superficial Hortoniano ocorre quando a taxa de precipitação excede a capacidade de infiltração da superfície do solo, por um período de tempo suficiente para gerar escoamento além do armazenamento nas depressões. Os autores ainda afirmam que a chave para o escoamento Hortoniano, é o fato de o solo da superfície se tornar saturado pela infiltração de água, porque é incapaz de transmitir água para o perfil inferior, de forma rápida o suficiente. Inicialmente, quando o solo superficial é insaturado, a capacidade de infiltração é maior que a condutividade hidráulica saturada devido à força motriz capilar. À medida que o solo se umidifica durante a infiltração, a pressão na superfície aumenta, diminuindo assim o gradiente hidráulico e diminuindo a capacidade de infiltração. A acumulação de água na superfície começa quando a capacidade de infiltração é reduzida e torna-se menor que a taxa de precipitação. O escoamento Hortoniano ocorre tipicamente em áreas descontínuas, ou seja, isoladas no espaço e têm solos de permeabilidade relativamente baixa na superfície.

Atualmente, a teoria de escoamento superficial Hortoniano refere-se ao processo de escoamento gerado em perfis de solos alterados por ações antrópicas (p.ex. bacias agrícolas, de solo urbano pavimentado) ou compactados por pisoteio de animais, regiões áridas e semiáridas (SIEFERT *et al.*, 2012 e CHOW *et al.*, 1988) ou ainda em locais onde a densidade de vegetação é baixa, fazendo com que as taxas de infiltração sejam inferiores à intensidade de chuva (HORNBERGER *et al.*, 1998).

No caso da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), através das observações de campo e das medições realizadas por Costa, (2007) e por De Figueiredo (2011), constatou-se que o escoamento da BEA ocorre preferencialmente e em maior volume no riacho secundário, formado por Argissolos Vermelho-amarelo e Neossolos Litólicos, caracterizados por vegetação de menor porte e densidade inferior, se comparada à área com Luvisolos Crômicos, que se encontra no trecho final do riacho principal. Também foi possível visualizar características de escoamento Hortoniano no trecho a montante do riacho principal, onde prevalece o Neossolo Litólico (solo raso e vegetação esparsa). Isso significa dizer que o escoamento Hortoniano deve acontecer em aproximadamente 80% da área da BEA.

Quando o solo recebe água a taxa inferior à de sua capacidade de infiltração, o regime de infiltração é ditado pela quantidade de água que é fornecida ao solo. Por outro lado, quando a lâmina de água precipitada supera a infiltrabilidade do solo, este é que determina o regime de infiltração e o excesso, por conseguinte, gera o escoamento superficial, ver esquema na Figura 3.

**Figura 3** -Esquema mostrando a relação entre a taxa de infiltração e a intensidade de chuva ou de irrigação.  
Fonte: adaptado de Torres (2017).



### Hidrologia em regiões semiáridas

Para o Brasil, que possui disponibilidade hídrica superficial estimada em 8.160 km<sup>3</sup>/ano, equivalente a cerca de 18% do total do globo terrestre, o conhecimento quantitativo e qualitativo desse recurso natural de inestimável valor social, econômico e ambiental torna-se fundamental para o desenvolvimento do país (CARVALHO, 2000).

O Nordeste Brasileiro é um ambiente predominantemente semiárido caracterizado por contexto ecológico frágil com alta variabilidade espacial e temporal das chuvas, elevados índices de evaporação, histórico de anos consecutivos secos e grandes enchentes (COSTA, 2007).

Com o objetivo de regionalizar os parâmetros hidrológicos, em vários lugares no mundo, existem bacias experimentais realizando estudos hidrológicos, e seus resultados estão sendo, ou deveriam ser utilizados para um adequado manejo de bacias hidrográficas.

As bacias experimentais e representativas foram difundidas na região do semiárido do Nordeste do Brasil na década de 70 do século passado pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). O projeto FINEP/IBESA implantou uma rede de monitoramento hidrossedimentológica no Nordeste brasileiro, em parceria com as

universidades, são as bacias experimentais de: Aiuaba - CE; Riacho da Gameleira - PE; Riacho Jatobá - PE; Rio Cedro - BA; Rio Guaraira - PB; São João do Cariri - PB; e Serra Negra do Norte – RN.

Como os processos hidrológicos dependem da prática local de manejo de bacias e também dos aspectos hidrológicos, sócio-econômicos e ambientais, precisa-se implantar cada vez mais bacias experimentais e representativas, pois concebem uma rápida interação com o meio, isso ajuda na previsão de cenários de disponibilidade hídrica através do monitoramento das variáveis do ciclo hidrológico.

Para Tucci (2004), a bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. Pode ser conceitualmente entendida como uma área definida topograficamente, drenada por um curso de água ou um sistema conectado de cursos d'água tal que toda vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída. Também, tem sido utilizada como uma unidade geomorfológica fundamental. Isso se deve ao fato de suas características governarem, no seu interior, todo o fluxo superficial da água. Assim, vem sendo considerada uma unidade territorial ideal para o planejamento integrado do manejo dos recursos naturais (TONELLO, 2005), bem como, para gestão dos recursos hídricos.

Em razão da preocupação com a gestão hídrica, optou-se pela escolha da bacia hidrográfica como “recorte” territorial, pois a adoção da bacia hidrográfica, no caso brasileiro, constitui a unidade físico-territorial para o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos, como estabelecido na Lei Federal 9.433/97.

A Política Nacional de Recursos Hídricos, regida pela Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal, estabelece em seu art. 1º – inciso V: “A bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.”

Carvalho (2014) propõe a adoção da unidade territorial “Bacia Hidrográfica” como uma alternativa para o planejamento e gerenciamento ambiental, destacando algumas vantagens e desvantagens. O autor argumenta que a rede de drenagem de uma bacia pode ser capaz de indicar relação causa-efeitos, particularmente aquelas que envolvem o meio hídrico. Entre as desvantagens no planejamento e gerenciamento, o autor argumenta que nem sempre os limites municipais e estaduais respeitam os divisores da bacia.

Os estudos sobre a dinâmica do relevo em bacias hidrográficas vêm adquirindo grande importância como suporte técnico-científico para a análise ambiental e gestão de bacias

hidrográficas, servindo de subsídio para o planejamento urbano, rural e ambiental do espaço físico-territorial.

A adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento não é uma unanimidade entre os países. Segundo Collares (2000) vários países da Europa, como por exemplo, Alemanha, Áustria, Bélgica, Dinamarca e Suécia, adotam limites administrativos para realizar a gestão de suas águas. Entre os países que adotam os limites definidos por bacias hidrográficas estão França, Espanha, Grécia, Portugal, Reino Unido e os Estados Unidos.

Para efeito de comparação, procura-se estabelecer uma classificação quanto ao tamanho da bacia, entretanto não existe consenso quanto à classificação das áreas das bacias hidrográficas. Alguns autores consideram como bacias pequenas aquelas com área inferior a 3 km<sup>2</sup>, bacias médias, com área variando de 3 km<sup>2</sup> a 1.000 km<sup>2</sup> e bacias grandes com área superior a 1.000 km<sup>2</sup>. Para Wisler e Brater (1964) *apud* Borsato e Martoni, (2004), bacias pequenas são as que possuem área inferior a 10 milhas quadradas (26 km<sup>2</sup>) e bacias grandes aquelas com área superior a esse valor.

O estudo das bacias de drenagem dentro da geomorfologia iniciou-se com a identificação de suas leis básicas, expressas de modo matemático por Horton (1945), Strahler (1954) e Gregory e Walling (1973), segundo Scheidegger (1968).

A hierarquia da rede hídrica cria as ordens dos rios, que permitem ordenar toda a bacia hidrográfica. A ordenação começa com os rios de primeira ordem, que são os rios sem tributários e o encontro de rios de mesma ordem, cria um novo rio a jusante, de uma ordem superior. Em toda a bacia o rio de maior ordem é chamado de rio principal e dá a ordem da bacia como um todo. Essa ordenação permite que se crie vários índices que caracterizam a bacia hidrográfica em estudo. Esses índices são determinados através das Leis de composição de drenagem, proposta por Horton (1945).

### **Fatores que influenciam no escoamento superficial**

Para Velloso (2016), após iniciado o processo de precipitação nos continentes, a água proveniente das chuvas pode encontrar três destinos: retenção pela cobertura vegetal, infiltração na matriz edáfica e/ou armazenamento em depressões superficiais, ou escoamento sobre a superfície terrestre.

Entre as fases básicas do ciclo hidrológico a do escoamento superficial é importante, por tratar da ocorrência e transporte de água na superfície terrestre, tendo em vista que a maioria dos estudos hidrológicos está ligada ao aproveitamento da água superficial e à

proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento (VILLELA; MATTOS, 1975).

Iniciada a precipitação pluviométrica, parte dela é interceptada pela vegetação, parte infiltra no solo e parte pode ser retida em depressões da superfície do terreno. Se a duração da chuva continuar, após o preenchimento dessas depressões, terá início o escoamento superficial propriamente dito. Assim, a água que escoar sobre a superfície do solo, sem infiltrar, formará a enxurrada que irá compor, junto com o escoamento de base, os córregos, ribeirões, rios, lagos e reservatórios (CHOW *et al.*, 1988).

Os fatores que influenciam o escoamento superficial podem ser de natureza edafoclimática e/ou fisiográfica. Entre os fatores climáticos, destaca-se a intensidade e a duração da precipitação, pois quanto maior a intensidade, mais rapidamente o solo atinge a sua capacidade mínima de infiltração, aumentando a probabilidade de haver excesso de precipitação, que escoará superficialmente. A intensidade pode ser avaliada em cinco categorias, de acordo com Moraes (2007), ver Tabela 1.

**Tabela 1** – Classificação das intensidades de chuva

<b>Intensidade (mm/h)</b>	<b>Classificação</b>
< 2	Suave
2 - 20	Moderada
20 - 50	Forte
50 - 90	Muito Forte
> 90	Torrencial

Fonte: MACEDO, J. R. *apud* MORAIS, M. F. de (2007).

De Figueiredo *et al.*, (2016), estudando o escoamento na BEA, identificou que a umidade média antecedente do solo associado a precipitação, não consegue explicar nem 20% dos eventos com escoamento. Entretanto, a umidade do solo tem importância, para os casos estudados, pois 47% dos eventos com escoamento ocorreram quando a umidade encontrava-se na faixa alta, 34% na faixa média e somente 19% na faixa baixa.

Pruski, Brandão e Silva (2004) afirmaram que o escoamento superficial corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relacionado ao deslocamento das águas sobre a superfície do solo. O conhecimento deste segmento é de fundamental importância, pois a maioria dos estudos hidrológicos está ligada ao aproveitamento da água superficial e a proteção contra os fenômenos provocados pelo seu deslocamento.

De acordo com Sistema Nacional de Informação Geocientífica, de Portugal - Léxico de Termos Hidrogeológicos INETI (2009), pode-se definir escoamento superficial como a “parcela da precipitação que flui por ação da gravidade de modo não organizado, das zonas mais elevadas para as zonas mais baixas, concentrando-se em pequenos riachos que se reúnem em ribeiros e mais tarde em rios. Esta água irá terminar em lagos, mares ou oceanos, podendo infiltrar-se no terreno ou evaporar-se para a atmosfera. A magnitude do escoamento superficial depende da intensidade da precipitação, permeabilidade do terreno, duração e frequência da precipitação, tipo de cobertura vegetal, área da bacia de drenagem, distribuição espacial da precipitação, geometria dos rios e riachos e declive dos terrenos”.

Dependendo da sua origem, o escoamento em cursos de água pode subdividir-se nas seguintes formas: escoamento superficial; escoamento subsuperficial (hipodérmico); escoamento subterrâneo e precipitação direta sobre a superfície livre.

O escoamento superficial pode ser dividido em componentes, com destaque para o escoamento superficial direto e o escoamento de base ou subterrâneo. O primeiro componente resulta da parcela da precipitação que excede a capacidade de infiltração do solo e escoam sobre a sua superfície, gerando cheias; é frequente quando ocorrem precipitações muito intensas e/ou quando o solo já está muito umedecido e com capacidade de infiltração reduzida. Esta parcela do escoamento é conhecida como precipitação efetiva ou deflúvio superficial e sua importância está diretamente associada a dimensionamentos hidráulicos, como barragens, terraços, bacias de contenção e controle da erosão hídrica (TUCCI, 2000; PRUSKI *et al.*, 2003).

O escoamento superficial é a parte da escorrência que viaja sobre a superfície e canais e alcança a saída da bacia, seu exutório. A parte do escoamento superficial que flui sobre a superfície em direção aos canais chama-se escoamento de encosta e a outra parcela escoamento em linha de água (SILVA, 2007).

Segundo Lima (2010), o deflúvio de uma bacia hidrográfica pode ser considerado como o produto residual do ciclo hidrológico, o qual é influenciado por três grandes grupos de fatores: clima, fisiografia e uso do solo.

**Clima:** os fatores climáticos são importantes na determinação do deflúvio, pois influenciam tanto a precipitação quanto a evapotranspiração.

Com relação à precipitação, não apenas a quantidade de chuva, mas também aspectos relacionados com o padrão da chuva, a intensidade, a duração, a distribuição temporal e a distribuição espacial em relação à bacia, etc. são importantes na determinação do hidrograma.

Com relação à evapotranspiração, são importantes fatores tais como temperatura do ar, ventos, pressão atmosférica, radiação solar e umidade relativa do ar. Além destas variáveis, a evapotranspiração está relacionada com a cobertura vegetal da bacia hidrográfica.

**Fisiografia:** as características físicas da bacia hidrográfica influenciam a formação do deflúvio de várias maneiras: a declividade influencia os processos de infiltração, fluxo de água no solo, escoamento superficial e na velocidade de escoamento superficial. (BELTRAME, 1994); a altitude é outra característica importante a considerar, em maiores altitudes a precipitação média anual é maior, assim como são menores a temperatura e a evapotranspiração. Outro coeficiente interessante de incluir no estudo do potencial de escoamento em bacias hidrográficas é a densidade de drenagem.

Os coeficientes fisiográficos fluviais, utilizados no estudo das bacias hidrográficas (como declividade, curva hipsográfica, altitude média, coeficiente orográfico e densidade de drenagem), são apenas instrumentos auxiliares na avaliação preliminar dos recursos hídricos, e não devem ser considerados como elementos finais.

**Uso do solo:** a cobertura vegetal, pela sua influência sobre processos hidrológicos tais como interceptação, transpiração, infiltração, percolação, etc., constitui-se num dos fatores mais importantes que afetam a produção de água em microbacias.

O uso adequado do solo, favorecendo a infiltração, permite também maior controle das oscilações das vazões nos cursos d'água, à medida que diminui as vazões máximas produzidas nestes e possibilita o armazenamento de maior volume de água no solo, a ser disponibilizado nos períodos de estiagem.

Características físicas do solo, como textura, declividade e profundidade efetiva, influem muito na capacidade de infiltração e, conseqüentemente, no escoamento da água da chuva (BELTRAME, 1994).

De acordo com Braga Jr. e Conejo (1983), o estudo do escoamento superficial não deve ser visto de maneira isolada, e sim com clara compreensão de que os dois processos (infiltração, escoamento) ocorrem simultaneamente. Essa interação se faz presente na variação das taxas de infiltração, que possibilita a ocorrência de escoamento superficial quando as taxas de infiltração são pequenas e inibe o escoamento quando as taxas de infiltração são altas. Alguns fatores influenciam significativamente a velocidade do escoamento superficial, tais como: declividades moderadas e vegetação densa, o que permite que a água nesse trajeto se infiltre.

Segundo Vilella e Mattos (1975), é fundamental que se conheçam a precipitação e o escoamento superficial em uma bacia porque, dessa maneira, é possível calcular, por diferença, sua capacidade de infiltração. Esta capacidade englobará também toda a

interceptação e armazenagem nas depressões. A maioria dos autores ressalta que o fato de a capacidade de infiltração englobar a interceptação e o armazenamento nas depressões, não compromete a solução de problemas de um projeto, pois, em geral, o que se pretende é conhecer o escoamento superficial resultante de certa precipitação, conhecida a capacidade de infiltração.

Tucci (2000) afirma que o escoamento superficial é a parcela do ciclo hidrológico em que a água se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida; quando a bacia é rural e dependendo da quantidade e do tipo de cobertura vegetal, o escoamento sofre interferência dessa cobertura e grande parte dele se infiltra. Quando se trata de bacias urbanas, o escoamento sofre ação antropogênica que pode resultar em superfícies impermeáveis e sistemas de esgotos pluviais.

Para Reis (2009), diversos são os fatores que influenciam o escoamento superficial, dentre os quais podem-se destacar os de natureza climática e fisiográfica. Dentre os fatores de natureza climática, destacam-se a intensidade, a duração da chuva e a precipitação antecedente, ou seja, a condição de umidificação da bacia. Como fatores de natureza fisiográfica, ou seja, mais ligados às características físicas da bacia, pode-se apontar a área da bacia de contribuição; a conformação topográfica da bacia (declividades, depressões acumuladoras e retentoras de água, forma da bacia), condições da superfície do solo e constituição geológica do sub-solo (existência de vegetação, florestas, capacidade de infiltração, permeabilidade do solo, natureza e disposição das camadas geológicas) e as obras de controle e utilização da água à montante (irrigação ou drenagem do terreno, canalização ou retificação de cursos d'água, construção de barragens).

Nóbrega (2014) estudando os impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP, observou com relação aos componentes do balanço hídrico, num cenário em que ocorre diminuição da precipitação e o aumento da temperatura tende a aumentar a evapotranspiração e a transpiração, enquanto que a evaporação e a infiltração diminuem. Este resultado induz a um possível estresse hídrico, uma vez que a transpiração aumenta, porém a oferta hídrica diminui em 20%. Isso alerta no sentido que pesquisas relacionadas também devem acontecer em outros biomas. No semiárido e especialmente na Caatinga as trocas hídricas entre o solo-planta-atmosfera poderá ser decisivo no entendimento de cenários com escassez hídrica.

Para Silva *et al.*, (2015) a disponibilidade de água no solo está diretamente ligada disponibilidade hídrica na atmosfera que é controlada por processos de evaporação e transpiração. Além disso, o monitoramento e a modelagem dessa variável ao longo do tempo tornam-se indispensáveis, para subsidiar ações de manejo e conservação do solo e água.

## **Umidade do solo e condutividade hidráulica saturada**

O solo é um dos compartimentos de água de maior importância em uma bacia hidrográfica. A vegetação depende majoritariamente da água retida pelo solo para atender às suas demandas; e o início do escoamento superficial depende fortemente da umidade inicial do solo (COSTA *et al.*, 2016). Além disso, esses processos são fortemente influenciados pelas propriedades hidráulicas do solo em toda sua complexidade e heterogeneidade.

O conhecimento da água disponível para as plantas no compartimento solo é de grande interesse para as ciências agrárias e ambientais, de modo particular nas regiões de escassez hídrica e/ou de conflito pelo acesso à água no globo (COSTA, 2012).

A umidade do solo é fundamental para a sustentabilidade do ecossistema em regiões semiáridas, e caracterizar a resposta da variação temporal da umidade do solo para diferentes tipos de vegetação é importante para avaliar a sustentabilidade da recuperação da vegetação.

Para Salvador (2012) a armazenagem de água no solo é muito variável no tempo e no espaço devido à influência de vários fatores ambientais e topográficos. Devido à heterogeneidade dos solos, suas propriedades e, conseqüentemente, a armazenagem de água, que está relacionada com a maior ou menor disponibilidade e absorção de água pelas plantas, variam consideravelmente no espaço. Além disso, a profundidade escolhida para o estudo da armazenagem de água certamente deve interferir na magnitude da variabilidade.

A condutividade hidráulica pode ser definida como o volume de água que atravessa por unidade de tempo uma determinada área do solo impulsionada por uma diferença de potencial. Isso permite concluir que a condutividade é um coeficiente que expressa a facilidade com que um fluido, a água, é transportada através do meio poroso, o solo, e que depende tanto das propriedades do solo como das propriedades da água (REICHARDT, 1987).

A condutividade hidráulica saturada do solo representa um parâmetro chave para análise da intensidade do deslocamento da água no solo, a infiltração, e, portanto de grande importância na avaliação do escoamento superficial.

## **Eventos de precipitação no Semiárido**

Essa região e diversas outras localidades do mundo encontram-se num grupo de regiões que enfrentam profundos problemas relativos à água. São regiões conhecidas pela semiaridez, pela degradação do solo e marcadas pela grande variabilidade de fatores climáticos, com regime pluviométrico geralmente concentrado (3 a 4 meses) e mal distribuído no espaço.

Essas características da distribuição espacial e temporal das chuvas são típicas das regiões semiáridas do planeta (FURTUNATO, 2004).

Segundo a SUDENE (1980) *apud* Frischkorn, De Araújo e Santiago, (2003), no Nordeste Brasileiro em torno de 78% da chuva corresponde à evapotranspiração real, 13% representam o deflúvio e 9% é percolado. De acordo com Duque (1980) *apud* Costa, (2007) é comum em anos chuvosos que metade da precipitação se concentre em um mês, com eventos isolados e elevada variabilidade espacial.

Para Silva *et al.*, (2012) é uma região que apresenta um clima bastante irregular com relação aos índices pluviométricos, e estará sempre sujeito a secas periódicas, com ocorrência de precipitações irregulares e mal distribuídas no espaço. Diante dessas irregularidades também ocorre uma presença frequente de eventos extremos e uma elevada quantidade de eventos pluviométricos (de baixa magnitude) inferiores a 30 mm (ANDRADE *et al.*, 2013). Para a Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) a concentração temporal das chuvas pode também ser observada pelos eventos extremos: por exemplo, para um período de retorno 2 anos a precipitação diária é de 75 milímetros (15% da precipitação anual); Considerando um período de retorno de 5 anos, ultrapassa um pouco 100 milímetros (20% da precipitação anual), enquanto uma grande quantidade de eventos de baixa magnitude foi observado 84% do número total de eventos (De FIGUEIREDO *et al.*, 2016).

## MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento da metodologia da pesquisa está descrito conforme o fluxograma apresentado na Figura 4.

**Figura 4 – Fluxograma das atividades previstas no desenvolvimento deste capítulo.**



### Instrumentação de campo e monitoramento hidrológico

A bacia tem sido monitorada, entre outros, em termos de precipitação, umidade do solo, a evaporação (tanque classe A), descargas fluviais e nível de água do reservatório. Na saída há um reservatório de 60.000 m<sup>3</sup> (para o qual a relação cota/área/volume é conhecido), cujo nível de água é registrado automaticamente a cada hora. As vazões dos dois principais riachos que correm para o reservatório também foram monitoradas automaticamente: estação de medição EF1 consiste em uma calha Parshall e controla 75% da área da bacia hidrográfica; considerando que a estação de EF2, que consiste de um vertedouro triangular, controla 16% da área.

### Separação dos eventos de precipitação

Dificuldades metodológicas na escolha de um critério para separação dos eventos chuvosos são comuns em estudos específicos sobre o tema. Para essa finalidade, foi analisada a literatura especializada: Istok e Boersma (1986), Grottker, (1987), Moura (2005), SHI Z. *et al.*, (2009), Worrall (2007).

Para a presente pesquisa, adotou-se a metodologia aplicada por De Figueiredo (2011), na qual se admitiu-se que um evento é caracterizado com aquele episódio de chuva com precipitação maior ou igual a 10 mm (chuvas inferiores a 10 mm são consideradas desprezíveis na geração de escoamento por todos os autores que, anteriormente, estudaram a hidrologia da BEA) seguido e antecedido por um intervalo de seis horas com precipitações inferiores a 1mm nesse intervalo.

### **Cálculo do escoamento superficial em bacias hidrográficas do semiárido**

A avaliação do escoamento foi realizada pelo balanço hídrico (Equação 1) no reservatório que controla o escoamento no exutório.

$$\Delta V/\Delta t = (Q_R + Q_G + Q_H) - (Q_U + Q_I + Q_E + Q_S) \quad \text{Eq. 1}$$

Na Equação 1, t é o tempo, V é o volume armazenado no reservatório e Q são as descargas de entradas ou saídas do reservatório. Os seguintes índices de descarga têm sido utilizados: R refere-se ao escoamento; G para as águas subterrâneas; H a precipitação; U para o uso da água; I para infiltração; E para evaporação; e S para saída no vertedouro. A contribuição de  $Q_G$  é insignificante na BEA, conforme medidas geofísicas realizadas *in situ* e verificadas através de poços de controle;  $Q_H$  é a precipitação multiplicada pela área inundada;  $Q_U$  é de  $1(\text{um}) \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$  (medições de campo);  $Q_I$  é avaliada como 30% da evaporação do tanque classe A (MAMEDE *et al.*, 2012) vezes a área inundada;  $Q_E$  é a taxa de evaporação do tanque classe A vezes o fator de correção tanque (0,70: ver LINACRE, 1994) vezes a área inundada; e  $Q_S$  é estimado com base na curva do vertedouro. No entanto, durante o período de análise, nenhum vertimento foi observado.

Os eventos para os quais o escoamento específico (volume de recarga por área de abrangência do espelho d'água) na saída da bacia ultrapassaram 0,1 milímetros foram classificados como “eventos com escoamento”. O valor de tolerância (0,1 mm por evento) foi introduzido devido ao processo de estimativa  $Q_R$ , com incertezas na precipitação, evaporação, o nível de água do reservatório, nas curvas de cota/área/volume e vazão ( $Q_G$ ,  $Q_u$  e  $Q_i$ ). Os

eventos com escoamento entre zero e 0,1 milímetros foram designados como eventos com “escoamento negligenciável”.

Além disso, as medições de vazão foram realizadas nos dois principais riachos com vista a uma análise comparativa de geração de escoamento nas duas sub-bacias de captação. Os dados medidos a partir das estações não poderiam ser utilizados para avaliar o escoamento na bacia principalmente porque (i) a estação de EF2 foi instalada somente em 2009, o que seria privar a análise de quatro anos; (ii) vários eventos não foram registradas simultaneamente em ambas as estações. A exclusão dos eventos insatisfatoriamente monitorados (principalmente na estação chuvosa precoce) iria introduzir uma tendência indesejável na série. Além disso, o número de eventos de escoamento é bastante limitado na Caatinga, e todos os dados disponíveis devem ser utilizados para fornecer uma análise mais consistente.

### **Análises estatísticas**

A fim de investigar quais forças motrizes explicam melhor o início do escoamento superficial, foram analisadas estatisticamente onze variáveis hidrológicas geralmente associadas ao início do escoamento: precipitação total e com 5 dias antecedente; umidade antecedente do solo; duração da precipitação; e intensidade de chuva (média e máxima dentro de 5, 15, 30, 45, 60 e 120 minutos). Para maior clareza da pesquisa, os eventos com precipitação total abaixo de 10 mm foram desprezados. Na verdade, os dados de campo mostraram que nenhum destes eventos foi capaz de gerar escoamento. A avaliação foi feita através da Análise de Componentes Principais (ACP: PEARSON, 1901), bem como a análise de correlação canônica (CC: HARDOON *et al.*, 2004). A aplicação ACP foi precedida pela apreciação da medida Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) de adequação da amostra. A medida KMO (0,841) superou 0,8, assim o ACP poderia ser aplicado no presente estudo.

Considerando-se que tanto ACP e CC correlacionam a magnitude do escoamento com as variáveis selecionadas, a própria grandeza tem influência sobre os resultados. No entanto, nosso objetivo foi investigar a iniciação do escoamento. Portanto, era necessária a análise visual de gráficos.

### **Análises gráficas**

Para investigar quais variáveis melhor explicam a iniciação do escoamento superficial, vinte gráficos com três conjuntos de dados (eventos com, sem ou com escoamento insignificante) foram plotados para diferentes variáveis no eixo. Para cada gráfico, foram

considerados os melhores critérios de separação (Tabela 2) e a eficiência de separação ( $\eta$ ) calculada, como na Equação (2).

$$\eta = (N_1 + N_3)/N_{TV} \quad \text{Eq. 2}$$

Na Equação (2),  $N_1$  é o número de eventos na região R-1 (isto é, a região onde todos os pontos representam eventos sem escoamento, veja a Figura 5);  $N_3$  é o número de eventos na região R-3 (isto é, a região onde todos os pontos representam eventos com escoamento superficial, ver Figura 5); e  $N_{TV}$  é o número total de eventos, excluídos aqueles com escoamento insignificante ( $N_{TV}$  é igual a 92).

### **Umidade e condutividade hidráulica saturada do solo**

A condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) foi medida com um Amoozímetro, um permeâmetro de carga constante compacto projetado por Amoozegar (1989a) para medições *in situ* na zona não-saturada (vadosa). O método Amoozimeter têm sido utilizados com sucesso para avaliar  $K_{sat}$  em várias investigações, conforme relatado por Zimmermann *et al.*, (2006); Ziegler *et al.*, (2006); Price *et al.*, (2010); Scheffler *et al.*, (2011); e Salemi *et al.*, (2013).

A avaliação da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) na bacia utilizou o permeâmetro conhecido como Amoozímetro (AMOOZEGAR, 1989a), cuja instalação experimental requer a remoção da matéria orgânica da superfície do solo em torno do ponto de amostragem, perfurando um furo de raio  $r$  (2,5 cm, neste caso) e estabelecendo uma carga de água constante  $H$  no furo sob a restrição de  $H/r > 5$ . Então o  $K_{sat}$  pode ser calculado a partir da taxa de infiltração do estado estacionário fornecida pela equação de Glover (AMOOZEGAR, 1989b). A condutividade foi avaliada dentro do leito dos rios (47 amostras com distância média entre as medidas de 200 m); No fundo do vale fora do leito (76 amostras em linhas perpendiculares à direção principal do leito); E na encosta (56 amostras com distância média entre as medições de 30 m), como pode ser representado na Figura 1. No total, 96 amostras permitiram a estimativa da condutividade nas profundidades de 0-20 cm; Enquanto que apenas 83 amostras puderam ser averiguadas nas profundidades de 20-40 cm devido a camadas com rochas aflorando. Para entender as diferenças de  $K_{sat}$  entre as duas profundidades do solo e entre as unidades de paisagem, o teste não-paramétrico Kruskal-Wallis (SALEMI *et al.*, 2013, HASSLER *et al.*, 2011, SCHEFFLER *et al.*, 2011) de classificação foi usado. Caso apareçam diferenças significativas, o teste U não-paramétrico de Mann-Whitney foi utilizado para identificar os grupos homogêneos. Esses testes não paramétricos foram aplicados porque os dados em massa não apresentaram distribuição normal ou homocedasticidade (usando um teste

de Shapiro-Wilk e as transformações Box-Cox, respectivamente). Como os dados de Ksat não apresentaram distribuição normal, a mediana foi utilizada como medida de tendência central. A relevância dos dados Ksat foi principalmente para avaliar o processo predominante de iniciação ao escoamento na Bacia Experimental de Aiuaba.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Precipitação e escoamento na BEA

Uma visão geral dos resultados da BEA de 2005 a 2014 é apresentada na Tabela 2, que deve fornecer aos leitores informações hidrológicas detalhadas de uma região extremamente escassa de dados (COSTA *et al.*, 2013). Na década, ocorreram 444 eventos pluviométricos, dos quais 118 apresentaram precipitação individual acima de 10 mm (74% do total de chuvas no período). A duração média da chuva foi de 7 h e o máximo de 27 h. Em média, a precipitação anual no período foi de 490 mm, o que corresponde aproximadamente (-13%) à precipitação média de longo prazo (560 mm.ano<sup>-1</sup>). Embora a precipitação na Caatinga seja semelhante à observada em muitos biomas (por exemplo, NAVARRO HEVIA *et al.*, 2014), o escoamento é intensamente concentrado em poucos eventos (MEDEIROS e De ARAÚJO, 2014). Para o período de monitoramento, por exemplo, houve anualmente, apenas 12 dias com precipitação acima de 10 mm: e quatro dias com escoamento. A concentração temporal da precipitação também pode ser observada pelos eventos extremos: por exemplo, a precipitação diária para um período de retorno de dois anos é de 75 mm (15% da precipitação anual); enquanto a precipitação para um período de retorno de 5 anos ultrapassa os 100 mm (20% da precipitação anual).

Durante a década de investigação, apenas 45 eventos (10%) foram capazes de iniciar o escoamento; enquanto que 24 (5%) induziram descarga desprezível; e 375 (85%) não geraram escoamento superficial, resultado semelhante ao obtido por Istok e Boersma (1986) em pequenas bacias hidrográficas de clima marinho no Norte dos EUA. O coeficiente de escoamento na BEA é extremamente baixo (0,44%), resultando em 2,2 mm.ano<sup>-1</sup>, enquanto que dois medidores a jusante na bacia do rio Jaguaribe (Malhada e Iguatu, com 3.460 km<sup>2</sup> e 20.700 km<sup>2</sup> de bacias hidrográficas) escoaram 1,7% e 4,1%, respectivamente. O coeficiente crescente de escoamento na direção a jusante (i) segue um aumento na precipitação média anual (490, 570 e 650 mm de 2005 a 2014 nas bacias hidrográficas: BEA, Malhada e Iguatu, respectivamente); (ii) acompanhado a isso também segue o aumento da degradação da vegetação; e (iii) também pode indicar que a água infiltrada nas cabeceiras retorna como fluxo superficial. De Araújo *et al.*, (2006) avaliou o coeficiente de escoamento de várias bacias de meso-escala (10<sup>2</sup> - 10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>) na região semiárida brasileira, e concluiu que é tipicamente na faixa de 3% a 9%.

**Tabela 2 -** Dados monitorados dos 118 eventos com precipitação total superior a 10 mm na Bacia Experimental de Aiuaba (2005 - 2014) e respectiva data, precipitação, escoamento, coeficiente de escoamento (RC), intensidade da precipitação (Iav: média; I<sub>5</sub>: 5 minutos ; I<sub>15</sub>: 15 minutos; I<sub>30</sub>: 30 minutos; I<sub>45</sub>: 45 minutos; I<sub>60</sub>: 60 minutos e I<sub>120</sub>: 120 minutos) e teor de umidade do solo antecedente à profundidade de 0,20 m

N	Data	Precipitação (mm)	Escoamento (mm)	RC (%)	Precipitação (mm/h)						Umidade do Solo Antecedente (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	
					Iav	I <sub>5</sub>	I <sub>15</sub>	I <sub>30</sub>	I <sub>45</sub>	I <sub>60</sub>		I <sub>120</sub>
1	15/01/2005	92,65	0,45	0,49	6,23	85,30	75,20	57,40	49,45	45,97	32,6	0,21
2	20/01/2005	82,77	2,16	2,61	29,2	170,70	135,12	131,0	101,60	78,22	40,5	0,30
3	24/01/2005	18,26	0,05	0,27	5,22	76,20	52,84	33,02	23,01	17,76	8,88	0,31
4	26/01/2005	49,70	0,80	1,61	4,03	134,10	105,68	65,54	45,73	34,80	17,4	0,32
5	15/02/2005	57,32	0,18	0,31	7,74	121,90	106,68	72,64	53,17	42,68	23,3	0,25
6	15/03/2005	10,37	0,03	0,29	4,99	33,53	27,40	15,72	11,48	9,36	5,06	0,23
7	25/03/2005	10,40	0,03	0,29	13,8	45,72	36,56	20,30	13,53	10,40	5,20	0,24
8	05/12/2005	77,79	0,16	0,21	3,40	60,96	54,84	43,16	37,23	35,80	25,3	0,14
9	07/12/2005	17,70	0,00	0,00	3,66	15,24	12,20	9,66	8,47	7,62	5,07	0,25
10	05/02/2006	30,32	0,00	0,00	5,26	100,60	67,04	44,70	30,81	23,11	11,5	0,22
11	06/02/2006	22,81	0,14	0,61	4,22	60,96	47,76	24,88	16,59	12,44	8,38	0,23
12	18/02/2006	20,05	0,10	0,50	40,1	106,70	70,08	39,60	26,73	20,05	10,0	0,31
13	20/03/2006	30,42	0,06	0,20	2,17	45,72	22,36	15,76	10,51	8,13	5,45	0,23
14	23/03/2006	38,86	0,08	0,21	5,69	76,20	49,80	36,60	28,80	21,85	15,5	0,31
15	05/04/2006	10,92	0,01	0,09	33,0	60,96	41,68	21,84	14,56	10,92	5,46	0,26
16	09/04/2006	16,74	0,03	0,18	10,0	70,10	48,76	29,46	20,99	15,74	8,37	0,29
17	09/04/2006	55,12	0,40	0,73	83,5	134,10	109,72	101,1	73,49	55,12	27,5	0,31
18	19/04/2006	17,96	0,00	0,00	5,27	73,20	43,68	24,88	16,92	12,69	6,97	0,29
19	21/04/2006	10,62	0,00	0,00	1,46	15,24	12,20	9,14	7,44	6,59	4,68	0,31
20	01/05/2006	79,10	0,45	0,57	4,61	91,40	81,28	59,44	49,11	41,15	25,1	0,30
21	23/10/2006	11,90	0,00	0,00	5,29	27,43	21,32	15,74	11,16	9,13	5,83	0,16
22	18/11/2006	28,40	0,03	0,11	4,49	64,01	43,68	36,58	30,83	24,13	13,7	0,22
23	01/02/2007	10,89	0,00	0,00	3,11	18,29	13,20	9,14	9,81	8,89	5,32	0,20
24	14/02/2007	58,64	0,14	0,24	3,85	39,62	35,56	25,40	21,68	18,80	12,1	0,23
25	16/02/2007	11,16	0,00	0,00	11,9	27,43	25,40	18,30	13,55	10,91	5,45	0,33
26	18/02/2007	67,47	0,26	0,39	3,48	67,06	58,92	42,16	32,51	24,88	14,8	0,33
27	20/02/2007	47,41	0,34	0,72	4,38	42,67	30,52	22,86	17,28	14,99	12,3	0,32
28	23/03/2007	26,40	0,01	0,04	9,07	48,77	39,60	32,50	28,09	24,63	13,0	0,30
29	07/04/2007	26,40	0,00	0,00	22,3	57,91	31,48	30,46	29,45	22,09	11,1	0,33
30	14/04/2007	13,71	0,00	0,00	23,6	79,20	48,76	26,92	18,28	13,71	6,86	0,32
31	18/04/2007	53,53	0,43	0,80	5,14	152,40	106,68	89,90	65,36	49,27	25,0	0,33
32	19/04/2007	15,74	0,13	0,83	18,9	57,91	33,52	29,46	20,65	15,74	7,87	0,33
33	22/04/2007	61,38	0,31	0,51	3,23	57,91	53,88	36,58	31,17	27,19	16,9	0,33
34	25/04/2007	21,06	0,00	0,00	6,18	18,29	13,20	10,18	8,83	8,65	8,26	0,32
35	29/04/2007	67,69	0,79	1,17	3,38	91,40	76,20	73,16	61,64	51,57	29,7	0,32
36	02/05/2007	20,30	0,21	1,03	3,32	48,77	35,56	23,38	15,59	12,44	6,47	0,32
37	20/01/2008	17,26	0,01	0,06	15,9	85,30	44,68	22,34	15,23	15,49	8,63	0,20
38	25/01/2008	12,17	0,00	0,00	3,40	51,82	27,44	14,22	9,48	7,11	5,96	0,22
39	01/02/2008	46,93	0,18	0,38	6,55	39,62	21,32	14,72	13,20	11,17	8,37	0,28
40	12/02/2008	17,74	0,01	0,06	6,45	60,96	35,56	22,86	17,61	14,73	8,25	0,24
41	17/02/2008	25,89	0,05	0,19	11,1	54,86	52,84	37,60	27,11	20,58	12,5	0,26
42	27/02/2008	111,67	1,19	1,07	9,12	94,50	74,16	59,44	54,87	50,81	26,0	0,24
43	09/03/2008	42,63	0,19	0,45	2,15	143,30	105,68	69,12	46,41	35,06	17,6	0,26
44	15/03/2008	14,73	0,00	0,00	44,6	97,50	57,92	29,46	19,64	14,73	7,37	0,32
45	16/03/2008	10,62	0,00	0,00	2,41	18,29	17,24	11,66	9,47	7,60	4,69	0,32
46	26/03/2008	25,34	0,04	0,16	3,50	45,72	28,48	22,90	15,95	12,71	8,77	0,31
47	01/04/2008	56,38	1,11	1,97	7,69	85,30	56,92	42,18	35,57	30,99	19,9	0,30
48	07/04/2008	26,90	0,64	2,38	9,24	76,20	70,08	49,78	33,19	24,89	12,5	0,32
49	14/04/2008	12,17	0,00	0,00	7,70	88,40	41,64	22,84	15,23	11,42	6,08	0,33
50	29/04/2008	13,20	0,00	0,00	2,37	36,58	29,48	23,88	25,40	12,70	6,35	0,33
51	30/04/2008	24,60	0,00	0,00	4,77	51,82	42,68	26,42	18,63	14,47	7,36	0,33
52	02/05/2008	25,64	0,16	0,62	9,94	51,82	42,68	32,50	31,49	23,62	12,7	0,33
53	08/12/2008	16,26	0,00	0,00	9,79	64,01	35,56	28,45	20,32	15,24	8,13	0,18
54	21/01/2009	29,72	0,03	0,10	3,27	27,43	14,22	9,14	6,43	5,08	4,45	0,23
55	19/02/2009	18,80	0,12	0,64	1,74	64,01	43,69	26,42	18,97	15,24	7,87	0,23
56	02/03/2009	40,13	0,10	0,25	1,49	64,01	40,64	22,86	15,92	12,70	9,27	0,23
57	03/03/2009	18,55	0,03	0,16	2,00	88,40	54,88	28,96	19,65	15,50	7,75	0,33
58	18/03/2009	20,83	0,00	0,00	1,54	57,91	49,78	28,96	19,30	14,48	7,24	0,25
59	02/04/2009	16,51	0,00	0,00	4,40	36,58	28,45	15,75	10,50	7,87	4,19	0,22
60	03/04/2009	83,82	0,28	0,3	4,68	82,30	68,07	59,94	52,15	39,37	8,00	0,25

61	04/04/2009	30,23	0,11	0,3	1,35	82,30	57,91	35,56	23,71	18,03	9,02	0,33
62	06/04/2009	44,95	0,17	0,3	5,56	125,00	91,41	59,42	46,05	34,79	17,4	0,33
63	10/04/2009	21,59	0,00	0,0	7,42	42,67	38,61	31,50	22,35	17,02	10,1	0,33
64	13/04/2009	12,70	0,00	0,0	2,35	15,24	11,18	7,11	5,42	4,83	3,18	0,33
65	20/04/2009	20,07	0,00	0,0	3,05	27,43	22,35	20,32	6,10	5,33	8,38	0,33
66	22/04/2009	12,19	0,00	0,0	1,37	36,58	28,45	16,76	11,18	8,89	4,45	0,32
67	23/04/2009	25,15	0,03	0,1	2,85	15,24	12,19	11,18	10,50	9,65	7,11	0,31
68	25/04/2009	16,76	0,00	0,0	0,86	39,62	25,40	14,22	9,48	4,32	5,59	0,32
69	01/05/2009	20,57	0,00	0,0	2,52	45,72	25,40	16,76	14,22	11,18	5,72	0,32
70	04/05/2009	19,30	0,17	0,8	5,79	57,91	37,59	36,58	25,06	18,80	9,53	0,31
71	09/05/2009	17,02	0,00	0,0	2,00	48,77	28,45	13,21	10,84	8,13	4,57	0,33
72	27/05/2009	13,46	0,00	0,0	5,38	39,62	35,56	21,34	14,22	11,94	5,97	0,33
73	30/05/2009	16,00	0,00	0,0	2,13	70,10	31,50	19,81	13,21	9,91	4,95	0,33
74	02/01/2010	18,29	0,00	0,0	13,72	51,82	43,69	33,53	23,37	17,78	9,14	0,07
75	17/01/2010	10,41	0,00	0,0	3,38	36,58	21,34	13,72	11,85	9,40	4,95	0,07
76	25/01/2010	34,04	0,35	1,0	25,53	73,20	64,01	52,32	41,32	32,51	17,0	0,06
77	27/01/2010	20,07	0,02	0,1	24,09	70,10	43,69	24,38	25,40	20,07	10,0	0,08
78	21/03/2010	108,20	2,04	1,8	5,85	64,01	49,78	37,08	32,17	29,97	19,9	0,15
79	29/03/2010	14,22	0,00	0,0	2,03	24,38	11,18	5,59	4,74	3,81	2,67	0,32
80	02/04/2010	14,73	0,00	0,0	2,90	48,77	25,40	15,24	11,18	8,38	4,32	0,33
81	09/04/2010	43,68	0,35	0,8	3,97	76,20	69,09	53,34	39,96	30,99	16,0	0,33
82	11/04/2010	61,21	1,22	1,9	5,65	42,67	36,58	29,46	27,09	23,11	16,6	0,32
83	26/02/2011	40,39	0,46	1,1	8,36	91,40	85,34	58,42	41,32	31,75	16,7	0,28
84	28/02/2011	23,62	0,02	0,0	5,68	24,38	21,34	17,78	13,89	12,95	8,89	0,28
85	01/03/2011	57,91	1,04	1,8	20,46	94,50	68,06	43,68	34,54	28,96	28,8	0,28
86	05/03/2011	72,64	1,26	1,7	6,09	60,96	52,83	48,77	35,56	32,51	19,6	0,27
87	13/04/2011	32,00	0,04	0,1	5,90	33,53	31,50	24,89	19,64	16,76	12,1	0,26
88	18/04/2011	27,18	0,06	0,2	4,94	54,86	31,50	28,45	19,98	13,72	11,5	0,25
89	03/05/2011	29,97	0,00	0,0	1,92	48,77	33,53	24,89	16,93	12,70	6,35	0,28
90	05/05/2011	49,78	0,35	0,7	3,62	57,91	43,69	33,53	26,75	21,08	14,9	0,31
91	05/05/2011	20,07	0,02	0,1	8,29	73,20	36,58	20,83	18,29	17,02	9,65	0,31
92	09/07/2011	16,00	0,00	0,0	7,11	54,86	27,43	24,89	18,29	13,72	8,00	0,24
93	17/02/2012	17,27	0,10	0,5	6,91	39,62	23,37	20,83	18,97	14,22	8,51	0,20
94	19/02/2012	19,56	0,00	0,0	1,91	9,14	7,11	5,59	5,42	5,59	3,30	0,25
95	21/02/2012	14,22	0,10	0,7	11,38	106,68	46,74	26,42	17,95	13,97	7,11	0,24
96	05/03/2012	14,99	0,00	0,0	4,38	67,06	36,58	21,84	17,27	13,72	6,99	0,19
97	10/03/2012	12,45	0,00	0,0	9,96	27,43	21,34	17,27	15,58	12,19	6,22	0,29
98	20/03/2012	15,49	0,00	0,0	2,24	42,67	22,35	12,70	9,48	8,13	4,45	0,25
99	26/03/2012	45,72	0,20	0,4	3,23	57,91	39,62	29,46	24,72	19,56	10,4	0,26
100	24/06/2012	10,92	0,00	0,0	5,25	42,67	30,48	20,83	13,89	10,41	5,33	0,19
101	03/01/2013	12,42	0,00	0,0	5,14	21,34	13,21	9,14	7,79	7,62	5,84	0,21
102	04/01/2013	29,21	0,00	0,0	4,08	82,30	71,12	47,24	34,21	26,42	14,1	0,21
103	26/03/2013	42,67	0,40	0,9	8,13	73,15	57,91	43,18	38,61	35,31	20,0	0,19
104	04/04/2013	10,92	0,00	0,0	2,85	27,43	23,37	14,22	10,84	7,87	3,94	0,19
105	19/04/2013	51,05	0,23	0,4	10,75	57,91	19,30	39,62	32,85	27,18	14,8	0,21
106	26/04/2013	22,61	0,01	0,0	2,38	33,53	29,46	21,84	17,27	13,97	8,89	0,20
107	01/05/2013	18,80	0,00	0,0	22,65	51,82	32,51	22,86	18,29	13,72	6,86	0,22
108	05/06/2013	10,92	0,00	0,0	1,80	57,91	27,43	16,26	11,51	8,64	4,45	0,21
109	22/06/2013	14,22	0,00	0,0	1,67	21,34	16,26	11,68	9,82	8,64	6,35	0,21
110	18/12/2013	11,68	0,00	0,0	3,51	24,38	19,30	14,73	11,85	10,16	5,46	0,21
111	20/12/2013	64,01	0,29	0,4	6,20	76,20	65,02	49,28	38,95	32,26	23,1	0,21
112	23/12/2013	60,71	0,15	0,2	6,28	70,10	65,02	57,40	49,45	40,13	22,4	0,20
113	30/01/2014	11,94	0,00	0,0	2,98	24,38	20,32	12,70	6,77	6,35	4,45	0,23
114	04/02/2014	31,75	0,11	0,3	5,52	33,53	32,51	22,35	17,95	17,78	13,0	0,28
115	09/02/2014	14,73	0,00	0,0	3,68	12,19	8,13	6,10	5,76	5,33	4,70	0,22
116	10/02/2014	17,27	0,00	0,0	7,75	30,48	23,37	19,30	15,92	14,22	7,87	0,22
117	11/02/2014	44,70	0,20	0,4	6,55	27,43	25,40	19,81	18,29	18,03	9,53	0,22
118	18/03/2014	14,73	0,06	0,4	16,01	27,43	25,40	23,88	18,97	14,73	7,37	0,23

A partir dos 45 eventos que geraram o escoamento superficial (Tabela 2), o escoamento médio foi de 0,17 mm por evento, com máximo de 2,0 mm em 20 de janeiro de 2005, quando a precipitação totalizou 83 mm. O maior evento de precipitação do período (27 de fevereiro de 2008) produziu apenas 1,2 mm de escoamento como resposta a precipitação de 112 mm. Entre as principais razões para o baixo coeficiente de escoamento na BEA, há altas

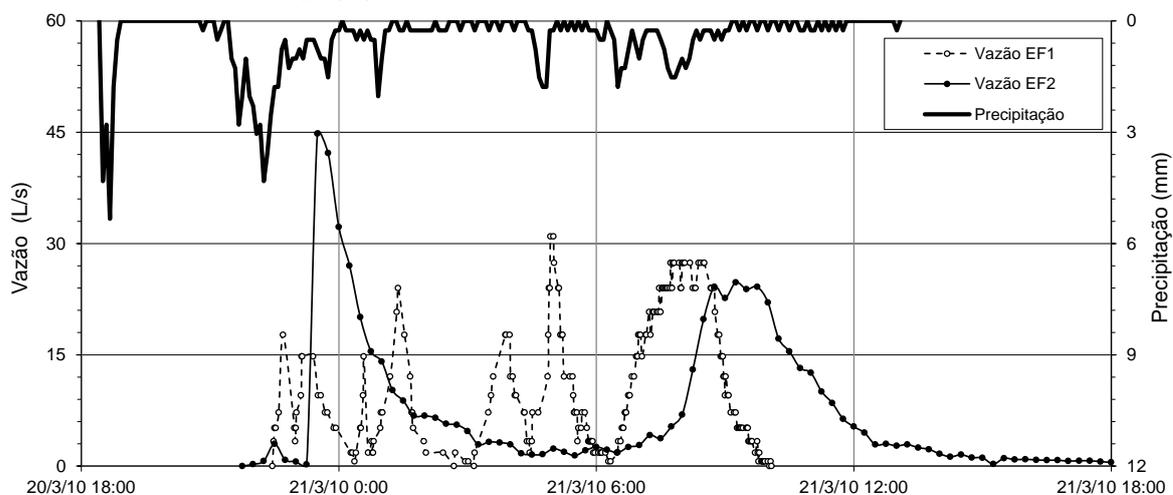
taxas de evapotranspiração potencial (cinco vezes a precipitação anual), elevadas taxas de infiltração associadas ao lençol freático e interceptação da vegetação. De fato, Medeiros *et al.*, (2009), estudando a Caatinga no BEA no período de 2004 a 2008, concluiu que 12% das chuvas (26 vezes o escoamento) consistiam em perdas de interceptação florestal, causadas principalmente pela alta taxa de evaporação, capacidade de armazenamento do tronco (0,58 mm). Para os eventos com precipitação acima de 10,0 mm, as perdas de interceptação representam 11% em média, com coeficiente de variação de 0,7. Durante o período úmido, as perdas de interceptação mensais variam de 2,0 a 20,0 mm em maio e fevereiro, respectivamente, enquanto na estação seca a precipitação total é desprezível.

O efeito das elevadas taxas de evaporação e infiltração na Caatinga provoca a redução do volume de escoamento e também diminui a capacidade de transporte de sedimentos. Esses processos, portanto, têm sido fortemente associados à desconexão de sedimentos, que é controlada pela condição de transporte do escoamento superficial na escala da bacia hidrográfica (MEDEIROS *et al.*, 2010).

### **Escoamento superficial sob diferentes condições geológicas.**

A Figura 5 mostra os resultados de diferentes respostas hidrológicas para sub-bacias hidrográficas sob diferentes condições geológicas. Para a sub-bacia sedimentar predominante ( $S_{SC}$ , 9 km<sup>2</sup>, com estação de medição EF1 em sua saída, Figura 1), a infiltração é uma variável chave, devido ao aluvião permeável profundo existente. Para a sub-bacia cristalina predominante ( $C_{SC}$ , 2 km<sup>2</sup>, cuja saída é controlada pela estação de medição EF2, Figura 1), os solos têm uma camada de impedimento laterítico na profundidade de 1 m - 2 m. Os dados para o período de análise indicam que: (i) o coeficiente de escoamento na  $C_{SC}$  é quatro vezes maior do que o  $S_{SC}$ ; (ii) as descargas máximas no  $C_{SC}$  são mais elevadas do que no  $S_{SC}$ , independentemente da sua área de captação mais pequena; e (iii) o hidrograma  $C_{SC}$  é mais resiliente do que o  $S_{SC}$ : o primeiro responde com poucos picos de descarga à precipitação pluviométrica variável no tempo, enquanto que o último apresenta vários picos de descarga íngreme como resposta aos episódios de precipitação de alta intensidade. Conclusivamente, o monitoramento no  $S_{SC}$  e no  $C_{SC}$  inferem a importância da Geologia na resposta hidrológica às chuvas na região semiárida brasileira, fornecendo informações sobre a geração inicial de fluxo superficial em bacias de drenagem efêmeras semiáridas.

**Figura 5** - Precipitação da EP1 (a cada 5 min) e hidrograma da EF1 (a cada 5 min) e EF2 (a cada 15 min) do evento chuva-deflúvio de 21/3/2010.



Assim, os dados medidos e apresentados como exemplo na Figura 5 mostram uma precipitação total de 108 mm e duração de 18 horas, o escoamento monitorado pela EF1, o volume na Scs foi de 425 m<sup>3</sup> e durou aproximadamente 12 horas, na EF2 o volume escoado pela Ccs foi de 557 m<sup>3</sup> com duração de 26 horas.

### **Fatores que influenciam no início do escoamento.**

A Tabela 3 apresenta os resultados da Análise de Componentes Principais (ACP), segundo os quais as variáveis mais relevantes quanto ao escoamento (mm) são as intensidades pluviométricas específicas (de 5 a 120 minutos), sendo  $I_{60}$  a mais relevante, seguida da precipitação total, Precipitação antecedente de 5 dias ( $H_5$ ) e duração da precipitação (D). Isto está de acordo com a análise de correlação canônica (CC), que identifica a precipitação total e as intensidades específicas como as forças motrizes mais determinantes no escoamento, seguidas por  $H_5$  e duração da chuva. No CC, no entanto,  $I_{120}$  é considerado um pouco mais significativo do que  $I_{60}$ . De acordo com ambos os métodos, a umidade do solo e a intensidade média das chuvas não afetam significativamente o escoamento superficial. Istok e Boersma (1986), ao estudar eventos de baixa intensidade em pequenas bacias hidrográficas, também concluíram que a magnitude da chuva e os eventos precedentes foram fundamentais para a compreensão da quantidade de escoamento. De acordo com os resultados desta investigação, Noto *et al.*, (2008) concluíram que os efeitos das condições iniciais "dependem fortemente da intensidade da chuva".

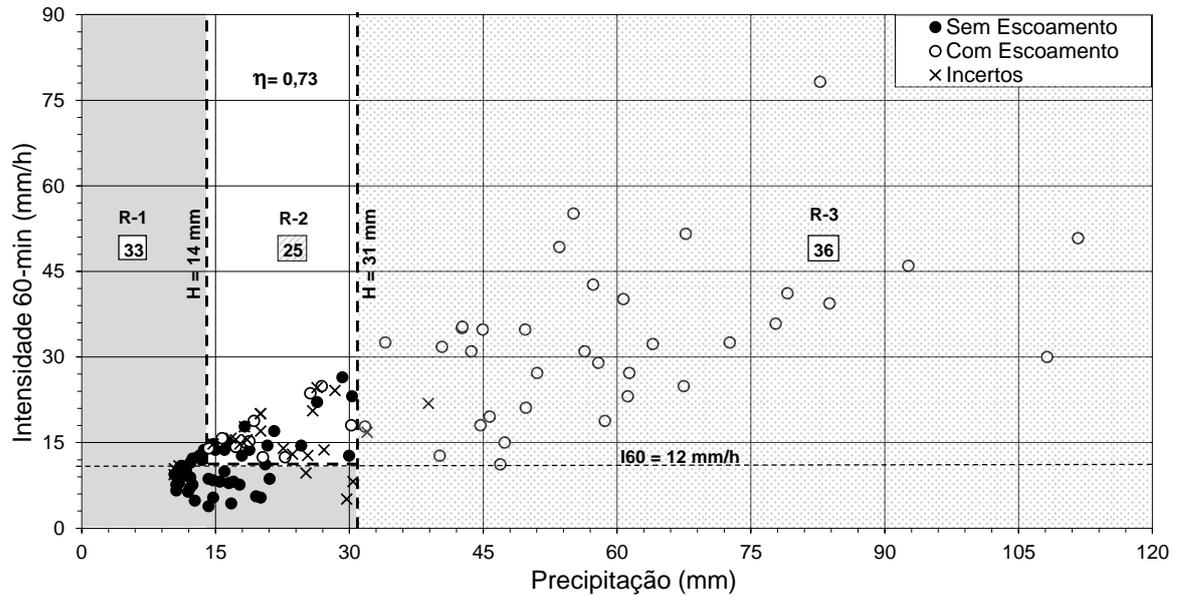
**Tabela 3** - Resultados estatísticos do escoamento (118 eventos na BEA de 2005 a 2014) versus um conjunto de variáveis usando a Análise de Componentes Principais e a Correlação Canônica.

Variáveis	Análise de Componentes Principais				Correlação Canônica		
	C 1	C 2	C 3	Ranking	Correlação	Significância	Ranking
Precipitação Total	0,823	0,401	-0,086	7	0,747	0,01	1
Duração da Precipitação	0,364	0,822	-0,069	9	0,238	0,05	9
Precipitação - 5 dias	0,530	0,458	0,314	8	0,511	0,01	7
Umidade do solo	0,079	0,028	0,959	11	0,109	n,s,	11
Intensidade média	0,388	-0,716	0,118	10	0,184	n,s,	10
Intensidade - 5 min	0,859	-0,225	0,007	6	0,497	0,01	8
Intensidade - 15 min	0,934	-0,133	-0,007	4	0,555	0,01	6
Intensidade - 30 min	0,966	-0,169	-0,014	3	0,620	0,01	5
Intensidade - 45 min	0,974	-0,112	-0,034	2	0,655	0,01	4
Intensidade - 60 min	0,977	-0,048	-0,068	1	0,691	0,01	3
Intensidade - 120 min	0,932	0,043	-0,084	5	0,726	0,01	2

\* Componente 1, 2 e 3 (C1, C2 e C3)

A Tabela 4 mostra os resultados de vinte combinações de variáveis e sua respectiva capacidade para explicar o início do escoamento na BEA no período de análise. O gráfico que melhor explicou a iniciação ao escoamento foi o da precipitação (H) contra  $I_{60}$ , seguido pelo de H versus  $I_{120}$ , enquanto que o gráfico da umidade do solo antecedente à intensidade média da precipitação teve a menor significância. Estes resultados concordam com ACP e CC (Tabela 3). Vale ressaltar, no entanto, que apesar dos resultados relativamente bons obtidos pelo gráfico de H contra  $I_{60}$  (Figura 6), a eficiência foi limitada (73%). Os dados da região R-2 (em que ambos os eventos com e sem escoamento podem ser observados, Figura 6) foram analisados em termos das demais variáveis (isto é, todas exceto H e  $I_{60}$ ), mas nenhum critério de separação efetiva poderia ser alcançado, Mostrando que mais de um quarto dos eventos não poderia ser explicado por qualquer variável da Tabela 4. Isto indica que outros processos físicos relevantes - que normalmente não são considerados na modelagem hidrológica - podem influenciar fortemente o início da escorrência no bioma semiárido da Caatinga (ver também van SCHAIK *et al.*, 2014). Tian *et al.*, (2012), após investigar a bacia do Rio Blue, EUA, também identificaram processos de captação adicionais, geralmente desconsiderados em modelos hidrológicos, como depressões superficiais, interceptação e rachaduras do solo.

**Figura 6-** Influência da precipitação total (H) e intensidade máxima de precipitação para 60 minutos ( $I_{60}$ ) na geração de escoamento na BEA (2005 - 2014) para 118 eventos ( $H > 10$  mm). A eficiência é dada por  $\eta$



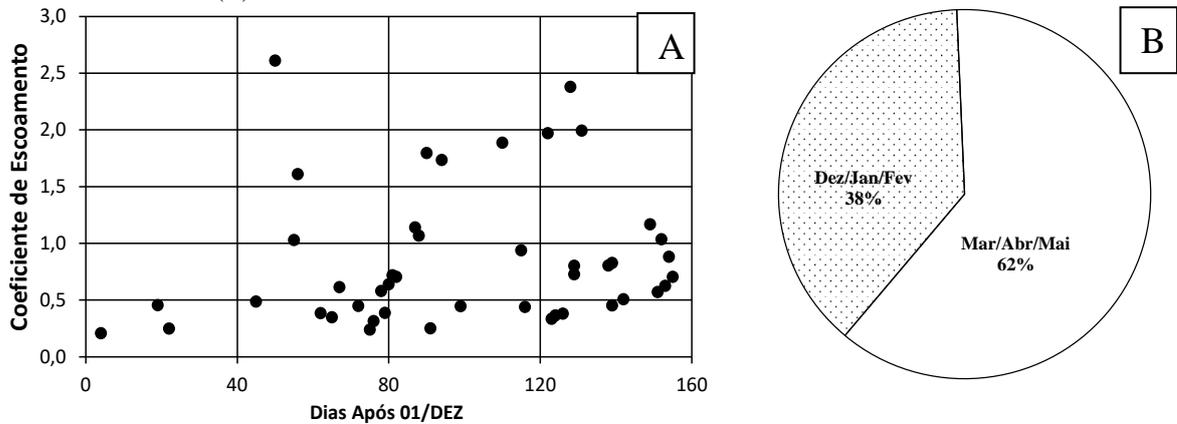
**Tabela 4 -** Eventos com e sem escoamento na Bacia Experimental de Aiuaba (2005 - 2014) e critérios de separação. A eficiência  $\eta$  é definida pela Equação 2; e 'N' é o ranking de desempenho

N	Variáveis analisadas	Critérios de separação		$\eta$
		Eventos sem escoamento	Eventos com escoamento	
1	Precipitação (H) vs. intensidade 60-min ( $I_{60}$ )	$H < 14$ mm ou $I_{60} < 12$ mm.h <sup>-1</sup>	$H > 31$ mm	0,73
2	Precipitação (H) vs. intensidade 120-min ( $I_{120}$ )	$H < 12$ mm ou $I_{120} < 6$ mm.h <sup>-1</sup>	$H > 31$ mm	0,61
3	Precipitação (H) vs. intensidade 45-min ( $I_{45}$ )	$H < 14$ mm ou $I_{45} < 10$ mm.h <sup>-1</sup>	$H > 31$ mm	0,60
4	Precipitação (H) vs. intensidade 30-min ( $I_{30}$ )	$H < 14$ mm ou $I_{30} < 12$ mm.h <sup>-1</sup>	$H > 31$ mm	0,59
5	Precipitação (H) vs. intensidade 15-min ( $I_{15}$ )	$H < 14$ mm ou $I_{15} < 23$ mm.h <sup>-1</sup>	$H > 31$ mm	0,58
6	Precipitação (H) vs. duração (D)	$H < 12$ mm	$H > 31$ mm	0,58
7	Precipitação (H) vs. umidade do solo ( $\theta$ )	$H < 14$ mm	$H > 31$ mm	0,58
8	Precipitação (H) vs. intensidade 5-min ( $I_5$ )	$H < 14$ mm or $I_5 < 31$ mm.h <sup>-1</sup>	$H > 31$ mm	0,56
9	Umidade do solo ( $\theta$ ) vs. intensidade 60-min ( $I_{60}$ )	$I_{60} < 11$ mm.h <sup>-1</sup>	$I_{60} > 28$ mm.h <sup>-1</sup>	0,53
10	Precipitação (H) vs. intensidade média ( $I_{av}$ )	$H < 14$ mm	$H > 31$ mm	0,53
11	Precipitação 5-dias ant. ( $H_5$ ) vs. precipitação (H)	$H_5 > 100$ mm ou $H < 12$ mm	$H > 31$ mm	0,51
12	Umidade do solo ( $\theta$ ) vs. intensidade 120-min ( $I_{120}$ )	$I_{120} < 6$ mm.h <sup>-1</sup>	$I_{120} > 14$ mm.h <sup>-1</sup>	0,51
13	Precipitação 5-dias ant. ( $H_5$ ) vs. intensidade 60-min ( $I_{60}$ )	$I_{60} < 10$ mm.h <sup>-1</sup> ou $H_5 > 100$ mm	$I_{60} > 30$ mm.h <sup>-1</sup>	0,49
14	Umidade do solo ( $\theta$ ) vs. intensidade 45-min ( $I_{45}$ )	$I_{45} < 10$ mm.h <sup>-1</sup>	$I_{45} > 34$ mm.h <sup>-1</sup>	0,39
15	Umidade do solo ( $\theta$ ) vs. intensidade 30-min ( $I_{30}$ )	$I_{30} < 15$ mm.h <sup>-1</sup>	$I_{30} > 48$ mm.h <sup>-1</sup>	0,31
16	Umidade do solo ( $\theta$ ) vs. intensidade 15-min ( $I_{15}$ )	$I_{15} < 18$ mm.h <sup>-1</sup>	$I_{15} > 75$ mm.h <sup>-1</sup>	0,24
17	Umidade do solo ( $\theta$ ) vs. intensidade 5-min ( $I_5$ )	$I_5 < 22$ mm.h <sup>-1</sup>	$I_5 > 103$ mm.h <sup>-1</sup>	0,20
18	Precipitação 5-dias ant. ( $H_5$ ) vs. umidade do solo ( $\theta$ )	$H_5 < 5$ mm	$H_5 > 100$ mm ou $\theta > 0,30$	0,12
19	Precipitação 5-dias ant. ( $H_5$ ) vs. duração(D)	critério de separação não válido	$H_5 + 4,4 * D > 138$	0,10
20	Umidade do solo ( $\theta$ ) vs. intensidade média ( $I_{av}$ )	critério de separação não válido	$I_{av} > 45$ mm.h <sup>-1</sup> ou $\theta > 0,30$	0,03

A investigação dos critérios de separação com maior eficiência (Figura 4) indica que não foi observado escoamento para eventos com precipitação menor que 14 mm; e que o escoamento sempre ocorreu quando a precipitação ultrapassou 31 mm. Além disso, as medições de campo mostraram que nenhum evento com  $I_{60}$  abaixo de  $12 \text{ mm.h}^{-1}$  gerou escoamento. Vale ressaltar que a duração da intensidade (60 min) é muito próxima do tempo de concentração da bacia (tempo em que leva para que toda a bacia considerada contribua para o escoamento superficial na seção estudada), que foi avaliado em 65 min (De ARAÚJO e PIEDRA, 2009). Observe-se que nenhum evento apresentado simultaneamente  $H > 31 \text{ mm}$  e  $I_{60} < 12 \text{ mm.h}^{-1}$ , o que não nos permite afirmar de forma conclusiva qual a restrição prevalece. O evento mais próximo dessa situação foi o de 20 de março de 2006 ( $H = 30,4 \text{ mm}$ ,  $I_{60} = 8 \text{ mm.h}^{-1}$ ), o que resultou em escoamento insignificante. Portanto, pode-se supor que prevalece a restrição de intensidade, isto é, se  $I_{60} < 12 \text{ mm.h}^{-1}$ , não se espera escoamento mesmo que a precipitação ultrapasse 31 mm. Isto fornece uma visão para a relevância da recorrência Hortoniana na bacia.

Para demonstrar a dinâmica de iniciação do escoamento na bacia, foram investigados dois eventos ocorridos num intervalo de 12 dias - ambos com 33% de umidade do solo antecedente - (Tabela 2). O primeiro evento (07 de abril de 2007,  $H = 26 \text{ mm}$ ,  $I_{60} = 22 \text{ mm.h}^{-1}$ ) não gerou escoamento superficial, no entanto, o segundo (19 de abril de 2007,  $H = 16 \text{ mm}$ ,  $I_{60} = 16 \text{ mm.h}^{-1}$ ) gerou, apesar de sua menor intensidade e magnitude de precipitação. Resultados como estes mostram que as forças motrizes hidrológicas habituais não são suficientes para explicar a iniciação ao escoamento no bioma. De fato, uma regressão entre o tempo decorrido desde o início da estação chuvosa (aqui admitida a 01 de dezembro) e o coeficiente de escoamento (Figura 7-A) mostra uma tendência positiva, com coeficiente de correlação de 0,35. Pode ser considerado baixo para explicar a iniciação do escoamento, isso pode estar acontecendo por que estamos considerando apenas um fator (umidade do solo) na explicação do fenômeno, quando sabemos que outros variáveis influenciam: intensidade e duração da chuva; vegetação entre outros. A sazonalidade da geração de escoamento também pode ser observada pela comparação entre os volumes de escoamento nos primeiros trimestres úmidos (de dezembro a fevereiro) e no segundo trimestre úmido (de março a maio): 38% versus 62% da magnitude total, respectivamente (Figura 7-B). Além disso, Costa *et al.*, (2013), ao investigar as perdas de transmissão do canal aluvial em um rio semiárido, também mostraram a característica sazonal da interação rio-aquífero e, portanto, dos processos de geração de escoamento.

**Figura 7**—Análise temporal da umidade da BEA (2005-2014). Regressão entre o tempo decorrido desde o início da estação chuvosa (admitido 01 de dezembro) e o coeficiente de escoamento (A). Sazonalidade da geração de escoamento na BEA. (B)



Uma explicação para este fenômeno pode ser a dinâmica da raiz da Caatinga, como demonstrado experimentalmente por Pinheiro *et al.*, (2013). De fato, as raízes da Caatinga apresentam redução de profundidade durante a estação seca, gerando um espaço vazio nos macro poros. Quando ocorre um evento de precipitação sob estas circunstâncias, as abstrações iniciais são altas, uma grande quantidade de água é retida na macroporosidade e a probabilidade de início do fluxo (WORRALL *et al.*, 2007) diminui, independentemente da umidade média do solo. Após alguns dias de chuvas contínuas, no entanto, a vegetação se regenera, expandindo suas raízes. Como resultado, as abstrações iniciais decrescem consideravelmente, fazendo com que a água se infiltre basicamente através dos micros poros do solo. No exemplo anterior, é provável que as raízes de Caatinga expandiram-se durante o intervalo de 12 dias, fazendo com que a macroporosidade tenha influência desprezível nas abstrações iniciais e, como resultado, o escoamento poderia ser inicializado sob condições hidrológicas menos favoráveis.

Medeiros *et al.*, (2009) argumentam que a influência das perdas de interceptação no balanço hídrico global é praticamente constante no BEA. No período seco, a interceptação absoluta é desprezível, já que a quantidade de chuva é muito limitada (precipitação total média de 50 mm acumulada de junho a dezembro, que representa 9% do total anual no período de estudo). A baixa variabilidade é observada no período úmido (janeiro - maio), quando as perdas de interceptação variam de um máximo de 14,5% no mês de abril a um mínimo de 11,6% no mês de março, em média. No início do período chuvoso, a vegetação é desprovida de folhas, mas os primeiros eventos de precipitação permitem uma rápida recomposição (LIMA *et al.*, 2012), atingindo o seu estado de cobertura total e a capacidade de interceptar a precipitação. Além disso, a falta de folhas é compensada pela camada densa, produzida pelas folhas que caíram no período seco anterior que ainda não foram transportadas pelo fluxo e cobrem toda a

superfície do solo. As medições realizadas pela obra citada. Os autores indicam que até 1,5 mm de água pode ser retida pela ninhada, isto é, 3 vezes a capacidade de armazenamento do copatronco. Assim, o caráter decíduo da vegetação desempenha um papel secundário na dinâmica temporal do processo de interceptação, com pouco impacto sobre o limiar para o processo de geração de escoamento.

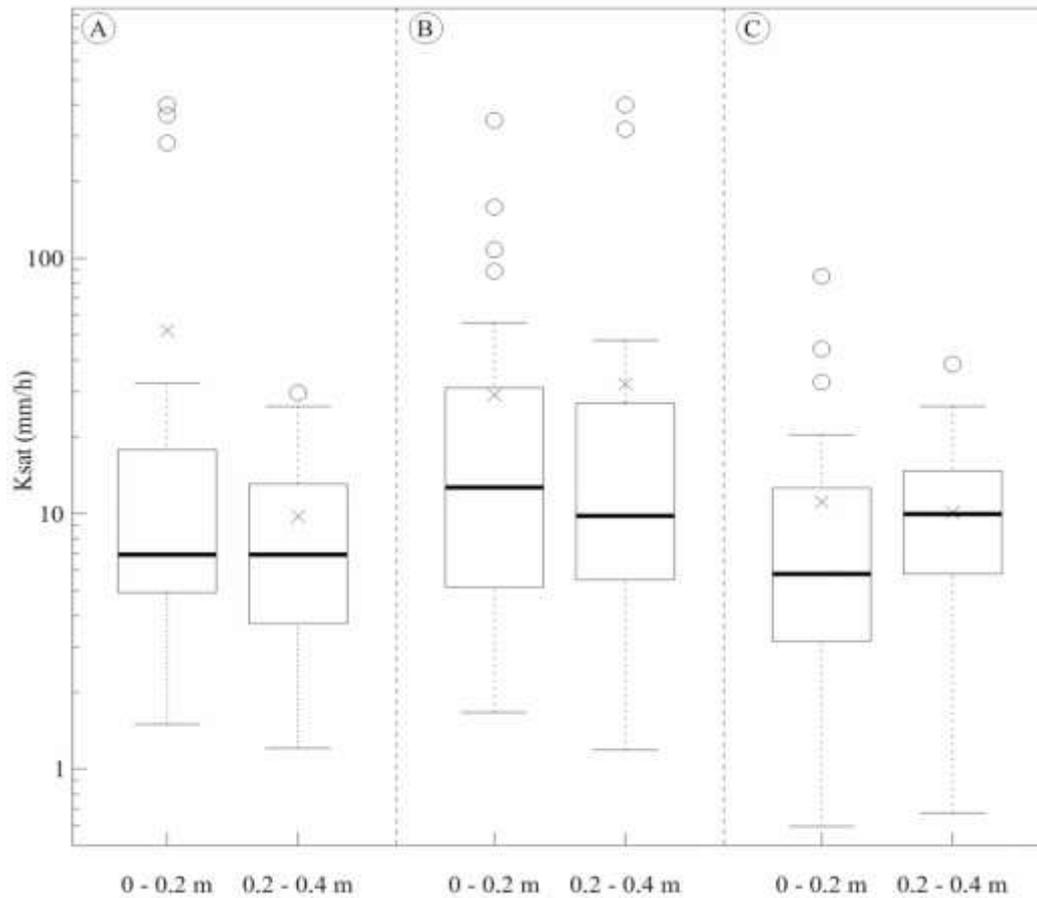
Estas observações de campo concordam com os resultados de van Schaik *et al.*, (2014), que estudou uma bacia semiárida na Espanha, e concluiu que o fluxo de macroporos é uma variável relevante, geralmente negligenciada pela maioria dos modelos hidrológicos. Penna *et al.*, (2015), estudando uma pequena bacia hidrográfica florestada na Itália, também concluiu que havia uma "distinta variabilidade sazonal nas respostas de escoamento". No caso italiano, no entanto, as principais razões para as mudanças temporais foram precipitação direta do canal, fluxo de base e escoamento das colinas. Worrall *et al.*, (2007), para os quais a sazonalidade é significativamente relevante na iniciação ao escoamento, também observou o impacto da secagem severa dos solos na iniciação ao escoamento em uma área com solo de turfa, concluindo que pode direcionar para as rachaduras e, portanto, surgem novos caminhos para o fluxo (veja TIAN *et al.*, 2012).

### **Processo de escoamento predominante e conectividade hidrológica**

Observa-se na Figura 8 valores de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) entre duas profundidades do solo (0-0,2 m e 0,2-0,4 m) dentro de cada compartimento paisagem (leito, margem do rio e encosta) As profundidades de 0,2-0,4 m não diferem significativamente daquelas das profundidades de 0-0,2 m no leito ou nas margens do rio, embora apresente valores ligeiramente mais elevados na encosta.

Foi possível observar também na Figura 8 que os valores médios da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) nas margens do rio é superior aos do leito do rio e da encosta. Isso explica como ocorre o processo de quebra da conectividade hidrológica, onde o escoamento gerado na encosta pode ser infiltrado na margem do rio e não consegue alcançar o leito do rio para seguir em curso até o exutório.

**Figura 8-** Box-plot da condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) na Bacia Experimental de Aiuaba (2009 - 2010), com base em 179 medições de campo; Localizado no leito do rio (A), nas margens do rio (B) e nas encostas (C). As caixas esquerda e direita referem-se a camadas de solo de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente. O comprimento da caixa representa o intervalo interquartil da amostra; A barra e a cruz na caixa são a mediana e a média, respectivamente. Pontos de dados com valores discrepantes são representados por círculos.



Na Figura 6 evidenciam-se que os eventos com intensidade  $I_{60}$  menor do que  $12 \text{ mm.h}^{-1}$  não geram escoamento na saída da bacia. Tomemos, por exemplo, um evento com intensidade de  $10 \text{ mm.h}^{-1}$ . Espera-se que mais de 70% da área da colina gerem escoamento superficial; mas apenas 40% da área do rio e 60% da área do leito permitirão o escoamento, mostrando uma forte tendência de ruptura da conectividade nas margens dos rios através da infiltração. Contrasta se, por exemplo, quando ocorre uma precipitação de  $20 \text{ mm.h}^{-1}$ , praticamente toda a área da encosta; espera-se que 75% da área do rio e 80% da área do leito sejam fontes de escoamento, o que está de acordo com o valor limiar de intensidade identificado ( $12 \text{ mm.h}^{-1}$ ).

Outra característica importante observada na Figura 6 e Tabela 4 é que a condição principal para geração de escoamento superficial é a intensidade da precipitação menor que  $12 \text{ mm.h}^{-1}$  durante, pelo menos, uma hora. Por exemplo, o evento de 07 de dezembro de 2005 ( $H=18 \text{ mm}$ : Tabela 2) apresentou uma intensidade de 5 min de  $15 \text{ mm.h}^{-1}$ , portanto, superior ao

valor limiar. No entanto, isso não foi suficiente para iniciar o escoamento na saída da bacia, porque sua intensidade de 60 min foi de apenas  $8 \text{ mm.h}^{-1}$ . A restrição que a intensidade deve superar a taxa de infiltração durante o tempo de concentração (65 min: De ARAÚJO e PIEDRA, 2009) indica que o escoamento é quase exclusivamente Hortoniano, ou seja, a intensidade da chuva deve prevalecer acima da infiltração ao longo de toda a trajetória, sem ser interrompido. Isso contrasta com os dados da bacia hidrográfica italiana estudados por Penna *et al.*, (2015), onde a saturação do fluxo terrestre é uma das principais causas das respostas sazonais de escoamento.

## CONCLUSÕES

A análise realizada nesta pesquisa permitiu as seguintes conclusões para a Bacia Experimental de Aiuaba, localizada em uma área de preservação da Caatinga, para o período de 2005 a 2014.

Apesar do fato de que a precipitação média anual é semelhante à observada em outros biomas semiáridos ou áridos, o número de dias com precipitação e escoamento por ano foi muito limitado: doze (acima de 10 mm) e cinco, respectivamente. Em média, o coeficiente de escoamento é extremamente baixo (inferior de 0,5%), com descarga específica de aproximadamente 2 mm por ano.

Estatisticamente, as variáveis hidrológicas mais relevantes para o escoamento (mm) foram a intensidade máxima de 60 min ( $I_{60}$ ), a intensidade máxima de 120 min ( $I_{120}$ ) e a precipitação total, enquanto a intensidade média e a umidade do solo antecedente apresentaram influência marginal. As variáveis mais importantes para explicar o início do escoamento na bacia foram a precipitação total e  $I_{60}$ . Vale ressaltar que a restrição temporal (60 min) é equivalente ao tempo de concentração da bacia; E que o valor limiar  $I_{60}$  ( $12 \text{ mm h}^{-1}$ ) é aproximadamente a condutividade hidráulica saturada no leito do rio. Esses resultados corroboram a hipótese de Medeiros *et al.*, (2010) que o escoamento do tipo Hortoniano prevalece neste ambiente. A análise conjunta do valor limiar de intensidade e da condutividade hidráulica na bacia mostra que a margem do rio é o compartimento onde a conectividade é mais intensamente interrompida, devido ao elevado potencial de infiltração associado à percolação profunda.

A explicação do melhor desempenho do início do escoamento com base em variáveis hidrológicas clássicas (magnitude, intensidades e duração da chuva, e umidade do solo) não pode explicar mais de um quarto dos eventos, induzindo a possibilidade de outros processos relevantes serem abordados. Uma possível explicação, que exige maior investigação, é que as abstrações iniciais mudam sazonalmente (COSTA *et al.*, 2013) como uma função do comportamento dinâmico do sistema radicular no bioma Caatinga (PINHEIRO *et al.*, 2013). As raízes das árvores encolhem durante períodos secos, aumentando o fluxo nos macroporos e assim as abstrações iniciais. Como resultado, a probabilidade de iniciação do escoamento decai. O fluxo de macroporos provou ser uma variável relevante, especialmente na zona semiárida (van SCHAIK *et al.*, 2014). Entretanto, outras pesquisas tem atribuído também à fissuração do solo (WORRALL *et al.*, 2007; TIAN *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2016), e não à dinâmica de raízes.

## REFERÊNCIAS

- AMOOZEGAR A.. A compact, constant-head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone. **Soil Science Society of America Journal**. 53: 1356–1361. 1989a. doi: 10.2136/sssaj1989.03615995005300050009x.
- AMOOZEGAR A.. Comparison of the Glover solution with the simultaneous-equations approach for measuring hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**. 53: 1362–1367. 1989b. doi: 10.2136/sssaj1989.03615995005300050010x.
- ANDRADE, D. E.; ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO H. A. Q.; RODRIGUES J. O.; SANTOS, J. C. N. Escoamento superficial versus manejo da vegetação em microbacias do semiárido. In: **I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS NATURAIS DO SEMIÁRIDO**, 2013, Iguatu. Anais... Fortaleza: MASSA, 2013. p. 1-7.
- ARAÚJO, L. C. M. de. **Análise da Susceptibilidade à Erosão dos Solos da Estação Ecológica de Aiuaba/CE**. Dissertação de Mestrado. UFC. Departamento de Geologia. 119p, 2005.
- BELO, P. S. C.. 2007. **Contribuição ao zoneamento da zona de amortecimento de uma unidade de conservação: estudo de caso ESEC Aiuaba, Ce**. Dissertação de Mestrado. PRODEMA – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2007.
- BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1994. 112 p.
- BONELL M, GILMOUR DA.. The development of overland flow in a tropical rainforest catchment. **Journal of Hydrology** 39: 365–382, 1978. doi:10.1016/0022-1694(78)90012-4.
- BORSATO, F. H. & MARTONI, A. M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**. Human and Social Sciences Maringá, v. 26, n. 2, p. 273-285, 2004. doi: 10.4025/actascihumansoc.v26i2.1391.
- BRAGA JUNIOR, B. P.; CONEJO, J. G. L. Simulação digital do ciclo hidrológico através do “Stanford Watershed Model IV”. In: **Hidrologia dinâmica: curso de engenharia hidrológica**. São Paulo: EPUSP/DAEE/ABRH, 1983. p. B1-B23. vol. 1.
- CARVALHO, N. O. **Hidrosedimentologia prática**. CPRM, Rio de Janeiro, 2000, 372p.
- CARVALHO, R. G. de. As Bacias Hidrográficas Enquanto Unidades de Planejamento e Zoneamento Ambiental no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n.36, Volume Especial, p. 26-43, 2014.
- CHAPPELL NA, SHERLOCK MD.. Contrasting flow pathways within tropical forest slopes of Ultisol soils. **Earth Surface Processes and Landforms**. 30: 735–753. 2005. doi:10.1002/esp.1173.

CHEN, L., ZHANG, Z., ZEPPEL, M., LIU, C., GUO, J., ZHU, J., ZHA, T.. Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semiarid plantation. **Int J Biometeorol**, 58, 1569–1581. 2014. doi: 10.1007/s00484-013-0761-9.

CHORLEY, R. J.: **The hillslope hydrologic cycle, in: Hillslope Hydrology.** ed: Kirkby, M. J., J. Wiley & Sons, Chichester, Pg. 1–42, 1978.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology.** McGRAWHILL International Editions: Civil Engineering Series. 1988. 572 p.

COLLARES, E. G. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídios ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na bacia hidrográfica do Rio Capivari – SP.** 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2000.

COSTA, C. A. G.; COSTA, A. C.; TEIXEIRA, A. dos S.; ALVES, N. N. de L.; ANDRADE, E. M. de; SOUSA, B. F. S.; LEÃO, A. de O. **Comparação do uso do SRTM para delimitação e caracterização fisiográfica de uma microbacia hidrográfica.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII, Florianópolis. Anais eletrônicos. Florianópolis: INPE, 2007.

COSTA, A. C. **Hidrologia em uma Bacia Experimental em Caatinga Conservada no Semi-árido Brasileiro.** 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE. 2007.

COSTA, C. A. G. **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de Caatinga preservada.** 2012. 188 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2012.

COSTA, C. A. G.; LOPES, J. W. B.; PINHEIRO, E.A.R.; De ARAÚJO, J.C.; GOMES FILHO, R. R.. Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga biome. **Rev. Ciênc. Agron.**[online]. 2013, vol.44, n.4, pp. 685-694. ISSN 1806-6690. doi: 10.1590/S1806-66902013000400004.

COSTA, C.A.G.; De ARAÚJO, J.C.; LOPES, J. W. B. ; PINHEIRO, E.A.R.. Permanence of water effectiveness in the root zone of the Caatinga biome. **Revista Caatinga (Online) JCR**, v. 29, p. 622-699, 2016. doi: 10.1590/1983-21252016v29n320rc.

De ARAÚJO, J. C.; PIEDRA, J.I.G.. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrol. Process.**, 23: 1169 – 1178. 2009. doi: 10.1002/hyp.7232.

De ARAÚJO, J.C., MEDEIROS, P H A.. Impact of Dense Reservoir Networks on Water Resources in Semiarid Environments. **Australasian Journal of Water Resources**, 17:1, 87-100. 2013. doi: 10.7158/13241583.2013.11465422

De ARAÚJO JC, DÖLL P, GÜNTNER A, KROL M, ABREU CBR, HAUSCHILD M, MENDIONDO EM.. Water scarcity under scenarios for global climate change and regional development in semiarid Northeastern Brazil. **Water International**. 29(2): 209–220. 2004. doi:10.1080/02508060408691770.

De ARAÚJO JC, GÜNTNER A, BRONSTERT A.. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**. 51(1): 157–170. 2006. doi:10.1623/hysj.51.1.157.

De FIGUEIREDO, J.V. de.. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2011.

De FIGUEIREDO, J. V., De ARAÚJO, J. C., MEDEIROS, P. H. A., COSTA, A. C.. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrol. Process.**, 30: 2390–2400. 2016. doi: 10.1002/hyp.10801.

FARIAS, T. R. L.; ARAUJO, J. C. . **Hidrologia e sedimentologia comparada de pequenas bacias em região tropical sub-úmida no Ceará**. In: IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador. Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008.

FURTUNATO, O. M.. **Simulação Hidrológica na Bacia do Alto Paraíba com efeito da Variabilidade do Clima**.2004. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2004.

FRISCHKORN, H.; De ARAÚJO, J. C. de; SANTIAGO, M.M.F. **Water resources of Ceará and Piauí**. In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C.de. Global change and regional impacts. Berlin: Springer - Verlag, p.87-94, 2003.

GERMER S, NEILL C, KRUSCHE AV, ELSENBEEER H. Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: undisturbed forest to pasture. **Journal of Hydrology**. 380(3-4): 473–480. 2010. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.11.022.

GREGORY, K.J., WALLING, D.E.. **Drainage Basin Form and Process**. Edward Arnold, London, 1973, 456p.

GROTTKER, M. Runoff quality from a street with medium traffic loading. **Sci. Total Environ**. v. 59, p. 457-466, 1987. doi: 10.1016/0048-9697(87)90469-4.

HASSLER, S. K.; ZIMMERMANN, B.; VAN BREUGEL, M.; HALL, J. S.; ELSENBEEER, H. Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1634–1642, 2011. doi: 10.1016/j.foreco.2010.06.031

HARDOON DR, SZEDMAK S, SHAW-TAYLOR J.. Canonical Correlation Analysis: an overview with application to learning methods. **Neural Computation** 16(12): 2639–2664. 2004. doi:10.1162/0899766042321814.

HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; WIBERG, P. L.; ESHLEMAN, K. N. **Elements of Physical Hydrology**. J. Hopkins, p. 302, 1998.

HORTON, R. E.. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **EOS, Am. Geophys. Union. Trans.**, vol. 14: pg. 446–460. 1933. doi: 10.1029/TR014i001p00446.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol Soe. Am. Bull.**, v.56, n.3, p.275-370, 1945.

INETI (2009). **Sistema nacional de informação geocientífica** - léxico de termos hidrogeológicos.e-geo.ineti.pt.

ISTOK JD, BOERSMA L.. Effect of antecedent rainfall on runoff during low-intensity rainfall. **Journal of Hydrology** 88: 29–42. 1986. doi:10.1016/0022-1694(86)90098-3.

LIMA ALA, SAMPAIO EVSB, CASTRO CC, RODAL, MJN, ANTONINO ACD, MELO AL.. Do the phenology and functional stem attributes of woody species allow for the identification of functional groups in the semiarid region of Brazil? **Trees** 26: 1605–1616. 2012. doi: 10.1007/s00468-012-0735-2

LIMA, Y. C. P.; LIMA NETO, I. E.; ARAUJO, J. C. **Análise Ex-Post do Assoreamento de um Pequeno Reservatório: Estudo de Caso Açude Boqueirão, Aiuaba, Ceará.** In Anais: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 2010.

LINACRE ET.. Estimating U.S. Class A pan evaporation from few climate data. **Water International**. 19(1): 5–14. 1994. doi: 10.1080/ 02508069408686189.

LIU, C.; LI, Y.; GAO, W.; SHI, R.; BAI, K.. Retrieval of columnar water vapor using multispectral radiometer measurements over northern China. **Journal of Applied Remote Sensing** 5(1), 053558 (1 January 2011). doi: 10.1117/1.3647483

LOAGUE, K., HEPPNER, C. S., EBEL, B. A., JOEL E. VANDERKWAAK, J. E.. The quixotic search for a comprehensive understanding of hydrologic response at the surface: Horton, Dunne, Dunton, and the role of concept-development simulation. **Hydrological processes**. 2010, vol: 24 iss:17, pg: 2499 – 2505. doi: 10.1002/hyp.7834

LOPES, J. W. B.; COSTA, C. A. G.; PINHEIRO, E. A. R.; TOLEDO, C. E.; de ARAÚJO, J. C. Calibração in loco de sensor de umidade do solo sob vegetação de Caatinga preservada. In: Congresso Latino americano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA e Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 9., 39., Vitória. **Apresentações...** Vitória: CONBEA, 2010.

MAMEDE, G. L.; ARAUJO, N.A.M.; SCHNEIDER, C.M.; ARAUJO, J. C.; HERRMANN, H.J.. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **PNAS**, v. 109, p. 7191-7195, 2012. doi: 10.1073/pnas.1200398109.

MEDEIROS, P.H. A. **Medida e modelagem da interceptação em uma bacia experimental do semiárido.** 2005. 81 f. Dissertação - Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MEDEIROS, P.H.A.; De ARAÚJO, J.C. . **Modelagem da interceptação no semi-árido brasileiro: aplicação do modelo de Gash na Bacia Experimental de Aiuaba - CE.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa, PB. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

MEDEIROS, P.H.A, De ARAÚJO, J.C., BRONSTERT, A.. Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica**. 40: 165–174. 2009. doi: 10.1590/S0100-69162014000200004.

MEDEIROS P.H.A, GÜNTNER A, FRANKE T, MAMEDE GL, De ARAÚJO JC.. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**. 55: 636–648. 2010. doi: 10.5194/gmdd-1-285-2008.

MEDEIROS, P.H.A., De ARAÚJO, J.C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. (2014) **Journal of Soils and Sediments**, 14 (7), pp. 1216-1223. doi: 10.1007/s11368-013-0809-9.

MORAIS, M. FONSECA de. **Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental / representativa de Santa Maria / Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ**. 2007. 251f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MOURA, EULINA M. de, MEDEIROS, VICTOR M. de A. **Diferenças em microescala no regime de precipitação no Nordeste: litoral e semi-árido**. In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB, 2005.

NAVARRO HEVIA J, De ARAÚJO JC, MONGIL MJ.. Assessment of 80 years of ancient-badlands restoration in Saldaña, Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**. 39(12): 1563–1575. 2014. doi:10.1002/esp.3541.

NOBREGA, R. S.. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 29, n. spe, p. 111-120, dec. 2014. doi.org/10.1590/0102-778620130024.

NOTO, L.V.; IVANOV, V.Y.; BRAS, R.L.; VIVONI, E.R.. Effects of initialization on response of a fully-distributed hydrologic model. **Journal of Hydrology**. 352(1–2): 107–125. 2008. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.12.031.

PEARSON K.. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **Philosophical Magazine** 2(6): 559–572. 1901.

PENNA D, VAN MEERVELD HJ, OLIVIERO O, ZUECCO G, ASSENDELFT RS, FONTANA GD, BORGA M.. Seasonal changes in runoff generation in a small forested mountain catchment. **Hydrological Processes**. 29: 2027–2042. 2015. doi: 10.1002/hyp.10347.

PETER, S.; De ARAÚJO, J.C.; De ARAÚJO, N.; HERRMANN H.J.. Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network. **Journal of Hydrology**. 512: 408–420. 2014. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.001.

PINHEIRO, E. A. R.; ALMEIDA, C. L.; FARIAS, T. R. L.; ARAUJO, J. C.. **Análise de tendência da taxa de retenção de sedimento em reservatórios do Estado do Ceará**. In: X ENES, 2012, Foz do Iguaçu. X encontro nacional de engenharia de sedimentos, 2012.

PINHEIRO E. A. R., COSTA C. A. G., De ARAÚJO J. C.. Effective root depth of the Caatinga biome. **J Arid Environ.** 2013. 89:1–4. doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.003.

PRICE, K.; JACKSON, C.R.; PARKER, A. J.. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. **Journal of Hydrology.** 383, pp. 256-268. 2010.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial.** Viçosa: UFV, 2ª. Edição, 2003, 87p.

SALVADOR, M. M. S.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. dos S.; MOREIRA, N. B.. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da distribuição da armazenagem de água no solo numa sucessão feijão/aveia-preta. **Rev. Bras. Ciênc. Solo,** Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1434-1447, Nov. 2012. doi: 10.1590/S0100-06832012000500007.

SIEFERT, C. A. C., SANTOS, I. dos. Mecanismos de Geração de Escoamento e Áreas Hidrologicamente Sensíveis: uma Abordagem Hidrogeomorfológica para Delimitação de Áreas de Preservação Permanente. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise,** [S.l.], v. 24, mar. 2012. ISSN 2177-2738. doi: 10.5380/raega.v24i0.26216.

SHI, Z.-H.; CHEN, L.-D.; FANG, N.-F.; QIN, D.-F.; CAI, C.-F.. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China **Catena,** 77 (1), pp. 1-7. 2009. doi: 10.1016/j.catena.2008.11.006.

STRAHLER, A.N.. Statistical analysis in geomorphic research. **Journal of Geology** 62:1-25. 1954.

REIS, L. F. R. **Escoamento superficial.** Notas de hidrologia e recursos hídricos. Disponível em: <<http://www.shs.eesc.usp.br/graduacao/disciplinas/shs403/download/escoamento-superficial.pdf>>, 25 de maio de 2009.

REICHARDT, Klaus. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1987. 186 p.

SALEMI FL, GROppo JD, TREVISAN R, DE MORAES JM, FERRAZ SFB, VILLANI JP, DUARTE-NETO PJ, MARTINELLI LA.. Land-use change in the Atlantic rainforest region: consequences for the hydrology of small catchments. **Journal of Hydrology.** 499: 100–109. 2013. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.049.

SANTOS, J.C.N., ANDRADE, E.M., GUERREIRO, M.J.S., MEDEIROS, P.H.A., PALÁCIO, H.A.Q., ARAÚJO NETO, J.R.. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **J Hydrol.,** 541(Part B), 1057–1066. 2016. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.08.016.

SCHEIDEGGER, A. E.. Horton's Law of Stream Numbers, **Water Resour. Res.,** 4(3), 655–658, 1968. doi:10.1029/WR004i003p00655.

SCHEFFLER, R.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEEER, H. Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. **Agriculture, Ecosystems Environment,** v. 144, p. 281–289, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.016>

SILVA, C. O. A. **Análise de modelos de escoamento aplicados a águas superficiais e subterrâneas**. 2007. 80f. Dissertação (Recursos Hídricos). Universidade do Algarve, Faro. 2007.

SILVA, J R L.; MONTENEGRO, A A A.; MONTEIRO, A L N.; SILVA JÚNIOR, V P.. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 10 9 06, 2015. doi: 10.5039/agraria.v10i2a4219.

SILVA, V. D. P. R; PEREIRA, E. R. R; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 163-172, 2012.

SILVA, P. M. de O.; MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da; COELHO, G.. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 258-265, 2008.

TIAN F, LI H, SIVAPALAN M.. Model diagnostic analysis of seasonal switching of runoff generation mechanisms in the Blue River basin, Oklahoma. **Journal of Hydrology**. 418–419: 136–149. 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.011.

TONELLO, KELLY CRISTINA. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões, MG**. 2005. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 2005.

TORRES, R.. **Regime hídrico do solo**. Online. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAWZsAF/regime-hidrico-solo> > Acesso: 06 de março de 2017.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2000.

TUCCI, CARLOS E. M, SILVEIRA, ANDRÉ L. L. da. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 2004, 943p.

TURNER, A. K.. Infiltration runoff and soil classifications. **Jour. Hydrol.** 1, 2, 129-143. 1963. doi: 10.1016/0022-1694(63)90036-2.

VAN SCHAİK NLMB, BRONSTERT A, DE JONG SM, JETTEN VG, VAN DAM JC, RITSEMA CJ, SCHNABEL S.. Process-based modelling of a headwater catchment in a semi-arid area: the influence of macropore flow. **Hydrological Processes**. 28(24): 5805–5816. 2014. doi: 10.1002/hyp.10086.

VAN DE GIESENA, N., TJEERD-JAN S., AYODELE EBENEZER AJAYIC, D., FAFRÉ BAGAYOKOE. Scale effects in Hortonian surface runoff on agricultural slopes in West Africa: Field data and models. **Agriculture, ecosystems & environment**. [0167-8809] 2011 vol: 142 iss: 1 pg: 95 -101

VELLOSO, S. G. S.; SANTOS, D. L.; FERREIRA FILHO, J. G. de A.. Estimativa da Lâmina Máxima de Escoamento Superficial na Bacia do Rio São Miguel, Minas Gerais. **Scientia Agraria**, [S.l.], v. 16, n. 3, maio 2016. ISSN 1983-2443. doi: 10.5380/rsa.v16i3.46825.

VILLELA, S. M.; Mattos, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245p.

WIEGAND, M. C.; RODRIGUES, J. O.; ALVES, N. N. L.; SOUSA, B. F. S.; LIMA, Y. C. P.; De ARAÚJO, J. C.. **Estimativa da produção de sedimentos em uma bacia experimental usando modelos empíricos**. In: Anais do VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Campo Grande – MS. 2008.

WORRALL F., BURT T.P., ADAMSON J.K. Change in runoff initiation probability over a severe drought in a peat soil - Implications for flowpaths. **Journal of Hydrology**, 345 (1-2), pp. 16-26. 2007. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.07.008.

ZHENG, C., WANG, Q.. Seasonal and annual variation in transpiration of a dominant desert species, *Haloxylon ammodendron*, in Central Asia up-scaled from sap flow measurement. **Ecohydrol**. 8, 948–960. 2015. doi: 10.1002/eco.1547.

ZHENG, C., WANG, Q.. Seasonal and annual variation in transpiration of a dominant desert species, *Haloxylon ammodendron*, in Central Asia up-scaled from sap flow measurement. **Ecohydrol**. 8, 948–960. 2015. doi: 10.1002/eco.1547.

ZIEGLER, A.D.; NEGISHI, J.N.; SIDLE, R.C.; NOGUCHI, S.; NIK, A.R.. 2006. Impacts of logging disturbance on hillslope saturate hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. **Catena**. 67:89-104. doi: 10.1016/j.catena.2006.02.008

ZIMMERMANN, B., ELSENBEER, H. & DE MORAES, J.M.. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. **Forest Ecology and Management**, 222, 29–38. 2006.

ZIMMERMANN, A.; SCHINN, D.; FRANCKE, T.; ELSENBEER, H.; ZIMMERMANN, B.. Uncovering patterns of near-surface saturated hydraulic conductivity in an overland flow-controlled landscape. **Geoderma** 195-196: 1–11. 2013. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.11.002.

## 4 TRANSPIRAÇÃO EM PLANTAS DO BIOMA CAATINGA

### RESUMO

O conhecimento do uso da água pelas plantas, integrada aos estudos de hidrologia em bacias hidrográficas, reside na possibilidade de avaliar o papel desempenhado pela transpiração no ciclo da água de uma floresta. O objetivo deste trabalho foi estudar através de dados obtidos *in situ* a dinâmica temporal da transpiração de plantas representativas da Caatinga. O local de estudo foi a Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) na região do Estado do Ceará denominada Inhamuns. A metodologia adotada para avaliar o processo de transpiração da espécie (*P. pyramidalis*) representativa da Caatinga foi a medição do fluxo de seiva no xilema hidroativo através da sonda de dissipação térmica desenvolvida por Granier (1985), durante o período de dois anos, abrangendo os períodos seco, chuvoso e de transição. Avaliando ainda a influência dos fatores climáticos que interferem no fluxo de seiva, como: radiação global, déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura. O fluxo de seiva (FS) foi medido *in situ* durante 365 dias ininterruptos. Os resultados obtidos destacam alguns aspectos únicos na medição de FS no bioma Caatinga. O xilema hidroativo de *P. pyramidalis* (Tul.) representa em média 64% da área basal, e não sofreu alterações entre as estações chuvosa e seca. As medições do fluxo de seiva utilizando os coeficientes originais da equação de Granier subestimou em 44% os valores de fluxo de seiva em escala diária, e isso justificou a calibração da equação. Os valores diários de FS variaram entre 1,4 (maio/2016) e 47,0 L.dia<sup>-1</sup>(outubro/2016). Para análise da distribuição temporal do FS os dados foram agrupados em quatro regimes hídricos: chuvoso; transição chuvoso-seco; seco e transição seco-chuvoso. Observou-se a quebra do paradigma que o FS em aumentaria com o aumento da umidade do solo, o que não aconteceu em *P. pyramidalis*. Observou-se que o FS aumentou durante o período de transição chuvoso-seco e seco em comparação com o período chuvoso. Esta constatação indica que a influência, neste regime hídrico pluvial, dos baixos valores de déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura do ar e ETo fazem com que FS seja menor durante o período úmido em comparação ao período seco. Outro resultado interessante observado foi a ocorrência de transpiração noturna tanto em espécies caducifóreas (*P. pyramidalis*), assim como em plantas *sempre verdes* (*Ziziphus joazeiro*) no bioma Caatinga. A transpiração noturna nas duas espécies variou de 4% a 36%, segundo o método de dissipação térmica; e de 10% a 16% pelo método IRGA (*infrared gas analyzer*) em relação à transpiração total diária. A partir deste resultado suscita-se a hipótese, a ser testada, que a transpiração noturna ocorra em função do fechamento incompleto dos estômatos, associado à elevada demanda evaporativa atmosférica na Caatinga, oriunda de ventos com baixo teor de umidade. Conclui-se ainda que a transpiração média anual de *P. pyramidalis* corresponde a 44-69% da precipitação média anual na BEA; e que o método da sonda de dissipação térmica se mostrou eficaz na estimativa da transpiração em plantas do bioma Caatinga.

**Palavras-chave:** Xilema hidroativo. Gradiente térmico natural. Fluxo de seiva noturno. Ecohidrologia.

## ABSTRACT

The acquaintance of the use of water by plants, integrated to hydrological studies in watersheds, lies in the possibility of evaluating the role played by transpiration in the water cycle of a forest. The objective of this work was to study the temporal dynamics of transpiration of representative plants of the Caatinga through data obtained in situ. The study site was the Aiuaba Experimental Basin (AEB) in the Ceará State region called Inhamuns. The methodology used to evaluate the transpiration process of the species (*P. pyramidalis*) representative of the Caatinga was the measurement of the sap flow in the sapwood area through the thermal dissipation probe developed by Granier (1985), during the period of two years, covering the dry, rainy and transition periods. It also evaluates the influence of the climatic factors that interfere with the sap flow, such as: global radiation, vapor pressure deficit (VPD) and temperature. The sap flow (SF) was measured in situ during 365 uninterrupted days. The results obtained highlight some unique aspects in the measurement of SF in the Caatinga biome. The sapwood area of *P. pyramidalis* (Tul.) Represents on average 64% of the basal area, and did not change between rainy and dry seasons. The sap flow measurements using the original coefficients of the Granier equation underestimated the sap flow values on a daily basis by 44%, and this justified the calibration of the equation. The daily SF values ranged between 1.4 (May / 2016) and 47.0 L.dia<sup>-1</sup> (October / 2016). For analysis of the temporal distribution of SF, the data were grouped in four water regimes: rainy; rainy-dry transition; dry and dry-rainy transition. It was observed the breaking of the paradigm that FS would increase with increasing soil moisture, which did not happen in *P. pyramidalis*. It was observed that FS increased during the rainy-dry and dry transition period compared to the rainy season. This finding indicates that the influence of the low values of vapor pressure deficit (VPD), air temperature and ETo in this pluvial water regime causes SF to be lower during the wet period compared to the dry period. Another interesting result was the occurrence of nocturnal transpiration in both deciduous (*P. pyramidalis*) species, as well as in evergreen plants (*Ziziphus* and *joazeiro*) in the Caatinga biome. The nocturnal transpiration in the two species ranged from 4% to 36%, according to the thermal dissipation method; and 10% to 16% by IRGA (infrared gas analyzer) in relation to total daily transpiration. From this result, it is hypothesized that the nocturnal transpiration occurs due to the incomplete closure of the stomata, associated with the high atmospheric evaporative demand in the Caatinga, from low humidity winds. It is also concluded that the mean annual transpiration of *P. pyramidalis* corresponds to 44-69% of the annual mean precipitation in the AEB; and that the thermal dissipation probe method proved effective in estimating transpiration in plants of the Caatinga biome.

**Keywords:** Sapwood area. Natural thermal gradient. Nocturnal sap flow. Ecohydrology.

## INTRODUÇÃO

O monitoramento de variáveis hidrológicas tem se intensificado em diversas regiões do planeta buscando-se a melhor compreensão de vários processos hidrológicos, com destaque para a relação da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera. Devido à complexidade que envolvem estes processos naturais, principalmente, devido à influência de uma cobertura vegetal heterogênea, torna-se ainda mais difícil medir, monitorar e avaliar estes processos *in situ* em uma escala mais detalhada.

Para Warren *et al.*, (2018) a evapotranspiração (ET) é um componente chave do ciclo da água, pelo qual a partição precisa da ET na evaporação e na transpiração fornece informações importantes sobre os fluxos de carbono, água e energia intrinsecamente acoplados. Atualmente, estimativas globais de fluxos particionados de evaporação e transpiração permanecem altamente incertos. E em ambientes semiáridos é ainda maior devido as dificuldades no monitoramento.

A cobertura vegetal em ecossistemas áridos e semiáridos produz uma vasta gama de efeitos hidrológicos (WANG *et al.*, 2012), com efeitos mais evidentes nas regiões semiáridas, devido à alta variabilidade temporal e espacial da precipitação. No entanto, a perfeita compreensão das relações hídricas e respostas fisiológicas a fatores ambientais dessa vegetação ainda são limitadas, e uma melhor compreensão é extremamente necessária (KUME *et al.*, 2012). Observam-se que ainda são poucos os estudos que têm sido conduzidos para quantificar a transpiração no âmbito de biomas em condições naturais, principalmente, no que se refere aos processos hidrológicos de regiões semiáridas no bioma Caatinga. Neste bioma, dada a caducifolia e adaptações fisiológicas das espécies vegetais, observa-se um alto potencial de complexidade na análise destas relações hídricas.

Geralmente, em estudos na área de recursos hídricos e de disponibilidade hídrica, há, frequentemente, deficiência de informações a respeito da quantificação das relações hídricas das plantas e participação da vegetação nestes processos. Vale ressaltar que estas informações são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de ações no manejo dos recursos naturais. Por outro lado, em estudos relacionados à fisiologia e relações hídricas das plantas raramente considera-se uma abordagem mais abrangente relacionada aos recursos hídricos. Acrescenta-se ainda, que nestes estudos, existe uma tendência para uma busca por identificação de características fisiológicas e genéticas individualizadas das plantas com maior tolerância ao estresse hídrico.

Estudos de balanço hídrico na escala de bacia hidrográfica, apesar de considerarem a vegetação como importante fator na dinâmica da água, abordam os processos relacionados a vegetação, como a evapotranspiração e transpiração, de forma indireta.

No passado, a magnitude do componente de transpiração era frequentemente uma saída desconhecida e, por conseguinte, calculado como um valor residual a partir de medições do balanço hídrico (FFOLLIOTT *et al.*, 2003). No entanto, as informações obtidas nesses estudos ajudam a melhorar os cálculos, os modelos hidrológicos e simulações de um balanço hídrico. Com informações mais precisas de todos os processos envolvidos no balanço hídrico na escala de bacia aumenta-se a previsibilidade da disponibilidade hídrica, e a eficiência da gestão dos recursos naturais.

Além disso, para Ungar *et al.*, (2013) a importância do conhecimento do uso da água pelas plantas é um dado fundamental para a compreensão da ecofisiologia de florestas em regiões secas. E para Naithani *et al.*, (2012), a integração aos estudos de hidrologia em bacias hidrográficas reside na possibilidade de avaliar o papel desempenhado pela transpiração na vegetação que pode melhorar no futuro o prognóstico de água, energia e ciclos de carbono de ecossistemas áridos e/ou semiáridos.

Silva *et al.*, (2017) estudando a evapotranspiração no bioma Caatinga reafirmam que conhecer o fluxo de água nas plantas é essencial para entender os possíveis ciclos de respostas associados ao funcionamento sazonal e avaliar as consequências das mudanças globais. Além disso, outros estudos indicam que a precipitação e a condição da água do solo têm influência integrada no uso da água da planta, e que as condições climáticas influenciam, predominantemente, as demandas transpirativas (Chen *et al.*, 2014; Silva, 2004; Zhao e Liu, 2010).

A falta de informações a respeito da demanda hídrica, do uso da água, por árvores do bioma Caatinga para compreensão da relação solo-planta-atmosfera e nas aplicações em modelos hidrológicos dificultam uma melhor análise hidrológica global, valorizando a contribuição do bioma Caatinga nestes processos de interação solo-água-atmosfera-planta (PINHEIRO *et al.*, 2016).

Portanto, a análise da transpiração em condições de Caatinga auxilia tanto no entendimento da participação da vegetação no ciclo hidrológico, como no conhecimento das características adaptativas deste bioma às condições semiáridas.

## QUESTÕES CIENTÍFICAS, HIPÓTESES E OBJETIVOS

### Questões científicas

Este capítulo tem como fundamentos três questões científicas, a saber:

- i) Como se dá a distribuição temporal do fluxo de seiva e transpiração em uma associação de solo e vegetação na Caatinga preservada.
- ii) Existe diferença na transpiração de plantas contrastantes do bioma Caatinga (caducifólia vs sempre verde)?
- iii) Ocorre transpiração noturna em plantas representativas do bioma Caatinga?

### Hipóteses

As questões levantadas suscitam algumas hipóteses, que se deseja testar. As principais hipóteses da pesquisa são:

1. O fluxo de seiva é cessado após a perda das folhas da vegetação na Caatinga.
2. O transporte do fluxo de seiva em plantas representativas do bioma Caatinga ocorre apenas sob radiação solar.
3. A ocorrência de transpiração noturna na Caatinga está relacionada ao modo de preservação da área foliar, ou seja, difere entre plantas decíduas e sempre verdes.

### Objetivos

Objetivo Geral:

Estudar através de dados obtidos *in situ* a dinâmica temporal da transpiração de plantas representativas da Caatinga.

Objetivos específicos:

- Avaliar *in situ* através de fluxo de seiva o processo de transpiração em espécies representativas do bioma Caatinga;
- Avaliar a dinâmica temporal da taxa de transpiração para uma associação de solo e vegetação no bioma Caatinga;
- Avaliar a transpiração noturna em Caatinga preservada.
- Avaliar a transpiração e a condutância estomática ao longo do dia e da noite em duas espécies, com e sem caducifolia, representativas do bioma Caatinga.

## REVISÃO DE LITERATURA

### Transpiração em plantas da Caatinga

A transpiração é um processo hidrológico crítico e complexo que liga as interações solo-planta-atmosfera e é muito importante nos ambientes áridos e semiáridos porque o escoamento superficial tem pouca importância prática no computo hidrológico Zheng & Wang (2015). No entanto, as investigações sobre a transpiração em espécies de terras áridas em condições naturais ainda são pouco abrangentes.

A transpiração vegetal corresponde ao processo de perda de água na forma de vapor, cedida ao meio ambiente mediante um sentido unidirecional, ou seja, da ascensão hídrica desde a região radicular em direção às folhas, e dessas para a atmosfera.

Nos vegetais, a quantidade de folhas e a superfície foliar são fatores que determinam maior ou menor taxa de transpiração. Isso porque na estrutura de uma folha existem células estomáticas responsáveis pelas trocas gasosas. Para Barros & Soares (2013) embora as espécies estudadas sejam caducifólias, elas enfrentam condições adversas, mesmo no período mais úmido, pois na Caatinga as chuvas são erráticas e irregulares, as temperaturas altas e a radiação intensa. Desse modo, estruturas anatômicas que auxiliem na economia hídrica destas plantas são importantes para a sobrevivência.

A regulação da transpiração nos vegetais acontece principalmente através de duas camadas de revestimento impermeáveis: a epiderme (cutícula cerosa) e o súber (cortiça). Em compensação, para acontecer as trocas gasosas foram desenvolvidas estruturas para permitir as trocas gasosas e evitar a desidratação: no súber a lenticela e na epiderme os estômatos. Assim, a transpiração nas plantas pode ser cuticular, lenticular e estomática (Salisbury & Ross, 1992). A primeira é uma interface líquido-vapor na qual ocorre a evaporação, as outras duas são uma via estrutural para o movimento do vapor que existe entre um espaço já preenchido com vapor de água e a atmosfera.

Os principais fatores que influenciam na transpiração dos vegetais podem ser divididos em fatores ambientais e fatores da própria planta. Os fatores ambientais que influenciam a transpiração, destacam-se: a radiação solar, a temperatura, a umidade relativa do ar e o vento (GREGÓRIO, 2014). Além desses fatores, as características químicas e principalmente físicas do solo têm importância, associado a própria disponibilidade de água no solo.

Geralmente as espécies de Caatinga apresentam adaptações morfológicas e/ou fisiológicas que possibilitam a sobrevivência em condições de seca. Dentre essas, pode-se destacar o mecanismo de fechamento estomático, a redução da área foliar (Diniz, 1999), a senescência e a caducifolia (Santos & Carlesso, 1998), bem como o ajustamento osmótico (Santos, 2014).

No bioma Caatinga ocorre elevada radiação solar e os valores de evapotranspiração potencial podem superar 2.000 mm/ano. Nesse contexto, o conhecimento de como esses processos desencadeiam eventos sobre a vegetação (germinação, crescimento, transpiração, ciclagem de nutrientes, biota do solo, dentre outros) é de grande importância para consolidação de estratégias de utilização racional dos recursos locais da região e ajudam a explicar adaptabilidade e persistência de muitas espécies nesse ecossistema (Parente, 2009).

Pinheiro *et al.* (2016), estudando o bioma Caatinga através de simulações hidrológicas com o modelo SWAP, na bacia experimental de Aiuba, identificou que a quantidade de precipitação devolvida para a atmosfera (através da Transpiração + Evaporação + Interceptação) em média é de 75% ( $\pm 17\%$ ). Além disso, para anos com menos precipitação, a percentagem de precipitação devolvida para a atmosfera é de quase 100% ou pode ser até ligeiramente superior.

### **Fluxo de Seiva e redistribuição hidráulica em espécies vegetais**

Fluxo de seiva ao longo do sistema de transporte de água de longa distância em plantas é essencial para manter a conexão hidráulica entre o solo e a atmosfera. Estudar o movimento e a dinâmica da seiva em toda a planta é, portanto, fundamental para o progresso do nosso conhecimento científico sobre a função hidráulica da planta ou disfunção e crescimento em um determinado ambiente Steppe *et al.*, (2015).

O IX Workshop Internacional sobre Fluxo de Seiva, realizado em Ghent na Bélgica, de 4 a 7 de junho de 2013, com mais de 160 participantes de 30 países diferentes, discutiu o entendimento atual da hidráulica de plantas e a importância dos estudos de fluxo de seiva para aprofundar nossa compreensão de uso e função da água em diferentes condições ambientais. As discussões trataram não apenas da metodologia de medição, mas concentraram-se principalmente nas novas descobertas sobre a função hidráulica da planta, com uma sessão especificamente abordando a cavitação como um fator limitante na via hidráulica. Além disso, considerou-se a importância e aplicabilidade da modelagem de transporte de água para aprofundar a compreensão da hidráulica da planta e o uso do fluxo de seiva para algumas

aplicações práticas Steppe *et al.*, (2015). Eller *et al.*, (2015) relataram evidências de captação foliar de água de nevoeiro pela árvore tropical *Drimys brasiliensis* Miers., mostrando que a captação de água de nevoeiro causou fluxo de seiva **negativo** de até 26% da transpiração diária máxima (Eller *et al.*, 2013). Além disso, mostraram como as condições atmosféricas e de solo adversos controlam a dinâmica diurna, **noturna** e sazonal do fluxo de seiva em *D. brasiliensis*. Este estudo contribui para a crescente evidência de que o movimento da água ao longo do sistema solo-planta-atmosfera pode ser revertido (Goldsmith, 2013). O referido autor ao comentar os resultados obtidos por Eller *et al.*, 2013 confirma que o movimento da seiva em toda a planta ocorre em função de todas as fontes de água disponíveis causando mudanças nos gradientes de potencial de água. Dependendo destes gradientes de potencial de água e das resistências no percurso hidráulico, a água será distribuída por todo o sistema solo-planta-atmosfera de uma forma multidireccional.

### ***Fluxo de seiva noturno***

Gao *et al.*, (2016) fizeram um resumo das hipóteses que explicam a ocorrência do fluxo da seiva durante a noite, a condutância estomática ou a perda de água da transpiração que ocorre em plantas: (i) captação de nitrogênio ou aquisição de nutrientes; (ii) aumento da fotossíntese do próximo dia; (iii) via de entrega de oxigênio para respiração interna da madeira; (iv) reabastecimento (redistribuição hidráulica) ou respostas inevitáveis à demanda por evaporação;

De acordo com Fisher *et al.*, (2007), os modelos e equações de evapotranspiração freqüentemente dependem da radiação líquida para estimar limites superior, e alguns modelos reduzem a evapotranspiração para zero à noite quando não há radiação solar. Pesquisas emergentes (Marenco *et al.*, 2014; Zeppel *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2017) mostram, no entanto, que a transpiração pode ocorrer durante a noite em uma variedade de tipos de vegetação e biomas.

O fluxo de seiva noturno tem sido em grande parte considerada insignificante e a maior parte da pesquisa de fluxo de seiva se concentrou excessivamente nos padrões diurnos. Além disso, em pesquisas anteriores, acreditava-se que fluxo de seiva noturno deveria ser igual a zero. Assim, todos os valores de fluxo de seiva eram "corrigidos", o que levou à subestimação do fluxo total, ou seja, da transpiração (Daley e Phillips 2006).

Forster (2014) analisou o fluxo de seiva noturno de 98 espécies (246 dados) e verificou que o fluxo de seiva noturna ocorre em muitos táxons, estações e biomas. Não há compreensão geral quanto à quantidade de fluxo de seiva noturno ocorrido e se é uma

contribuição significativa para o fluxo de seiva diário total. Para as espécies analisadas o fluxo de seiva noturno representou em média, 12% do fluxo de seiva diário, com o maior valor chegando a 69%. Esta proporção (fluxo de seiva noturno / fluxo de seiva diário) é freqüentemente maior nos sistemas áridos do deserto (30-60%, Snyder *et al.*, 2003), embora na maioria dos ecossistemas seja geralmente de 7-10%. Estes valores potencialmente elevados podem ter implicações significativas para a compreensão dos processos hídricos e precisam ser quantificados com precisão.

Além do mais, Forster (2014) identificou que houve significativamente menos contribuição de fluxo de seiva noturno no inverno do que em outras estações, e significativamente menos fluxo de seiva noturno na estação chuvosa do que na estação seca. Os biomas equatoriais e tropicais apresentaram valores maiores do que os biomas temperados e nemorais (parte mais quente da zona temperada, mais quente a parte boreal).

O fluxo de seiva noturno tem sido pouco relacionado com a condutância estomática noturna. Muitos autores tem correlacionado positivamente com fatores de condução ambientais como o déficit de pressão de vapor (DPV, ver Mitchell *et al.*, 2009; Zeppel *et al.*, 2010; Pfautsch *et al.*, 2011; Rosado *et al.*, 2012; Deng *et al.*, 2015; Doronila e Forster 2015), ou uma combinação de DPV e velocidade do vento (Daley e Phillips 2006; Phillips *et al.*, 2010).

Para Marengo *et al.*, (2014), estudando a fisiologia de espécies florestais da Amazônia identificou que o fluxo noturno ascendente pode indicar duas coisas: (1) transpiração noturna ou (2) fluxo de seiva para recarga da água dos tecidos e estruturas de armazenamento de água, principalmente no tronco e galhos grossos da árvore. A transpiração noturna tem sido relatada em várias espécies e está principalmente relacionada ao déficit de pressão de vapor, DPV. Por isso, caso os estômatos não estejam perdendo água, como normalmente ocorre, quando o DPV é nulo (assumindo que a folha e o ar tem a mesma temperatura), o fluxo de seiva noturno está essencialmente direcionado para a recarga das estruturas de armazenamento (redistribuição hidráulica), assumindo participação nula do fenômeno de gutação em árvores. Conquanto, tanto a redistribuição hidráulica como a transpiração atuam como forças motrizes do fluxo noturno quando a atmosfera está insaturada com vapor de água (umidade do ar < 100%).

As plantas não fecham completamente os estômatos durante a noite e inevitavelmente perdem água, o que é contraditório, porque minimizam a perda de água durante a assimilação diurna do carbono. Relata-se que uma quantidade substancial de transpiração noturna (E) ocorre na maioria das espécies de plantas dentro de diferentes biomas ou ambientes (Forster 2014).

O fluxo de seiva noturno envolve um processo complicado não apenas como consequência do fechamento estomático incompleto (Zeppel *et al.*, 2014). Pode em alguns casos representar a perda de água através da transpiração ocorrido durante o dia à medida que a água se move ao longo do caule com certo atraso em relação a transpiração. O reabastecimento do caule e a transpiração noturna da copa (medida como condutância estomática) são as principais fontes de fluxo de seiva noturna (Caird, Richards & Donovan, 2007, Fisher, Baldocchi, Misson, Dawson & Goldstein, 2007, Zeppel *et al.*, 2010). A capacidade para recarga do tronco é importante para as árvores evitar o estresse hídrico que pode obstruir o sistema de transporte de água (Scholz *et al.*, 2002; 2008). Meinzer, Johnson, Lachenbruch, McCulloh e Woodruff (2009) indicaram que as espécies com menor potencial de água negativo (induzindo uma perda de 50% de condutividade hidráulica) possuíam a melhor capacidade para o reenchimento do caule.

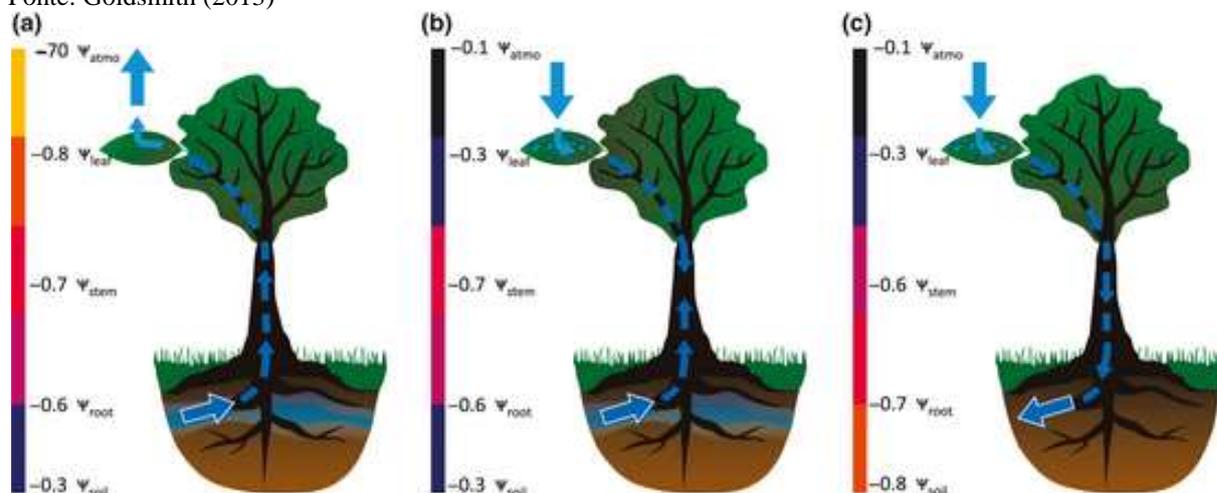
Para Zhu *et al.*, (2017) estudando fluxo de seiva na província de Henan, na China Central numa vegetação constituída por árvores decíduais de folhas largas, com 45 anos de idade, com índice de área foliar máximo médio mensal (IAF) de 3,71 ( $\pm$  0,17) m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, encontraram uma proporção de fluxo de seiva noturno para o fluxo de seiva total diário para as duas espécies (*Liquidambar formosana* Hance e *Quercus variabilis* Blume) de 17,9% e 23,2%, respectivamente. Os autores ainda destacam que o fluxo de seiva noturno é fundamental para a compreensão do uso da água pela planta esse achado fornece uma nova visão sobre o papel do fluxo de seiva noturna, embora o transporte noturno de água em relação às outras variáveis fisiológicas de árvores, como a condutância estomática, precise ser entendido no futuro.

### ***Fluxo de seiva negativo ou redistribuição hidráulica***

Para Goldsmith (2013) a afirmação de Nobel (2009) “a água se move do solo, através de uma planta, para a atmosfera circundante”, não é incorreta. No entanto, Eller *et al.*, (2013) fornecem evidências convincentes de que ela está incompleta. Assim, três cenários prováveis para o movimento da água através de plantas (Figura 1) com base em gradientes do potencial hídrico é possível: (a), a água move-se do potencial hídrico do solo para um potencial hídrico atmosférico inferior pela transpiração; (b), a água move-se de um potencial hídrico atmosférico mais alto (durante um evento de precipitação que molha a folha) para um potencial hídrico do caule inferior pela captação de água foliar, enquanto simultaneamente se desloca de potencial hídrico do solo para potencial hídrico do caule inferior, reabastecendo a planta nas duas direções; e (c), a água move-se de um potencial hídrico atmosférico mais alto (durante um

evento de umedecimento de folha) a um potencial hídrico do solo inferior pela captação foliar de água.

**Figura 9** - Mudanças de direção do fluxo no sistema solo-planta-atmosfera, mostrando os cenários a, b e c.  
Fonte: Goldsmith (2013)



De acordo com Forster (2014) uma característica significativa do fluxo de seiva noturna é o movimento da seiva em uma direção que não é a solo-planta-atmosfera. Conhecida como fluxo negativo, fluxo reverso, elevação hidráulica ou redistribuição hidráulica, sua medição está se tornando mais comum em diferentes espécies e biomas.

Oito espécies de plantas do Cerrado brasileiro (*Sclerobium paniculatum* Vog.; *Scheffler Macrocarpa* (Seem.); *Byrsonima Crassa* Nied.; *Styrax ferrugineus* Nees & Mart.; *Dalbergia miscolobium* Benth.; *Qualea parviflora* Mart.; *Blepharocali Salicifolius* (H.B. & K.) Berg.; *Vochysia elliptica* Mart.) foram estudadas por Scholz *et al.*, (2002) e apresentaram três padrões de fluxo de seiva: (i) as raízes pequenas e rasas exibem fluxo de seiva positivo durante o dia e fluxo de seiva negativo durante a noite, enquanto que o fluxo de seiva nas raízes de pivotante é positivo durante as 24 horas. Neste caso, espera-se que a umidificação parcial das camadas superiores do solo por redistribuição hidráulica ocorra apenas à noite, quando o potencial hídrico da planta é menos negativo do que o potencial hídrico das camadas superiores do solo. (ii) O outro padrão de fluxo de seiva radicular foi semelhante ao primeiro, exceto que o potencial hídrico do solo foi aparentemente baixo o suficiente para induzir o fluxo negativo contínuo de seiva nas raízes pequenas. Neste caso, espera-se que a redistribuição hidráulica e a umidificação parcial das camadas superiores do solo ocorram continuamente (Burgess *et al.*, 2000). O fluxo inverso contínuo também tem sido observado em raízes posteriores ao início da estação chuvosa (Smith *et al.*, 1999). (iii) O terceiro padrão de fluxo de seiva foi observado no final da estação seca após um evento de precipitação elevado (44,6 mm) quando o fluxo de

seiva se tornou negativo na raiz principal, e positivo nas raízes pequenas, indicando movimento de água das camadas superiores do solo para camadas mais profundas do solo.

Portanto, a redistribuição hidráulica é uma adaptação para evitar falha do sistema hidráulico da planta (cavitação e embolismo), induzido pela seca, que tem sido frequentemente associada à morte súbita de plantas expostas a estresse hídrico crítico (Davis *et al.*, 2002; Tyree *et al.*, 2002).

Enquanto a transpiração é a principal força motriz do movimento da água, esta pode se redistribuir dentro da planta durante a noite ou durante períodos de transpiração mínima, pode sair das raízes e hidratar a rizosfera (Richards e Caldwell, 1987). A condição e a taxa que a água se redistribui dentro dos tecidos vegetais são importantes e variam entre espécies (Bauerle *et al.*, 2008).

O movimento ascendente da água devido à transpiração é interrompido quando o potencial de água do solo decresce e fica abaixo do potencial de água da folha. Sob estas circunstâncias, a água pode mover-se em qualquer direção no sistema planta-solo (Nadezhdina *et al.*, 2010). Isto é geralmente designado como redistribuição hidráulica.

Para Nadezhdina *et al.*, (2010) a redistribuição hidráulica ocorre geralmente sob condições de secagem do solo, quando os padrões de variação em potencial hídrico mudam substancialmente ao longo do dia. Se a noite cair o potencial hídrico da folha, o fluxo pode mudar de direção de acropetal (para cima) para basipetal (para baixo) e a água passa para as raízes na direção do potencial hídrico do solo, mais baixos. Além disso, o grande volume de solo ocupado pelas raízes geralmente tem uma distribuição muito heterogênea da umidade do solo. Os gradientes de potencial de água do solo resultantes causam o movimento da água entre as próprias raízes.

Procurando entender as condições de elevação hidráulica no Cerrado brasileiro Scholz *et al.*, (2008) mediram fluxo de seiva no caule e nas raízes das árvores, e identificaram a ocorrência do fluxo de seiva reverso em espécies caducifólias e semicaducifólias, principalmente durante a estação seca, enquanto as espécies perenes não apresentaram fluxo reverso. As espécies decídua apresentavam raízes rasas e profundas (sistemas radiculares dimórficos), enquanto que as espécies sempre-verdes tinham raízes profundas (sistemas de raízes monomórficas). Nas espécies caducifólias e semicaducifólias, a contribuição das raízes pivotantes para a transpiração aumentou substancialmente à medida que a estação seca avançava. Alterações sazonais na contribuição das raízes pivotantes para a transpiração não foram observadas nas espécies perenes (sempre-verdes).

O uso da água por árvores de floresta tropical de montanhas, no Brasil, estudadas por Eller *et al.*, (2015) indicam padrões muito dinâmico do uso da água. Os autores identificaram que a espécie, submetida a estufas, foi capaz de transportar água para baixo em direção ao solo durante eventos de molhamento foliar, provavelmente uma consequência da captação foliar, bem como altas taxas de transpiração noturna durante noites mais secas. Esses dois processos podem representar fontes importantes de ganhos e perda de água para a planta, mas pouco se sabe sobre os fatores ambientais que controlam esses fluxos.

Em floresta tropical de montanhas Eller *et al.*, (2013) identificaram redistribuição hidráulica ocasionado pela captação de água foliar e causou reversões no fluxo de seiva em caules e raízes de até 26% da transpiração máxima diária. A água da névoa transportada através do xilema atingiu reservatórios subterrâneos e potencial de água foliar aumentado, fotossíntese, condutância estomática e crescimento em relação às plantas abrigadas da neblina.

Em áreas áridas da china onde a precipitação média inferior a 200 mm por ano, Li *et al.*, (2014), estudando plantas do deserto identificaram aumento médio do teor de água das folhas após a submersão de 29% e 21% para as folhas maduras e tenras, respectivamente. Também ocorreu fluxo de seiva negativo quando a humidade relativa foi persistentemente acima de 90%. A porcentagem de fluxo de seiva negativo máximo diário atingiu 11%, e sua quantidade respondeu por 8% do fluxo de seiva diurno. A captação foliar se mostrou ser uma importante estratégia de aquisição de água para plantas do deserto.

As árvores sempre verdes da Caatinga, como o Juazeiro (*Zizyphus joazeiro* Mart.), podem utilizar estratégias semelhantes às pesquisadas por de Li *et al.*, (2014), captação foliar, armazenamento no tronco, armazenamento nas raízes, elevação (redistribuição) hidráulica entre as raízes para captação de nutrientes. Parcela considerável dos pesquisadores da área ressalta a necessidade de integrar e aprofundar o conhecimento sobre o funcionamento hidráulico de plantas.

### **Métodos de mensuração do fluxo de seiva**

De acordo com Pérez-Harguindeguy *et al.*, (2013), o transporte de água do solo para as folhas é fundamental para atividade de plantas terrestres. Ao substituir a água perdida para a atmosfera através da transpiração, o transporte de água impede que as folhas desenvolvam potenciais hídricos altamente negativos, além disso, garante a continuidade da fotossíntese.

O uso da água pelas plantas é um componente importante do ciclo da água, uma importante medida da quantidade, do rendimento e da qualidade, e um indicador útil do estado das águas, empregada na avaliação das condições solo-planta-atmosfera. Fluxo de seiva é um indicador de desempenho fisiológico da planta que permite integrar os compartimentos solo-atmosfera através da estrutura conjunta em função do sistema radicular absorvente, a haste condução do caule, e das folhas responsável pelas trocas de gasosas.

Técnicas de medição de fluxo de seiva permitem estimar as tendências diárias e sazonais de utilização de água, para fornecer recomendações de irrigação e auxiliar no diagnóstico precoce de estresse e a sua prevenção.

Segundo Pérez-Harguindeguy *et al.*, (2013) a relação entre a área foliar (normalmente definida como a área total projetada de folhas) e a área do alburno (transversal de alburno que fornece água para essas folhas) é fundamental para entender o transporte de água. O inverso desta proporção, isto é, a relação alburno-folha, é também utilizado na literatura, e frequentemente referido como o "valor de Huber" (Huber 1928).

O valor de Huber é um parâmetro que une a demanda de transpiração com a capacidade de transporte de água e pode indicar ajustes fisiológicos das plantas a variações sazonais do ambiente.

A avaliação da transpiração através de métodos térmicos mais utilizadas são: velocidade do pulso de calor (Huber, 1932); balanço de calor no segmento do tronco (Čermák *et al.*, 1973); balanço de calor no caule (Sakuratani, 1981); sonda de dissipação térmica (Granier, 1985); e, deformação do campo de calor (Nadezhdina *et al.*, 1998).

Nas últimas décadas, vêm sendo testados os “métodos térmicos” principalmente a técnica da “sonda de dissipação térmica” que, apesar da complexidade envolvida, vem demonstrando bons resultados para estimativas da transpiração de culturas (GRANIER, 1987; HUBBARD *et al.*, 2004; TATARINOV *et al.*, 2005; VELLAME, 2007; PINTO Jr. *et al.*, 2013; ZHANG, *et al.*, 2015). Esses métodos utilizam fornecimento de calor ao caule, atuando como “traçador” da seiva, o qual pode ser relacionado com a densidade de fluxo de seiva e, por consequência, com a transpiração (DELGADO-ROJAS *et al.*, 2007).

A técnica denominada de “sonda de dissipação térmica” (SDT) ou sonda de Granier, sugerida originalmente por GRANIER (1985), tem sido recomendado para uso em espécies lenhosas e vem sendo empregado por vários pesquisadores, demonstrando ser uma alternativa promissora na medida da transpiração em plantas arbóreas.

Granier & Berger (1986) sugeriram que o método SDT poderia ser usado sem a calibração necessária para a maioria das espécies lenhosas, porque os cálculos da densidade de

fluxo da seiva são independentes das características da anatomia da madeira. Clearwater *et al.*, (1999) concluíram calibrações com espécies adicionais e confirmaram que a calibração original de Granier ocorreu quando toda a sonda aquecida estava em contato com xilema condutor. Entretanto, o método subestimou a velocidade da seiva quando parte da sonda estava em contato com o cerne ou a casca (não condutores); A subestimação foi proporcional à porcentagem do sensor em contato com xilema não condutor. Clearwater *et al.*, (1999) desenvolveram um fator de correção que poderia ser usado para corrigir erros de posicionamento do sensor quando a proporção de contato com o tecido não-condutor era conhecida e recomendou o uso de sondas <20mm e com profundidades de termopar múltiplas para evitar esses erros. Trabalhos recentes também demonstraram que a calibração original de Granier não é universalmente aplicável a todos os tipos de espécies e xilemas e que estimativas prévias de taxas absolutas de uso de água para espécies anelares porosas obtidas usando os coeficientes de calibração originais podem estar associadas a erro substancial. Os dados de calibração devem ser coletados sempre que possível (Bush *et al.*, 2010).

Esse método de medida só permite conhecer um dos componentes da evapotranspiração, a transpiração, mas permite acompanhar o funcionamento hídrico das plantas (*in situ*) no seu meio ambiente natural (não destrutivo) e em condições não perturbadas, durante períodos prolongados (dias a meses), ou seja, a avaliação do fluxo de seiva é uma forma de quantificar a transpiração em plantas quando se trabalha em escala diária, que conta com a vantagem da facilidade de automação (VELLAME, 2009).

### **Método de Granier - Sonda de Dissipação Térmica (SDT)**

O princípio do método de Granier (1985) pode ser explicado com base nos trabalhos de Coelho, Vellame & Fraga Júnior (2012), Lu, Urban & Zhao (2004), Vellame *et al.*, (2009), Pamponet *et al.*, (2012), Cabibel & Do (1991).

#### ***Teoria: o método da sonda de dissipação térmica, à luz da termodinâmica***

A partir das leituras realizadas percebeu-se que Granier recorreu a dois princípios da termodinâmica: (i) a lei do resfriamento de Newton e (ii) o efeito Joule.

A (Equação 3) descreve a transferência de calor de um local para outro pelo movimento de fluidos, e nos diz que a taxa de transferência de calor  $Q$  numa interface sólida é diretamente proporcional ao produto da área  $S$  dessa interface (no nosso caso área do xilema

(AS) pela diferença de temperatura ( $T - T_f$ ) entre o fluido e a parede do sólido nele imerso, sendo o coeficiente de película ( $h$ ) a constante de proporcionalidade (Garcia *et al.*, 2017).

$$\frac{dQ_E}{dt} = hS(T - T_f) \quad \text{Eq. 3}$$

Onde,

$Q_E$  é a energia térmica em Joules;

$h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W.m}^{-2}\text{C}^{-1}$ );

$S$  é a área de transferência de calor, ou seja, a área do xilema (AS) ( $\text{m}^2$ );

$T$  é a temperatura da sonda ( $^{\circ}\text{C}$ ); e

$T_f$  é a temperatura do caule na ausência de aquecimento; ou seja, a temperatura adequadamente longe da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ ).

O Efeito Joule (Equação 4) é descrito por Alves *et al.*, (2016) como sendo a potência dissipada quando um condutor é percorrido por uma corrente elétrica constante qualquer, e assim, ocorrerá a transformação da energia elétrica em energia térmica elevando a temperatura do condutor.

$$P = R \cdot I^2 \quad \text{Eq. 4}$$

Onde,

$P$  é a potência dissipada expressa em watts (W);

$R$  é a resistência elétrica do elemento de aquecimento ( $\Omega$ ); e

$I$  é a intensidade da corrente elétrica (A).

Sob condições de equilíbrio térmico do sistema, estabelecido entre a sonda de dissipação térmica e seu entorno (madeira e seiva), e para uma densidade de fluxo de seiva constante, pode-se supor que a entrada de calor pelo efeito Joule é igual à quantidade de calor dissipado por convecção e condução na parede da sonda, conforme equação (5).

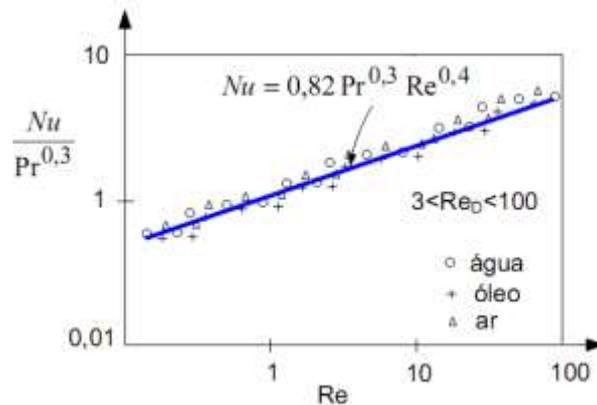
$$hS(T - T_f) = RI^2 \quad \text{Eq. 5}$$

O coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) depende da massa específica ( $\rho$ ), da viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), do calor específico ( $c_p$ ), da condutividade térmica ( $k$ ) do fluido, da velocidade de fluxo ( $v$ ) e do diâmetro da seção de fluxo transversal ( $D$ ).

O número de Nusselt ( $Nu$ ) é uma grandeza bastante utilizada para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção, e é função do número de Reynolds ( $Re$ ), assim como do número de Prandtl ( $Pr$ ). Em problemas de transferência de calor, o número de Prandtl controla a espessura relativa das camadas limite de momento e térmica. Quando  $Pr$  é

pequeno, significa que o calor difunde-se muito facilmente comparado à velocidade (momento). Vários ensaios realizados com ar, óleo e água mostraram que existe uma ótima correlação envolvendo estes três adimensionais, conforme ilustrado na Figura 10.

**Figura 10** - Correlação entre número de Reynolds, número de Prandtl e número de Nusselt. Para água, óleo e ar. Fonte: Moreira, (2017).



A relação entre essas variáveis aplicadas aos trocadores de calor é mostrada na equação (6).

$$Nu = C Re^n Pr^m$$

Eq. 6

Em que:

$$Nu = \frac{hD}{k} - \text{Número de Nusselt};$$

$h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção;

$D$  é o diâmetro interno do tubo condutor;

$k$  é o coeficiente de condutividade térmica do fluido.

$$Re = \frac{\sigma v D}{\mu} - \text{Número de Reynolds};$$

$\sigma$  é massa específica do fluido;

$D$  é o diâmetro interno do tubo condutor;

$v$  é velocidade média do fluido;

$\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} - \text{Número de Prandtl (para água = 4,6)};$$

$\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido;

$c_p$  é o calor específico;

$k$  é o coeficiente de condutividade térmica do fluido

C, n e m são parâmetros empíricos que dependem da geometria do problema e do tipo de escoamento.

A densidade do fluxo da seiva foi relacionada ao coeficiente h na equação (7), que é derivada da equação (6), considerando  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $c_p$ , k e D parâmetros; fazendo com que a velocidade (Pr) seja igual à densidade do fluxo da seiva -  $F_d$  ( $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) e  $\alpha$  é igual a  $C \cdot Pr^m$  e  $\beta$  igual ao coeficiente n da equação (6):

$$h = h_0(1 + \alpha F_d^\beta) \quad \text{Eq. 7}$$

$h_0$  - coeficiente de troca térmica quando o fluxo é zero, isto é,  $F_d = 0$

$F_d$  - densidade de fluxo de seiva ( $m^3 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )

$\alpha$  e  $\beta$  - coeficientes que dependem da quantidade de calor aplicado.

$h_0$  é calculado a partir da equação (5), na equação (7) para  $F_d=0$ , temos:

$$h = h_0(1 + \alpha F_d^\beta) \rightarrow h = h_0(1 + \alpha 0^\beta) \rightarrow h = h_0$$

Mas  $h_0$  ocorre quando  $T = T_{max}$ , assim de (5) temos que:

$$h_0 S(T_{max} - T_f) = R \cdot P$$

Isolando  $h_0$  tem-se:

$$h_0 = \frac{R P^2}{S(T_{max} - T_f)} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde  $T_{max}$  é a temperatura quando a densidade do fluxo de seiva é zero ( $F_d=0$ ), isto é, quando ocorre somente perda de calor condutora.

Quando  $F_d \neq 0$  e é constante, pode ser descrito por:

$$F_d = \left[ \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{h - h_0}{h_0} \right]^{1/\beta} \quad \text{Eq. 9}$$

Combinado as equações 5, 7 e 8, temos:

$$F_d = \left[ \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{(T_{max} - T_f) - (T - T_f)}{T - T_f} \right]^{1/\beta}$$

$$F_d = \left[ \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right]^{1/\beta}, \text{ para } K = [(\Delta T_{max} - \Delta T) / \Delta T]$$

$$F_d = \left[ \frac{1}{\alpha} \cdot K \right]^{1/\beta} \quad \text{Eq. 10}$$

$$K = \alpha F_d^\beta \quad \text{Eq. 11}$$

$\Delta T_{max}$ , diferença máxima de temperatura estabilizada entre as sondas aquecida e não aquecida para fluxo zero ( $F_d = 0$ );

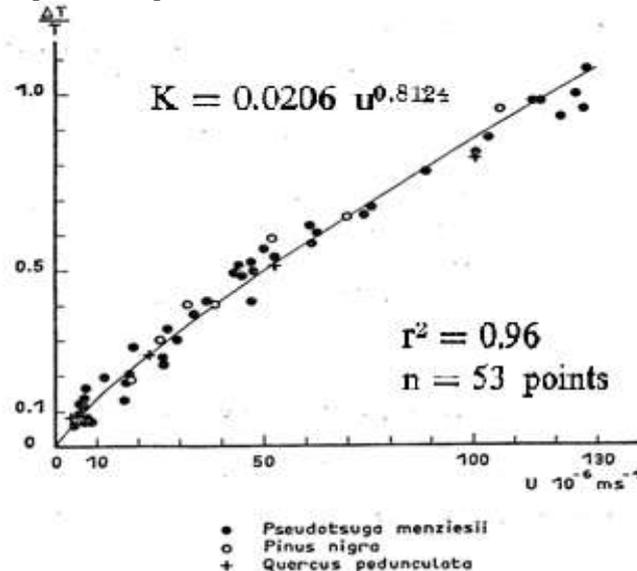
$\Delta T$ , diferença de temperatura entre as sondas aquecida e não aquecida num determinado  $F_d$ ;

K, índice de fluxo (adimensional)

### Calibração original do sensor Granier

Experimentos realizados por Granier (1985) mostraram que K era altamente correlacionado com a densidade de fluxo da seiva ( $F_d$ ). Foi realizada uma série de calibrações das sondas de fluxo de seiva em diversos caules de três espécies de árvores diferentes (*Pseudotsugamenziesii*, *Pinus nigra* e *Quercuspedunculata*). Então, Granier propôs uma relação experimental entre K e  $F_d$ , que não depende das espécies arbóreas estudadas (porosidade do alburno).

**Figura 11** - Gráfico da calibração original de Granier com relação entre K e a densidade do fluxo de Seiva U (adotamos a simbologia  $F_d$ ) para três espécies. Fonte: Granier, (1985).



A equação empírica proposta por Granier (1985) para a relação entre K e  $F_d$  foi:

$$K = [(\Delta T_{max} - \Delta T) / \Delta T] \quad \text{Eq. 12}$$

Adotou-se  $\alpha$  e  $\beta$  os coeficientes da equação da relação entre as três espécies.

$$K = \alpha F_d^\beta = 0,0206 \times 10^{-6} F_d^{0,812} \quad \text{Eq. 13}$$

A equação 11 pode ser rearranjado como:

$$F_d = 118,99 \times 10^{-6} [(\Delta T_{max} - \Delta T) / \Delta T]^{1,231} \quad \text{Eq. 14}$$

O fluxo de seiva -  $F_s$  (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) é calculado com base na área de seção efetiva do xilema que leva à seiva bruta - AS (m<sup>2</sup>), ou:

$$F_s = 118,99 \cdot 10^{-6} \cdot K^{1,231} \cdot AS \quad \text{Eq. 15}$$

O método de Granier é uma das técnicas mais usadas no mundo para medição da transpiração de plantas lenhosas. Isso se deve à facilidade na construção da sonda e a simplicidade nas medidas, apenas duas (a diferença de temperatura e a seção de caule). Isso facilita bastante no momento do monitoramento de plantas no campo. Uma desvantagem pode ser atribuída à própria equação original (Equação 15) devido ao fato da mesma assumir que, durante a noite, principalmente na madrugada, quando a medida de  $T = T_{max}$ , o fluxo de seiva é nulo. No entanto, pode ser que a ocorrência de fluxo nulo não seja verdadeira, já que isso depende da condição hídrica do solo, do porte e fisiologia da planta e da época do ano.

### **Espécies representativas da Caatinga: a Catingueira e o Juazeiro**

#### **Catingueira (*Poincianella pyramidalis* (Tul)):**

A espécie arbórea *Poincianella pyramidalis* (Tul), pertencente à família Leguminosae, subfamília Caesalpinoideae, popularmente conhecida como catingueira ou pau rato. É uma espécie endêmica da Caatinga, de ampla dispersão no Nordeste semiárido, podendo ser encontrada em diversas associações vegetais, no entanto é endêmica da Caatinga. Cresce bem nas várzeas úmidas, chegando a atingir mais de 10 m e até 0,50 centímetros de diâmetro na base. Ocorre nos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, sendo considerada endêmica da Caatinga (MAIA, 2004). Em áreas de carrasco se reduz a arbustos de menos de 2 m e poucos centímetros de diâmetro na base.

É uma das plantas sertanejas cujos gomos brotam nas primeiras manifestações de umidade, portanto é uma anunciadora do período das chuvas (ALVES *et al.*, 2007). Tem potencial para reflorestamento, já que possui madeira com boas qualidades para construção, lenha e carvão. Possui bom teor de proteína bruta (em torno de 19%), a espécie apresenta-se como boa alternativa alimentar para os rebanhos (Zanine *et al.*, 2005).

Suas folhas são bipinadas, bijugadas, e mais uma pina terminal, com 5 a 11 folíolos, alternos, obtusos, oblongos, coriáceos, com pêlos escuros estrelados. O alburno branco-amarelado e cerne castanho-escuro, com riscos, esbranquiçados.

Pereira (2016) estudando a representação da arquitetura da copa de indivíduos jovens de *Poincianella pyramidalis* (Tul.), identificou que não houve um padrão de desenvolvimento nesses indivíduos jovens, e que essa versatilidade na copa desses indivíduos, realça a discussão da escassez de água no solo e na planta, que é responsável pela deciduidade de espécies, por promover diversas adaptações morfofisiológicas, sinalizando certa plasticidade

fenotípica, afetando o crescimento e a absorção de nutrientes, pela sensibilidade das condições adversas.

### **Juazeiro (*Ziziphus joazeiro*):**

O juazeiro (*Ziziphus joazeiro*), espécie pertencente à família Rhamnaceae, também conhecido como juá, joá-de-espinho, jurubeba. É uma árvore brasileira típica dos sertões nordestinos, endêmica do Bioma Caatinga, conserva-se verde durante todo o ano e nunca se despe de toda a folhagem, apresentando potencial econômico e relevância para a região Semiárida (Araújo *et al.*, 2015).

Jua (*Ziziphus joazeiro*, Rhamnaceae) é uma planta muito importante para as pessoas que vivem na Caatinga. Essa planta tem muitos usos, como folhas para alimentação animal, frutas para alimentação e sua casca serve para fazer detergente, dentifrício e produto fitoterápico (Ribeiro *et al.*, 2014).

Para Carvalho (2007) *Ziziphus joazeiro* é uma árvore perenifólia, graças ao amplo e profundo sistema radicial, capaz de coletar a escassa umidade existente no subsolo. Às vezes, embora raramente, quando a água do solo se torna extremamente escassa, pode perder por completo a folhagem.

Segundo Dantas (2014) trata-se de planta perenifólia, heliófita, autotrófica e apresenta raízes pivotantes, que possibilitam a obtenção de água do subsolo, fator esse que permite que a planta permaneça verde até em períodos de longas secas. O juazeiro desenvolve-se preferencialmente em solos aluviais argilosos; no entanto, pode ser encontrado em tabuleiros pedregosos e áridos. Todos os anos, ele gera um amplo número de sementes, que são largamente distribuídas pela fauna nativa. Se a germinação das sementes ocorrer em ambientes diferenciados, nos quais a planta resistirá, mesmo se incidir um período de seca, suas folhas não caem, diferentemente das demais plantas do bioma (COSTA, 2011).

### **Fatores externos que influenciam o processo de transpiração vegetal**

Os fatores externos influenciam a transpiração na medida em que alteram a diferença de pressão de vapor entre a superfície da planta e o ar que a envolve. Portanto, a transpiração intensifica-se com a diminuição da umidade relativa e com o aumento da temperatura do ar (LARCHER, 2006). Segundo seu modelo, Sarmiento *et al.*, (1985)

concluíram que a transpiração das espécies lenhosas depende mais das condições atmosféricas do que da disponibilidade de água no solo.

A radiação é um importante fator climático, pois proporciona energia para a vaporização e remoção de vapor de água (GENTIL, 2010). A quantidade potencial de energia que alcança a superfície é determinada pelo local e época do ano, devido a diferentes posições do sol (MEDEIROS, 2002). Assim, a radiação depende do local (latitude), topografia da região e época do ano.

A temperatura do ar é outro fator importante, pois é um elemento climático indicativo de energia no sistema estudado, já que a radiação absorvida pela atmosfera aumenta a temperatura do ar. Dessa forma a temperatura do ar interfere nas condições ambientais, interagindo com outras variáveis de importância para o processo de transpiração (MEDEIROS, 2002).

Rodrigues *et al.*, (2011) estudando o ecossistema de manguezal amazônico observaram que a condutância estomática é fortemente controlada pelo déficit de pressão de vapor (DPV). Os autores observaram que as correlações entre estas variáveis foram sempre consideráveis, tanto no período chuvoso como no período seco e também afirmam que os maiores valores de condutância estomática, em média, foram obtidos no período seco e as maiores amplitudes foram observadas no período chuvoso.

Vários fatores influenciam a transpiração e a disponibilidade de água nos processos transpiratórios. Entretanto, a evaporação é acionada quando se avalia a dinâmica da disponibilidade hídrica no sistema solo-água-planta atmosferas. Portanto, é muito difícil avaliar a transpiração em separado da evaporação. Assim, utilizam-se métodos de estimativa da evapotranspiração.

### ***Gradiente térmico natural (GTN)***

Apesar dos bons resultados, as medições de fluxo de seiva realizadas com sondas de dissipação térmica (SDT) ou método de Granier (1985) são vulneráveis ao gradiente térmico natural (GTN) (VELLAME *et al.*, 2011; PAMPONET *et al.*, 2012; REYES-ACOSTA *et al.*, 2012; 2014). Para estes autores, as maiores fontes de erro, no método da sonda de dissipação térmica, está relacionado a: (i) determinação da área do xilema, (ii) distribuição espacial do fluxo no caule e (iii) presença de gradientes térmicos naturais no tronco.

## Medições do dossel da planta

Através do dossel das plantas podemos estimar a produtividade de um ecossistema vegetal, seu crescimento e desenvolvimento das folhas. Algumas medidas são fundamentais para estimativa da transpiração: (i) área foliar, (ii) índice de área foliar, (iii) área de projeção da copa.

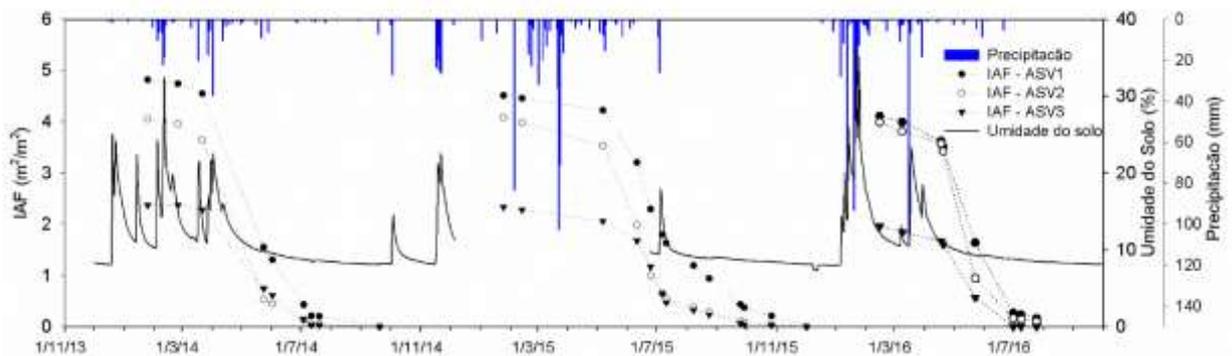
A área foliar é um importante parâmetro em estudos relacionados com morfologia, anatomia e ecofisiologia vegetal, constituindo-se um indicador fundamental da planta (Lopes *et al.*, 2004). Segundo Monteiro *et al.*, (2005), a área foliar é um indicador de grande importância, sendo utilizada para investigar adaptação ecológica, competição com outras espécies e efeitos do manejo, além de ser usada para a determinação do índice de área foliar.

A área de projeção de copa é a superfície coberta pela projeção vertical da copa de uma árvore. Esta pode ser calculada através da medição de um determinado número de raios de projeção de copa, sendo que este número varia de dois a oito (DURLO e DENARDI, 1998). Através da projeção ou área de copa é possível conhecer o espaço ocupado por uma árvore.

O parâmetro vegetacional índice de área foliar (IAF) é indicador do estado de desenvolvimento e participação na transpiração das plantas. O IAF pode ser definido como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo ( $m^2.m^{-2}$ ) (WATSON, 1947). Para Sbrissia & Silva (2008) o IAF é considerado uma variável chave na compreensão da dinâmica da vegetação em ecossistemas terrestres. Além disso, é uma das mais importantes variáveis biofísicas da vegetação, estando relacionado diretamente com a evapotranspiração, com a produtividade da vegetação e com a interceptação da chuva pelo dossel (XAVIER *et al.*, 2004).

Na BEA, Almeida (2016) apresentou dados de IAF obtidos pelo método da coleta de serrapilheira durante três anos consecutivos na Figura 12. Os valores do Índice de Área Foliar (IAF) para as Associações de Solo e Vegetação (ASV1 e ASV2) não diferiram durante todo o período, na ASV3 os valores de IAF foram sempre menor, bem próximo da metade das ASV1 e ASV2. Assim, tornou-se possível verificar em qualquer período do ano o valor de IAF representativo para a região estudada, menos para período de crescimento.

**Figura 12** - Resultado do Índice de Área Foliar (IAF) para o ano 2016, na BEA para as três Associações Solo Vegetação (ASV's), pelo método da coleta de serrapilheira. Estação Pluviométrica 1 (EP1). Fonte: Almeida, (2016)



Para compreender o comportamento do crescimento do IAF, Morais *et al.*, (2017) encontraram resultados que indicaram crescimento foliar médio de  $0,05 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$  (aproximadamente 1% do IAF máximo) com medidas realizadas na BEA para o ano de 2017, após o início das chuvas, usando o LAI-2200 para estima. Ainda de acordo os autores o crescimento do IAF está associado diretamente ao nível de umidade do solo, visto que através de observações no campo, séries de precipitações de pequena monta não foram suficientes para que as plantas saíssem da senescência.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Desenvolvimento da pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA, 12 km<sup>2</sup>), monitorada pelo Hidrosed (Grupo de Pesquisa Hidrosedimentológica do Semiárido – [www.hidrosed.ufc.br](http://www.hidrosed.ufc.br)). A BEA está localizada no setor sudoeste da Estação Ecológica de Aiuaba, faz parte da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe, na região do Estado do Ceará denominada Sertão de Inhamuns (De Araújo e Piedra, 2009; Pinheiro *et al.*, 2013; De Figueiredo *et al.*, 2016). A região tem precipitação média anual de 560 mm, com alta variabilidade espacial e temporal da precipitação com evaporação potencial média de 2.500 mm anuais. O período chuvoso concentra-se entre janeiro a maio, com temperatura média anual de 25°C.

O desenvolvimento da pesquisa ocorreu conforme o fluxograma apresentado na Figura 13. Iniciou-se com o levantamento fitossociológico para identificação da espécie representativa do bioma Caatinga na Associação Solo Vegetação – (ASV) na BEA. Devido a estrutura de coleta de dados existentes e predominância de espécies arbóreas no local realizou-se a instalação dos equipamentos de monitoramento e medição da transpiração, a instalação das sodas no campo para monitoramento do fluxo de seiva, medição da área foliar, avaliação do xilema hidroativo. Concomitantemente foi iniciado a preparação de mudas da espécie representativas para instalação do lisímetro de pesagem.

**Figura 13** – Fluxograma das atividades previstas para obtenção da transpiração através de sondas de dissipação térmica.



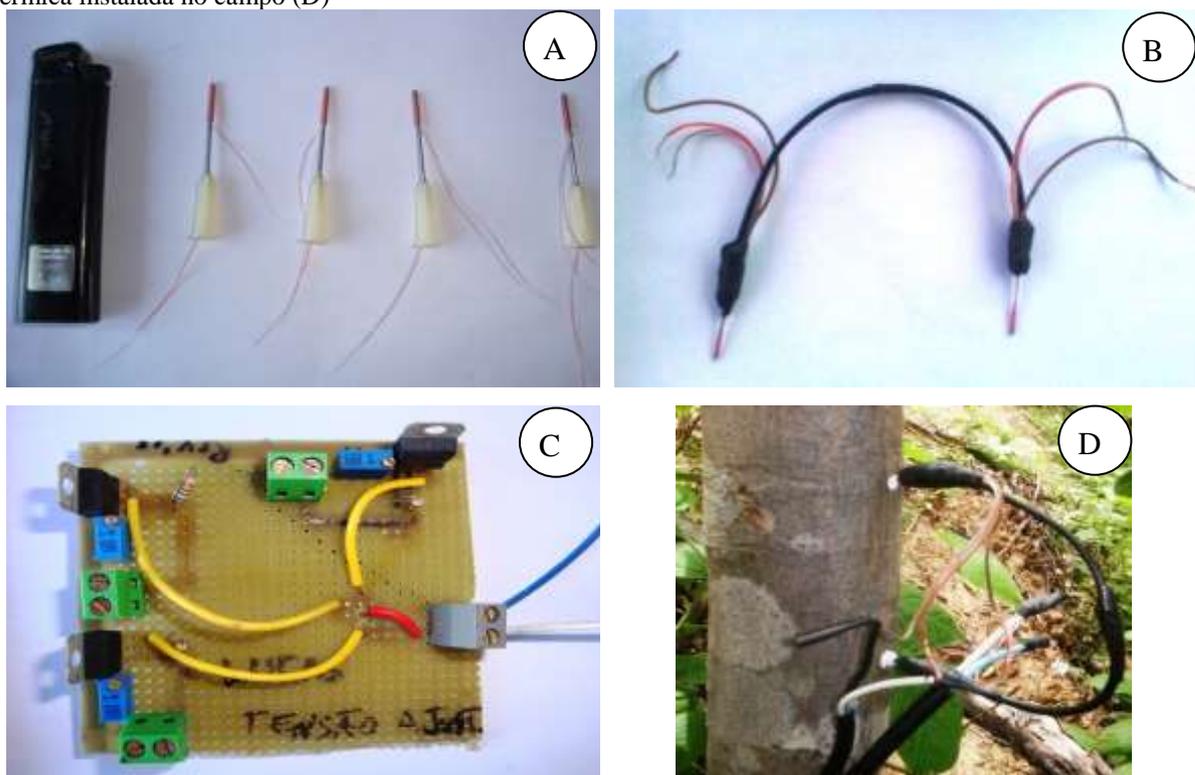
### Instrumentação de campo

Os dados climatológicos foram coletados de uma Plataforma de Coleta de Dados – PCD/Aiuaba da FUNCEME que está instalada a menos de 1 km do local de medição do fluxo de seixa. Com registro horário de temperatura do ar (mínima, média e máxima), umidade do ar, radiação global, pressão atmosférica e precipitação. As variáveis hidrológicas, como umidade do solo, precipitação pluviométrica, evaporação do tanque Classe A e descargas de riachos, são monitoradas desde 2003 pelo grupo HIDROSED ([www.hidroсед.ufc.br](http://www.hidroсед.ufc.br)). Informações mais detalhadas sobre a bacia podem ser encontradas em De Araújo e Piedra (2009), Costa *et al.*, (2013), Pinheiro *et al.*, (2016) e De Figueiredo *et al.*, (2016).

## Medidas do fluxo de seiva em plantas representativas da Caatinga

Para monitoramento do fluxo de seiva foram instaladas sondas de dissipação térmica do modelo proposto por Granier (1985). As sondas foram confeccionadas e instaladas no campo conforme Figura 14. O dispositivo consta de duas sondas de 2 mm de diâmetro e 10 mm de comprimento, que foram inseridas no xilema das árvores, separadas por uma distância vertical de 10 cm (Granier 1987a, 1987b, Lu, Urban & Zhao, 2004). As sondas continham um termopar de cobre-constantã no centro da agulha hipodérmica. Além do termopar, a sonda superior possui uma resistência elétrica, alimentada por uma fonte de ajustável. Na presente pesquisa adotou-se potência constante de 0,2 W de acordo com recomendações de Sun *et al.*, (2012) e de Ouyang *et al.*, (2018).

**Figura 14** – Processo de construção e instalação da sonda de dissipação térmica. Agulhas com resistência (A). Sonda de dissipação térmica completamente montada (B). Fonte de tensão ajustável (C). Sonda de dissipação térmica instalada no campo (D)

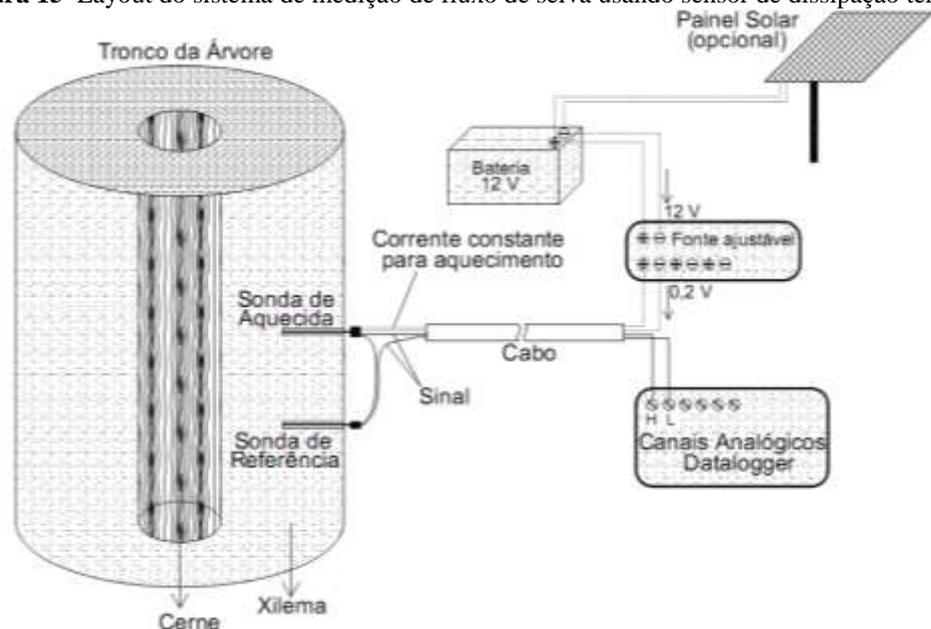


A agulha superior funciona tanto no aquecimento como na detecção de temperatura a partir de um sensor termopar, enquanto a agulha inferior funciona como a sonda de temperatura de referência. A energia constante é aplicada ao aquecedor da agulha superior (Efeito Joule), e a diferença de temperatura ( $dT$ ) entre as duas sondas depende da taxa de fluxo da seiva (princípio termodinâmico da lei do resfriamento de Newton). À medida que as taxas

de fluxo da seiva aumentam, a variação de temperatura ( $dT$ ) entre as sondas diminui à medida que o calor é mais rapidamente dissipado para longe do aquecedor. Os sensores serão instalados a 1,00 m da superfície do solo, para evitar o aquecimento das mesmas por condução de calor no solo. A região onde serão inseridos os sensores deve ser isolada termicamente para evitar o aquecimento direto pelo sol e minimizar flutuações na temperatura (Fleming *et al.*, 2003).

O esquema de ligação do sistema de medição através do sensor de dissipação térmica encontra-se ilustrado na Figura 15. Foi instalado um sensor no caule da planta estudada, sendo os mesmos instalados nas posições SUL (sempre com a mesma orientação). Os sensores foram conectados a uma central de aquisição de dados, Modelo CR800, Campbell Scientific Inc, USA, possibilitando o monitoramento simultâneo dos sensores. Os dados de diferenças de temperatura foram lidos a cada 60 segundos, sendo as médias armazenadas a cada 60 minutos.

**Figura 15**–Layout do sistema de medição de fluxo de seiva usando sensor de dissipação térmica.



Granier (1985) estimou a densidade do fluxo de seiva ( $u$ ) equação (16) a partir de uma constante  $k$ , obtida a parti da temperatura medida pelos sensores instalados nas árvores.

$$u = 119 \cdot K^{1,231} \quad \text{Eq. 16}$$

Em que:  $u$ = densidade de fluxo de seiva, em ( $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )  $K$ = constante que relaciona as temperaturas medidas pelos sensores, obtidas conforme equação 17.

Granier (1985, 1987) definiu um parâmetro adimensional  $K$ , denominado “índice de fluxo”, como:

$$K = \frac{(\Delta T_m - \Delta T)}{\Delta T} \quad \text{Eq. 17}$$

Em que:  $\Delta T_m$  (°C) = diferença máxima de temperatura medida entre as agulhas do sensor, que normalmente acontece na madrugada;  $\Delta T$  (°C) = diferença de temperatura medida em cada instante.

Se o parâmetro  $\Delta T_m$  é o valor de  $\Delta T$  quando não há fluxo de seiva, ou seja, quando este for nulo. Claramente, quando  $\Delta T$  tende a zero,  $K$  tende ao infinito, e, se  $\Delta T = \Delta T_m$ , implica que  $K = 0$ , isto é, fluxo de seiva é nulo.

Para o cálculo do fluxo ( $F_s$ ), multiplicou-se a densidade de fluxo de seiva ( $u$ ) pela área do xilema ( $A_x$ ), a qual foi estimada para cada árvore com medição na altura da sonda inferior.

$$F_s = 119 \cdot K^{1,231} \cdot A_x \quad \text{Eq. 18}$$

Em que:  $F_s$  = fluxo de seiva, em  $L \cdot s^{-1}$ ;  $A_x$  = área da seção transversal do caule que conduz seiva, ou seja, xilema hidroativo, ( $m^2$ );  $K$  = índice de fluxo de seiva (adimensional)

### ***Monitoramento do Gradiente Térmico Natural (GTN)***

Devido ao número restrito de equipamentos para fazer o monitoramento do fluxo de seiva, foram aproveitadas as mesmas sondas já instaladas para medição do fluxo de seiva no monitoramento do GTN. Instaladas a 1 m do solo no lado SUL do caule, isolado o local onde as SDT foram fixadas com papel alumínio para minimizar o GTN.

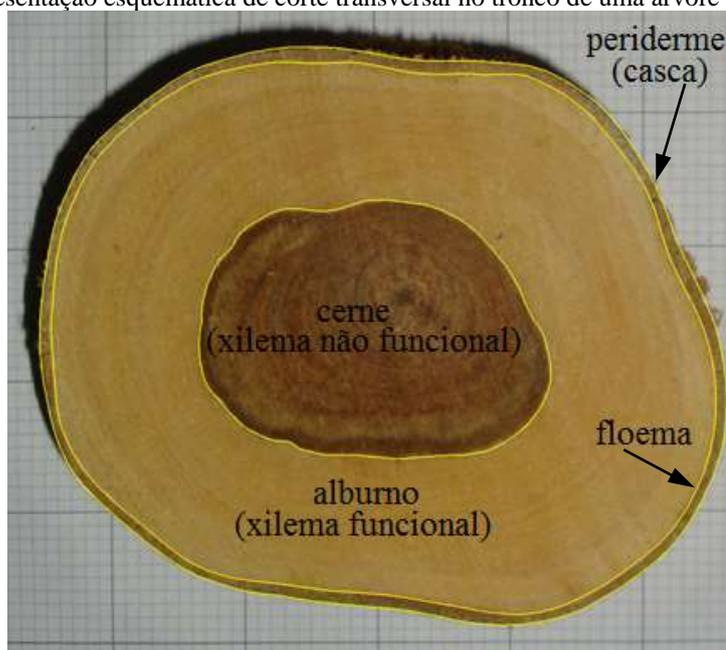
Para monitorar o GTN foi desligada a fonte que fornece energia para a resistência elétrica da sonda superior, passando a medir apenas as diferenças de temperaturas natural do caule. A época do monitoramento do GTN aconteceu em duas condições: no período chuvoso (abril a maio de 2016) e no período seco (novembro a dezembro de 2016). Os dados foram registrados em “datallogger” (CR800 da Campbell SCl.) as leituras foram feitas a cada 30 segundos e as médias armazenadas a cada hora. Os dados climatológicos foram monitorados, através de uma PCD da FUNCEME que se encontra aproximadamente 600 metros do local.

### **Avaliação do Xilema Hidroativo em plantas do bioma Caatinga**

Para a estimativa da área do xilema funcional foi adaptado a metodologia proposta por Lubczynski *et al.*, (2017) com o seguinte procedimento: em uma árvore próxima a estudada coletou-se um galho típico, contendo vários ramos de perfil aproximadamente circular e cujos diâmetros variaram desde os mais finos, em torno de 10 mm, até cerca de 120 mm. Foi retirada cerca de trinta amostras cilíndricas para a medição da área de cada seção, com a finalidade de

relacioná-las com a fração responsável pelo fluxo de seiva (xilema funcional) e com os seus diâmetros. As amostras não foram submetidas nenhum tratamento de coloração do xilema para identificação do cerne, do xilema e do floema, foi possível observar cada parte “a olho nu” pois encontravam-se fáceis de serem diferenciados como pode ser observado na Figura 15.

**Figura 16** –Representação esquemática de corte transversal no tronco de uma árvore de catingueira tipo.



Com a finalidade de observar possíveis diferenças entre os períodos seco e chuvosos foram realizadas 02 coletas em cada estação. Todas as amostras foram fotografadas com uma câmera digital e as imagens analisadas em programa CAD, com o qual se mediu as áreas das secções transversais e circunferências. Com a diferença entre a área total sem periderme da área do cerne é encontrado a área do xilema funcional, equação (19).

$$A_x = ASP - AC \quad \text{Eq. 19}$$

Em que:  $A_x$ = área do xilema funcional, em  $\text{cm}^2$ ;  $ASP$ = Área total sem periderme,  $\text{cm}^2$ ;  $AC$ = Área do cerne,  $\text{cm}^2$ ;

$$Dm = C/\pi \quad \text{Eq. 20}$$

Em que:  $Dm$ = Diâmetro médio do caule, cm.  $C$ = Circunferência total com periderme, cm;

Com os resultados da área do xilema e diâmetro do caule desses indivíduos, foi efetuada a regressão não-linear para obtenção de uma equação para estimar a área do xilema a partir do diâmetro do caule das árvores. Esse procedimento foi adotado tendo em vista que as árvores em que estão instalados os sensores não poderão ser cortadas para avaliação *in situ* da área do xilema.

Além disso, devido ao fato de a espécie *P. pyramidalis* (Tul.) ter um cerne bem desenvolvido, a parede do xilema pode ficar comprometida (delgada) para colocação das sondas, e isso poderia causar erros nas medidas do fluxo de seiva, ver Clearwater *et al.*, (1999), foi analisada uma relação entre o diâmetro do caule e a espessura radial do xilema para garantir que a sonda ficasse localizada completamente inserida nesta área de fluxo de seiva, como recomendado pelo autor, para ter maior confiança no momento de escolha da planta para instalação das sonda e obter o diâmetro mínimo do caule necessário para a instalação das sondas.

### Calibração da sonda de dissipação térmica (SDT)

Considerando-se que estimativas de velocidade do fluxo de seiva usando a equação desenvolvida por Granier (1985) podem subestimar o uso de água da planta quando comparado com outras estimativas (ALMEIDA, *et al.*, 2007; VELLAME, 2009 e HÖLTTÄ *et al.*, 2015) foi desenvolvida uma curva de calibração para cada espécie estudada. Para isso foram utilizadas plataformas de pesagem constituídas com células de carga “tipo I” de capacidade de 200 kg, acoplado a um sistema de aquisição de dados “datalogger CR500” para leitura e armazenamento das informações de pesagem dos vasos que funcionaram como lisímetros de baixo custo. A Figura 17 mostra a plataforma de pesagem com vasos de aproximadamente 80 kg contendo um exemplar da espécie avaliada. Para que os lisímetros (Figura 17) meçam apenas a transpiração a superfície do solo foi isolada com lona plástica evitando perdas de água por evaporação durante as medições.

**Figura 17**– Lisímetro de Pesagem. A – Detalhe da plataforma de pesagem; B – Estrutura de proteção.



A instalação do lisímetro ocorreu numa área próxima a BEA, aproximadamente 1,5 km do local de monitoramento e 0,5 km da estação climatológica (PCD da FUNCEME).

A Célula de Carga da marca Lider, modelo PLA 200, sensibilidade  $2\text{mV/V} \pm 0,1\%$  com capacidade de 200 kg (Figura 18) é um dispositivo eletromecânico que mede a deformação ou flexão de um corpo e a transforma em uma diferença de potencial, em milivolts (mV). Esta medição é alterada proporcionalmente à medida que se aplica uma força em sua estrutura física.

**Figura 18**– Processo de calibração do lisímetro de Pesagem. A – Célula de carga; B – plataforma de pesagem carregada com massas conhecidas aferidas pelo IMETRO.



A calibração do lisímetro é uma das etapas mais importantes durante a implantação do equipamento, pois calibrações malfeitas levam a interpretações inconsistentes dos valores de transpiração, principalmente quando se trabalha em curtos períodos de tempo. Por esse motivo foi realizada a calibração das células de carga que fazem parte do sistema experimental constituído do lisímetro de pesagem.

O procedimento aconteceu da seguinte forma: a plataforma de pesagem foi nivelada e estabilizada para realização das medições. A célula de carga foi conectada a uma central de aquisição de dados, modelo CR510, alimentada por uma bateria de tensão contínua. O acréscimo de massa foi realizado variando de acordo com a Tabela 5 em sequência. Com intervalos de 2 minutos, atingindo um total de 178850 gramas. Em seguida, foi retirado as massas na ordem inversa.

**Tabela 5**– Dados de calibração da célula de carga

Tempo (min)	Massa (g)	Massa Acumulada (g)	Diferença de Voltagem (mV)
-------------	-----------	---------------------	----------------------------

0	0	0	0,044
2	50	50	0,045
4	100	150	0,046
6	200	350	0,048
8	500	850	0,053
10	1000	1850	0,063
12	2000	3850	0,083
14	5000	8850	0,134
16	10000	18850	0,219
18	10000	28850	0,315
20	20000	48850	0,48
22	20000	68850	0,74
24	20000	88850	0,741
26	20000	108850	1,083
28	25000	133850	1,356
30	25000	158850	1,615
32	20000	178850	1,82
34	-20000	158850	1,651
36	-25000	133850	1,398
38	-25000	108850	1,145
40	-20000	88850	0,943
42	-20000	68850	0,74
44	-20000	48850	0,673
46	-20000	28850	0,369
48	-10000	18850	0,234
50	-10000	8850	0,131
52	-5000	3850	0,083
54	-2000	1850	0,063
56	-1000	850	0,054
58	-500	350	0,047
60	-200	150	0,046
62	-100	50	0,044
64	-50	0	0,044

### **Estimativa da Área Foliar em Associação de Solo e Vegetação na Caatinga**

O IAF é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizada por essa vegetação. Um importante parâmetro para a descrição da interação da

planta com o ambiente, que está relacionada com a transpiração da planta. Pode ser estimada tanto por métodos diretos quanto indiretos.

Nesta pesquisa foi avaliada a área foliar de cada espécie estudada, usando o modelo alométrico adotado por Lima *et al.*, (2012) e Silva *et al.*, (2015) estudando modelos para estimar a área foliar de mangueiras. Foram computados o número de ramos semelhantes para cada planta e colhido apenas um para amostragem. Com o resultado obtido multiplicou-se pela quantidade de ramos existente.

Logo após a retirada da amostra, elas foram devidamente acondicionadas em jornais para permanecer abertas até a chegada no laboratório. Para determinar a área foliar da amostra foi utilizado o integrador de área foliar de bancada LI-3100 (LICOR), com uma resolução de 1 mm<sup>2</sup>. Após a medição, as folhas foram secas em estufa por 48h a 65°C e pesadas. A massa foliar específica de cada espécie foi obtida dividindo-se a massa foliar por sua respectiva área foliar.

### **Cálculo da transpiração vegetal através do fluxo de seiva**

A transpiração diária foi calculada dividindo-se o fluxo de seiva pela área foliar medida e pela área projetada da copa (Fleming *et al.*, 2003) (Equação 22).

$$T = \frac{Fs}{APC} \quad \text{Eq. 21}$$

Em que: T= transpiração, em mm.dia<sup>-1</sup>; Fs= fluxo de seiva, em L.dia<sup>-1</sup>; APC=área de projeção da copa, em m<sup>2</sup>.

### **Estimativa dos fatores externos à transpiração**

Para o estudo das condições da água na atmosfera, serão coletados dados meteorológicos, tais como: radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação. Das estações meteorológicas da FUNCEME, INMET e medida pelo grupo HIDROSED. Com isso podemos calcular o déficit de pressão de vapor (DVP).

**Pressão de saturação de vapor (es):** representa a quantidade de vapor que pode existir em determinada atmosfera como função das temperaturas (Tmed, Tmin, Tmax), a pressão de saturação do vapor pode ser calculada (em kPa), conhecendo a temperatura (Tar em °C), por meio da **Equação de Tetens:**

$$e_s = 0,6108 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right)} \text{ Para } T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Eq. 22}$$

Em que:  $e_s$ = pressão de saturação, em kPa;  $T_s$ = Temperatura do ar, em  $^\circ\text{C}$ .

**Pressão de vapor atual ( $e_a$ ):** obtida como função da umidade relativa média ( $UR_{med}$ ) e da pressão de saturação do vapor ( $e_s$ ), por meio da Equação

$$e_a = e_s \times UR_{med} \quad \text{Eq. 23}$$

Em que:  $e_a$ = pressão de vapor atual, em kPa;  $e_s$ = pressão de saturação, em kPa;  $UR_{med}$ = umidade relativa do ar, em %.

**Déficit de pressão de vapor (DPV):** é a diferença entre a pressão que está sendo exercida pela quantidade de vapor d'água existente no ar em dado instante (pressão atual) e a pressão máxima que pode ser exercida pelo vapor d'água, nas mesmas condições de temperatura (pressão de saturação). Esta diferença é uma medida do poder evaporante do ar, tendo relação direta com os processos de evaporação e transpiração, uma vez que estes dependem do gradiente de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar, entre outros fatores.

Com os dados de temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e Umidade relativa ( $UR$ ), serão calculado o déficit de pressão de vapor (DPV), para os mesmos horários, segundo Vianello & Alves (1991).

$$DPV = e_s - e_a \quad \text{Eq. 24}$$

Em que: DPV= déficit de pressão de vapor, em kPa;  $e_s$ = pressão de vapor atual, em kPa;  $e_a$ = pressão de saturação, em kPa;

### **Estimativa da transpiração noturna no bioma Caatinga**

Para comparação das metodologias empregadas na medição da transpiração em plantas da Caatinga utilizaram-se dois métodos: (i) obtenção da transpiração a partir do produto entre a área foliar ( $\text{m}^2$ ) e a transpiração média medida com o IRGA ( $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) convertido em lâmina de transpiração ( $\text{mm.h}^{-1}$ ). A lâmina foi obtida considerando-se que, cada uma das oito medidas, representa o intervalo de três horas de transpiração; (ii) obtenção da transpiração

a partir da relação entre o valor médio horário do fluxo de seiva ( $L \cdot h^{-1}$ ) e a área foliar da planta ( $m^2$ ), convertendo o resultado em lâmina de transpiração ( $mm \cdot h^{-1}$ ).

No período de 24 horas entre 15:00h do dia 15/7/2017 a 15:00h do dia 16/7/2017 foram avaliadas três plantas de *Poincianella pyramidalis* (Tul), espécie arbórea endêmica da Caatinga, de porte médio e caducifólia; e três plantas de *Zizyphus joazeiro* (Mart.), também endêmica da Caatinga, de tamanho médio e sempre verde. As medições foram realizadas em três árvores próximas, cultivadas sob vegetação natural, coletadas em seis folhas expostas ao sol por árvore, localizadas no ponto médio do dossel. (Lima Filho, 2004), com intervalos de três horas. As plantas investigadas encontram-se em uma área preservada há, aproximadamente, 40 anos (Oliveira & Cruz, 2014).

Medições das taxas de transpiração (T) e condutância estomática (gs) usando um analisador portátil de gases infravermelhos - IRGA (model LI6400XT, LICOR, USA) (Neves *et al.*, 2017; Sanz-Sáez *et al.*, 2017) foram realizadas, sob condições naturais de temperatura, radiação solar e concentração de  $CO_2$ .

A transpiração (T) também foi estimada através do fluxo de seiva nas plantas, empregando-se a metodologia da dissipação térmica (Granier, 1985) com uso de sensores de diferença de temperatura com potência constante (Granier, 1987; Zhang *et al.*, 2017; Wang e Wang, 2017). O fluxo de seiva foi medido em intervalos de uma hora durante as mesmas 24 horas de monitoramento das taxas de transpiração (T) e condutância estomática (gs) usando o IRGA.

Para encontrar a área foliar da espécie estudada foi utilizado o método do modelo alométrico adotado por Lima *et al.*, (2012) e Silva *et al.*, (2015). Computou-se o número de ramos semelhantes para cada planta e através de amostragem realizou-se o levantamento da área foliar por ramo com uso do integrador de área foliar. A área foliar das plantas foi estimada multiplicando-se a média da área foliar por ramo pela quantidade de ramos existentes.

As características biométricas das plantas utilizadas no estudo foram: *Poincianella pyramidalis* (Tul)- altura (H) de 6,5 m, área de projeção da copa (APC) 12,5  $m^2$ , área foliar (AF) de 3,50  $m^2$  e diâmetro da base (DB) de 0,15 m; *Zizyphus joazeiro* (Mart.)- altura (H) de 10m, área de projeção da copa (APC) 33,2  $m^2$ , área foliar (AF) de 68,30  $m^2$  e diâmetro da base (DB) de 0,27 m.

Para comparar as distribuições centrais nos dados das duas espécies (*P. pyramidalis* e *Z. joazeiro*) em relação às variáveis de transpiração e condutância estomática, os dados foram submetidos inicialmente ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Shapiro; Wilk,

1965; Razali & Wah, 2011). Foi utilizado o teste de Mann-Whitney U para comparar as medianas.

Dados horários de temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, umidade do solo foram obtidos junto à estação meteorológica (PCD/Aiuaba) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2017), distante, aproximadamente, um quilômetro (De Figueiredo *et al.*, 2016).

## RESULTADO E DISCUSSÃO

### Identificação das espécies representativas do bioma Caatinga

No levantamento florístico realizado por Tillesse (2017) na Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) foram amostrados 487 indivíduos, com densidade igual a 3.468 indivíduos/ha, registraram-se treze espécies e oito famílias botânicas. As famílias Euphorbiaceae (78%) e Fabaceae (7%) apresentaram maior número de espécies abrangendo 85% do total inventariado. Entre as famílias botânicas observadas, as que apresentaram maior número de espécies, foram: *Fabaceae* (5), com a maior riqueza florística, seguido da *Euphorbiaceae* (2), *Asteraceae*, *Boraginaceae*, *Capparaceae*, *Malvaceae*, *Rhamnaceae* e *Sapotaceae* que apresentaram apenas um representante cada. Pereira Júnior *et al.*, (2012) analisando a composição florística da vegetação no semiárido paraibano, também constataram maior abundância das famílias Fabaceae, Euphorbiaceae. Estas famílias são encontradas mais frequentemente em áreas de Caatinga, sendo observado também em outros trabalhos de composição florística (Calixto Júnior *et al.*, 2009; Barbosa *et al.*, 2012; Lemos e Meguro, 2015).

Entre as espécies inventariadas (Tabela 6), *Croton sonderianus* Mull. (78 %) e *Poicicanella pyramidalis* Tul. (7 %) foram as mais abundantes abrangendo 85% do total dos indivíduos observados. Essas espécies foram as que mais se destacaram com relação à totalidade dos parâmetros fitossociológicos observados, e são consideradas como colonizadoras primárias em processos sucessionais secundários.

**Tabela 6** - Parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas na ASV1, Bacia experimental de Aiuaba. DA= Densidade Absoluta (ind.ha-1), DR= Densidade Relativa (%), AbS= Área Basal (m<sup>2</sup>.ha-1), DoR= Dominância Relativa (%), FR= Frequência Relativa (%), IVC= Índice. Fonte: Tillesse (2017))

Espécies	DA	DR (%)	AbS	DoR (%)	FR (%)	IVC (%)	IVI (%)
1 <i>Croton sonderianus</i> Muell. Arg.	2680	77,3	14,1	68,5	16,7	72,9	54,1
2 <i>Poicicanellapyramidalis</i> Tul.	256	7,4	2,8	13,5	14,3	10,5	11,7
3 Morta	179	5,2	1,2	5,7	16,7	5,5	9,2
4 <i>Oxybellis</i> sp.	107	3,1	0,1	0,7	14,3	1,9	6,0
5 <i>Cordiatrichotoma</i> (Vell.) Arrab.ExSteud	99	2,9	0,6	3,1	7,1	3,0	4,3
6 <i>Bumeliaobtusifolia</i> Humb. Ex Roem. & Shult.	56	1,6	0,3	1,3	7,1	1,5	3,4
7 <i>Luetzelburgiaauriculata</i> (Allemão) Ducke	21	0,6	0,1	0,7	2,4	0,6	1,2
8 <i>Cynophalla flexuosa</i> (L.) J.Presl	14	0,4	0,2	1,0	4,8	0,7	2,1
9 <i>Mimosa ophthalmocentra</i> Mart. ex Benth.	14	0,4	0,1	0,4	4,8	0,4	1,8
10 <i>Dalbergia Cearensis</i> Ducke	14	0,4	0,1	0,5	2,4	0,5	1,1
11 <i>Helicteresguazumifolia</i> Kunth	7	0,2	0,1	0,1	2,4	0,1	0,9
12 <i>Zizyphus joazeiro</i> Mart.	7	0,2	0,4	2,1	2,4	1,1	1,6
13 <i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	7	0,2	0,5	2,4	2,4	1,3	1,7
14 <i>Manihotglaziovii</i> Müll. Arg.	7	0,2	0,1	0,1	2,4	0,1	0,9

Pinheiro *et al.*, (2013), ao avaliarem a profundidade efetiva das raízes do bioma Caatinga, identificaram a Catingueira - (*Poincianella pyramidalis* (Tul.)) como espécie representativa para aquela Associação Solo Vegetação - ASV. Essa espécie foi escolhida para monitoramento das relações hídricas em plantas representativas do bioma Caatinga por ser a espécie predominante entre as arbóreas na ASV do estudo.

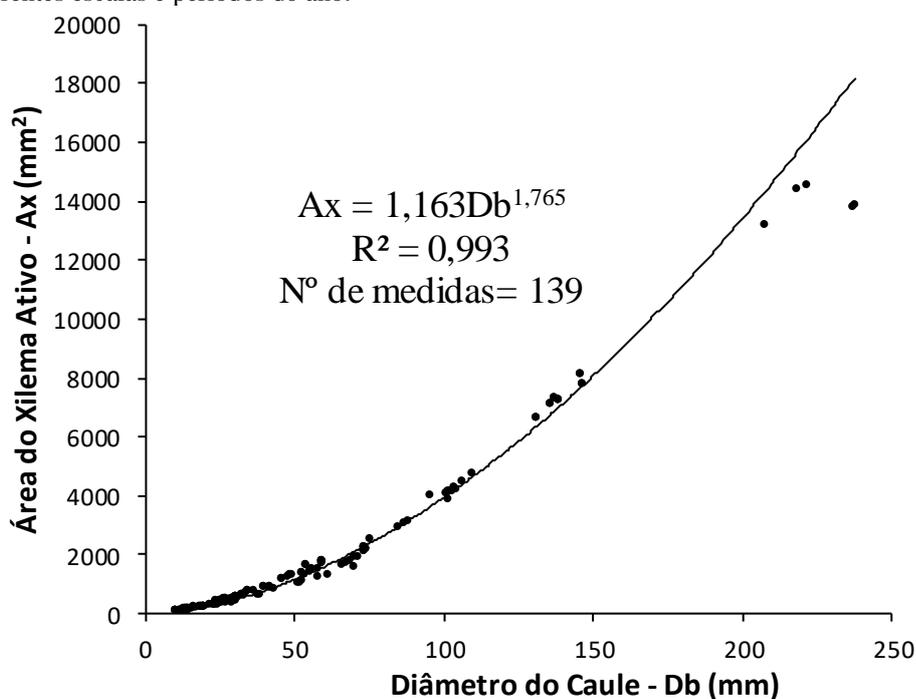
### Xilema Hidroativo em plantas representativas do bioma Caatinga

Foram utilizadas quatro plantas para estudo do xilema: duas na estação úmida e duas na estação seca. Os dados são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7** – Dados das quatro coletas realizadas para análise do xilema ativo na *Poincianella pyramidalis* (Tul.)

Data	Nº de amostras	Diâmetro Mín – Máx (mm)	Equação	R <sup>2</sup>
07/12/2015	54	11 - 106	$A_x = 1,195.Db^{1,760}$	0,989
19/03/2016	24	10 - 61	$A_x = 1,270.Db^{1,707}$	0,995
19/04/2016	30	18 – 238	$A_x = 1,563.Db^{1,700}$	0,994
26/10/2016	25	18 – 146	$A_x = 1,236.Db^{1,765}$	0,995
Geral	139	10-238	$A_x=1,163Db^{1,765}$	0,993

**Figura 19**– Relação entre o diâmetro do caule (Db) e área do xilema ativo (Ax) para a espécie *P. pyramidalis* (Tul.) em diferentes escalas e períodos do ano.

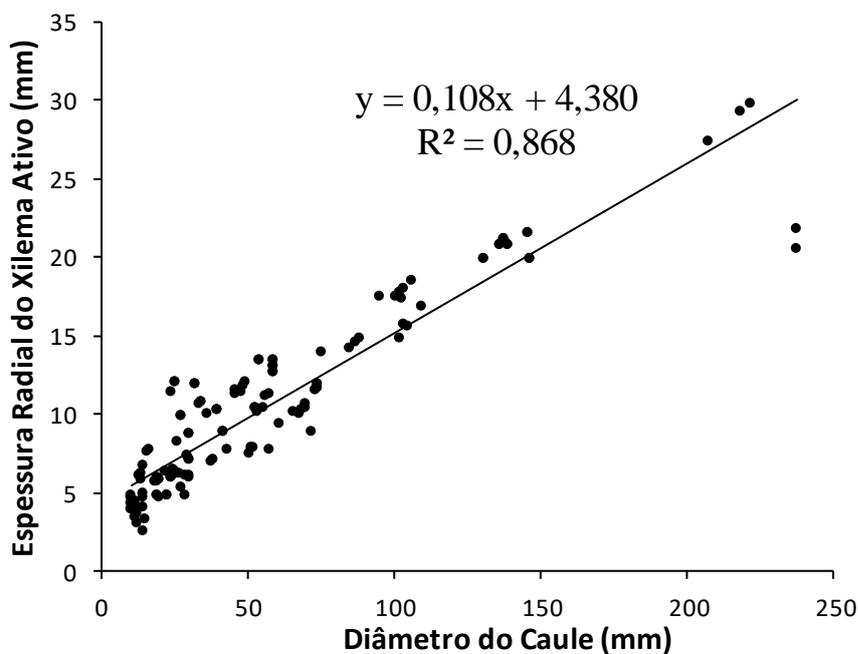


Para as medições realizadas na espécie *Poincianella pyramidalis* (Tul.), o xilema hidroativo representa em média 64% da área basal, podendo variar de 34% a 90%. Não foi possível observar diferenças entre as estações chuvosa e seca como pode ser observado na Figura 19. O modelo que melhor se ajusta aos dados é o potencial, com  $R^2$  de 0,99 como todas as coletas juntas independentemente da data.

Lubczynski *et al.*, (2017) também encontraram resultados excelente de equações alométricas preditivas de  $A_x$ , todos com modelo linear, para nove espécies em estudos realizado no deserto do Kalahari. Com esse resultado, as árvores sacrificadas com a nobre finalidade científica e o esforço envolvido para extrair as equações alométricas apresentadas, levaram a uma informações valiosas, pois com essa equação publicada, não há mais necessidade do corte de árvores dessa espécie para o mapeamento da transpiração ou outras aplicações que exigem estimativa de  $A_x$  para este tipo de planta do bioma Caatinga.

Na Figura 20 encontramos 50 mm como valor mínimo do diâmetro caule, com isso fica garantido uma espessura radial do xilema ativo maior que 10 mm equivalente ao comprimento da resistência elétrica da sonda. Para diâmetros inferiores a 50 mm é necessário aplicar a correção proposta por Clearwater *et al.*, (1999).

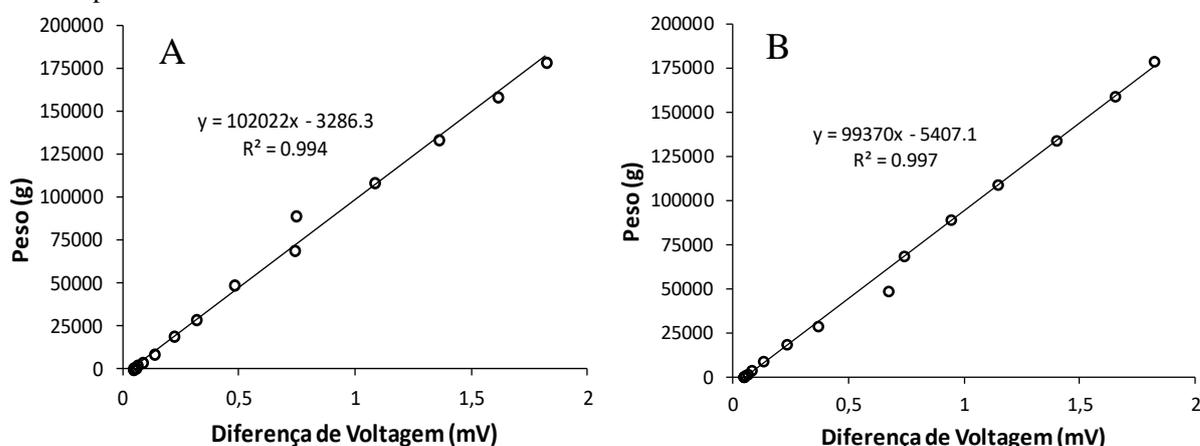
**Figura 20**– Relação entre o diâmetro do caule e a espessura radial do xilema ativo para a espécie *P. pyramidalis* (Tul.)



## Calibração da célula de carga do protótipo delisímetro de pesagem de baixo custo

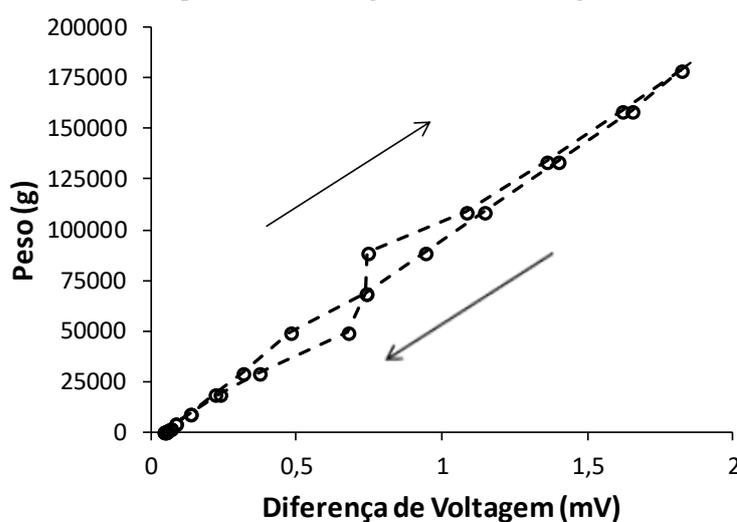
Nas Figuras 21 e 22 são apresentados os resultados da calibração da célula de carga, relacionando a massa, em quilograma, e a diferença de voltagem medida, em miliVolt. Verificou-se que houve linearidade nas medições, comprovando, assim, o funcionamento regular da célula de carga. Observa-se também que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) encontrado foi próximo à unidade, na primeira situação quando acrescentamos massa ou depois quando a retiramos.

**Figura 21** - Gráficos de calibração da célula de carga. A – carregamento da massa padrão. B – descarregamento da massa padrão.



No processo de carregamento e descarregamento do lisímetro houve um pequeno desvio dos valores medidos, indicando que há histerese como podemos ver na Figura 22.

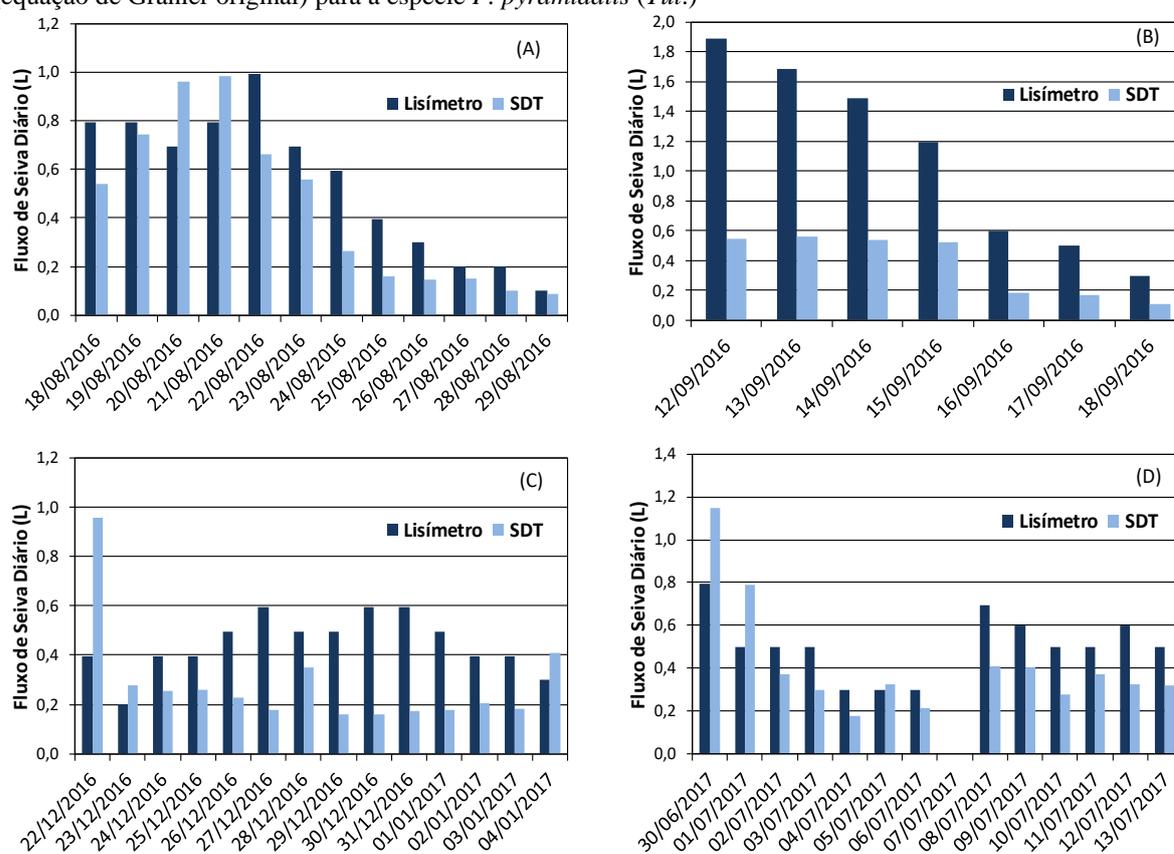
**Figura 22** - Histerese no processo de carregamento e descarregamento da massa padrão.



### Comparação entre medidas de lisimetria e da sondas de dissipação térmica

Na fase de calibração da sonda de dissipação térmica podemos observar na Figura 23 que o método SDT “original” subestimou o valor do fluxo de seiva diário, ao comparar com os dados de transpiração do lisímetro, para 42 dias analisados. O método da sonda de dissipação térmica utilizando os coeficientes originais da equação de Granier (1985) subestimou em 44% os valores de fluxo de seiva em escala diária, variando de -39% a 74%. As maiores variações ocorreram nos dias com menores taxas de transpiração.

**Figura 23** - Comparação dos valores de transpiração no Lisímetro com o fluxo de seiva obtido pela SDT (equação de Granier original) para a espécie *P. pyramidalis* (Tul.)

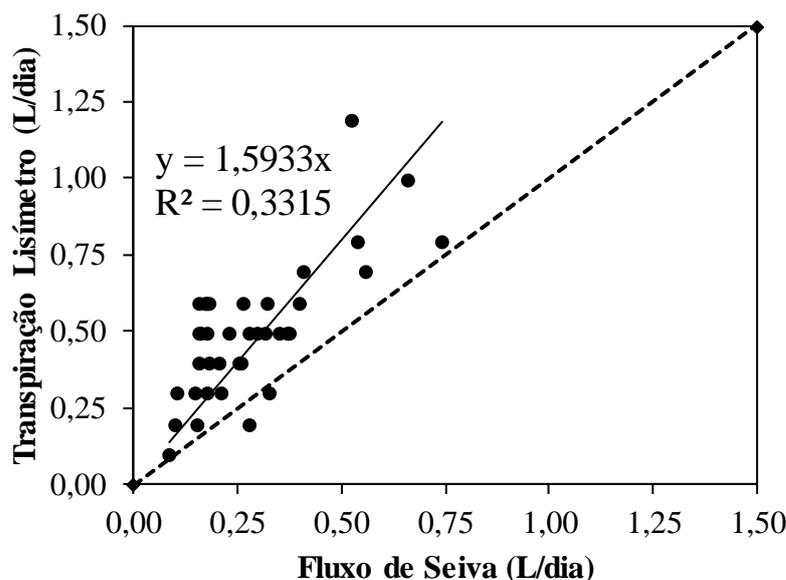


Recentemente, no entanto, Steppe *et al.*, (2010) descobriram que a calibração original subestimou a densidade do fluxo de seiva em *F. grandifolia* em média 60% quando comparado com medições gravimétricas emparelhadas. Além disso, a calibração dos dados coletados sobre hastes excisadas de *T. ramosissima* × *chinensis* (Hultine *et al.*, 2010) também mostraram que o método de Granier subestimou a densidade do fluxo de seiva em 50%.

Visando a calibração, utilizaram-se os dados obtidos das variáveis térmicas do tronco da catingueira transplantada sobre o lisímetro, e os dados de transpiração do lisímetro. Com isto, se obteve-se a função linear que descreveu a relação entre as duas medições.

Realizou-se uma regressão linear para estimar a equação que representa a relação entre o FS real e estimado. O melhor resultado está representado na Figura 24, quando o intercepto é forçado a zero, com  $R^2$  de 0,3315 e  $m = 1,5933$  (coeficiente de ajuste do parâmetro alfa da equação de Granier).

**Figura 24** –Regressão linear entre o fluxo de seiva (FS) estimado e real(transpiração do lisímetro) para *P. pyramidalis* (Tul.). O valor estimado de FS foi calculado aplicando os valores originais do parâmetro de dissipação térmica ( $\alpha = 119$ ,  $\beta = 1,231$ ) para obtenção do coeficiente de ajuste do parâmetro alfa da equação de Granier.



### Ajustamento da equação de Granier para estimativa da transpiração por sonda de dissipação térmica

Tendo em vista a defasagem entre fluxo de seiva e transpiração optou-se por modificar o coeficiente  $\alpha$  da equação geral de Granier aproximando os valores em escala diária de acordo com as recomendações de Vellame *et al.*, (2009), Bush *et al.*, (2010), Coelho *et al.*, (2012) e de Sun *et al.*, (2012).

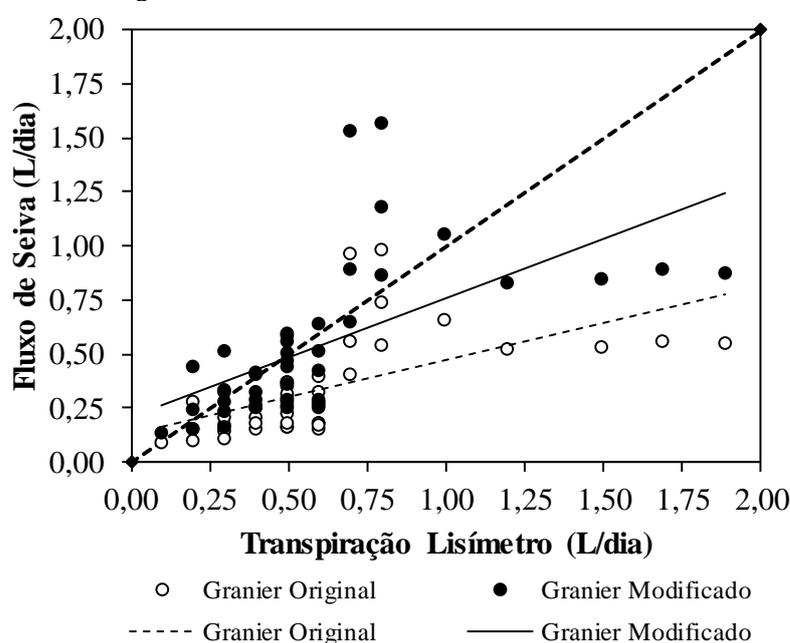
Dada a variação nas medidas do lisímetro na escala de tempo e o atraso entre o fluxo da seiva e a transpiração, optou-se por modificar o coeficiente linear da equação geral de Granier aproximando os valores em uma escala diária de acordo com a Eq. (13). O coeficiente  $\beta$  (1.231) da Eq. (13) derivado da Eq. (6) foi mantida em valor estabelecido por GRANIER (1985).

$$Fs = 189,6067 \cdot K^{1,231} \cdot Ax$$

Eq. 25

Bush *et al.*, 2010, calibrou o método de Granier em 06 espécies com diferentes porosidades em uma região semiárida dos EUA, próximo ao vale de Salt Lake. Nesta pesquisa, os autores identificaram que o coeficiente “ $\alpha$ ” da equação de Granier variou superando em duas a quase três ordens de grandeza. Para o expoente “ $b$ ”, os valores obtidos foram mais parecidos com o valor de Granier relatado e variaram de 1,24 a 1,88. Desta forma, outros autores em pesquisas posteriores não alteram o valor de “ $b$ ” na equação de Granier, apenas o coeficiente “ $\alpha$ ” Coelho *et al.*, (2012); Vellame *et al.*, (2009).

**Figura 25** – Relação entre as medidas de transpiração com lisímetro e fluxo de seiva acumulado diariamente, usando a equação de Granier original e modificada.



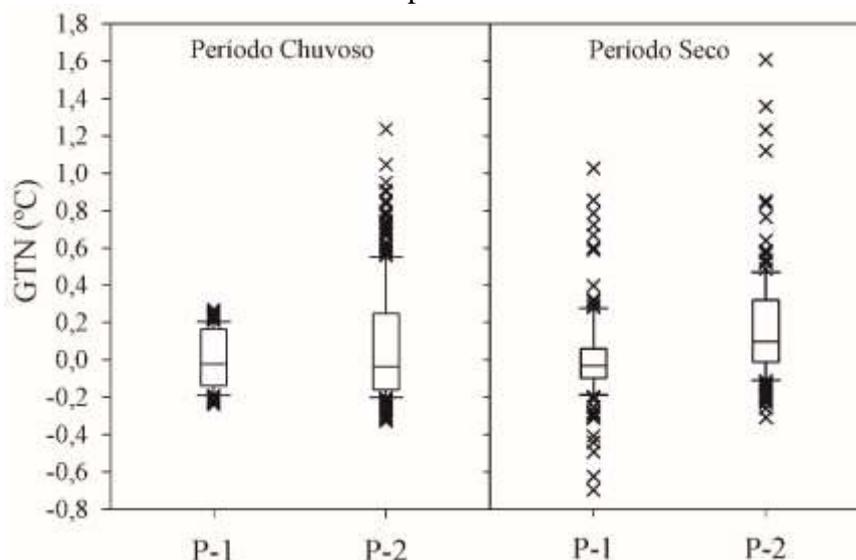
Após a calibração, o desvio médio entre o fluxo de seiva estimado pela equação de Granier modificada e a transpiração do lisímetro em escala diária no período, foi de -10%.

### **Análise do Gradiente térmico natural em *P. pyramidalis* (Tul.) através de sonda de dissipação térmica**

Detectaram-se GTN positivos (diurnos) e negativos (noturnos) em *P. pyramidalis* (Tul.) em todo o período de monitoramento. Isto foi observado nas medições realizadas em abril, maio, novembro e dezembro do ano de 2016. Um GTN positivo indica que a sonda superior (normalmente aquecida, mas não no momento de medidas do GTN) tinha uma temperatura mais alta do que a sonda de referência inferior, enquanto o GTN negativo indica comportamento inverso. Do & Rocheteau (2002) consideraram que um GTN dentro do intervalo de -0,20 a +0,20 °C são aceitáveis. Durante o período de monitoramento, o GTN

registrado estava fora desse intervalo para ambas as árvores, como pode ser observado na Figura 26.

**Figura 26** -Box plot do gradiente térmico natural (GTN) de *Poincianella pyramidalis* (Tul.) para os períodos chuvoso e seco na Bacia experimental de Aiuaba.



No período úmido o GTN em P1 variou de -0,239 a 0,271 °C e em P2 -0,329 a 1,236 °C. Para o período seco o GTN em P1 oscilou entre -0,696 a 1,026 °C e em P2 -0,309 a 1,607 °C. Isso mostra a planta P1 próxima do limite “aceitável” e P2 está muito além, principalmente no limite superior.

No período úmido em que foi coletado o GTN os parâmetros atmosféricos foram os seguintes: temperatura máxima e mínima de 36,51 °C e 18,49 °C; potencial hídrico atmosférico de -9,41 à -202,27 MPa; déficit pressão de vapor entre 0,17 à 4,55 kPa e radiação solar máxima de 1.042,12 W/m<sup>2</sup>. Para o período seco a temperatura máxima e mínima foi de 38,04 °C e 19,19 °C; potencial hídrico atmosférico de -7,72 e -210,14 MPa; déficit pressão de vapor entre 0,16 à 5,10 kPa e radiação solar máxima de 1.022,51 W/m<sup>2</sup>.

Na mesma espécie o GTN mudou de uma planta para outra, isso pode ter sido influenciado pela diferença nos diâmetros (ver Tabela 9) e/ou sombreamento, estes comportamentos, já tinha sido relatado por Pomponet *et al.*, (2012) estudando GTN em cacaueiros, podendo ter sido motivado pelo conteúdo de água no xilema. Uma variação sazonal também fica bem evidente, mostrando o aumento da dispersão dos dados no período seco. Essas variações apresentadas na comparação entre os períodos úmido e seco pode ter ocorrido devido a perda das folhas e isso faz com que uma maior quantidade de radiação chegue as SDT e ao caule da planta, provocando um aquecimento maior.

**Tabela 8**-Regressão do gradiente térmico natural (GTN) com os parâmetros atmosféricos: Potencial hídrico atmosférico ( $\Psi_{ar}$ ), déficit de pressão de vapor (DPV), radiação solar global e temperatura do ar nos períodos úmido: abril/maio de 2016 e seco nov/dez de 2016. Para duas unidades (P1 e P2).

Estação	Identificação	Relação	Modelo de equação	R <sup>2</sup>
Úmida	P1	GTN vs $\Psi_{ar}$	$GTN = -0,003 \Psi_{ar} - 0,191$	$R^2 = 0,808$
		GTN vs DPV	$GTN = 0,114 DPV - 0,174$	$R^2 = 0,844$
		GTN vs R	$GTN = 0,022 R - 0,087$	$R^2 = 0,636$
		GTN vs T	$GTN = 0,028 T - 0,762$	$R^2 = 0,935$
	P2	GTN vs $\Psi_{ar}$	$GTN = -0,005 \Psi_{ar} - 0,307$	$R^2 = 0,811$
		GTN vs DPV	$GTN = 0,227 DPV - 0,273$	$R^2 = 0,845$
		GTN vs R	$GTN = 0,039 R - 0,075$	$R^2 = 0,487$
		GTN vs T	$GTN = 0,053 T - 1,337$	$R^2 = 0,808$
Seca	P1	GTN vs $\Psi_{ar}$	$GTN = -0,001 \Psi_{ar} - 0,021$	$R^2 = 0,003$
		GTN vs DPV	$GTN = 0,004 DPV - 0,007$	$R^2 = 0,001$
		GTN vs R	$GTN = -0,001 R + 0,015$	$R^2 = 0,008$
		GTN x T	$GTN = 0,001 T - 0,017$	$R^2 = 0,001$
	P2	GTN vs $\Psi_{ar}$	$GTN = -0,003 \Psi_{ar} - 0,054$	$R^2 = 0,236$
		GTN vs DPV	$GTN = 0,118 DPV - 0,037$	$R^2 = 0,263$
		GTN vs R	$GTN = 0,001 R + 0,076$	$R^2 = 0,218$
		GTN x T	$GTN = 0,034 T - 0,774$	$R^2 = 0,301$

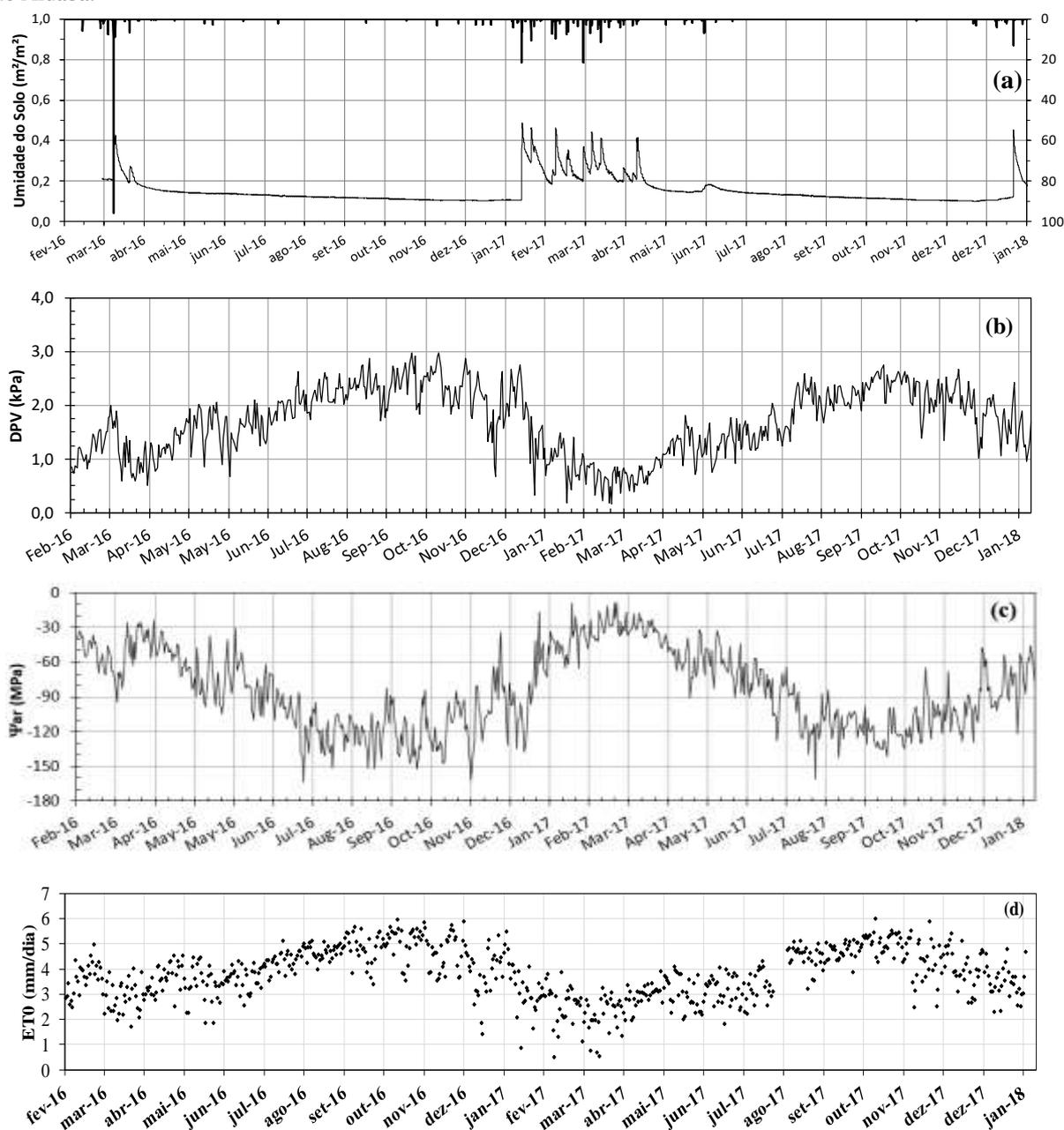
Na Tabela 8 estão apresentados os resultados das correlações entre o GTN e os parâmetros atmosféricos, para as duas plantas monitoradas em períodos distintos: úmido e seco. Todos os coeficientes de determinação para o período úmido são altos, com exceção para radiação solar. Vellame *et al.*, (2011) trabalhando com plantas jovens e adultas de manga encontrou alta correlação do GTN com a temperatura. No período seco os coeficientes de determinação foram extremamente baixo, isso indica a importância do monitoramento do GTN em paralelo ao fluxo de seiva em *Poincianella pyramidalis* (Tul.). Além disso, apesar da boa correlação do GTN no período úmido, a subtração direta dos valores medidos por um sensor não aquecido instalado em outra planta pelo registrado com a sonda aquecida, deve ser realizados com cuidado, devido a variabilidade espacial, comportamento semelhante também foi identificado (POMPONET *et al.*, 2012).

Aconselha-se a realização das medições de GTN antes e durante as medições reais do fluxo de seiva. Tais medições destinam-se a testar se no ambiente investigado existe GTN ou não. No caso de GTN insignificante, o que às vezes acontece, por exemplo, em árvores de floresta densa, o método mais simples, padrão Granier pode ser aplicado diretamente.

## Avaliação do Fluxo de Seiva em plantas representativas do bioma Caatinga

As precipitações para o período estudado (21/jan/2016 a 20/jan/2018) totalizaram 708 mm (Figura 27-a), sendo 293 mm no primeiro ano de 2016, com coeficiente de variação de -50% e 373,4 mm em 2017, com coeficiente de variação de -35%, o que resultou numa precipitação média (entrada) de  $0,96 \text{ mm.dia}^{-1}$ , no período equivalente a 730 dias (2 anos).

**Figura 27** - Séries temporais de (a) precipitação diária (P) e umidade do solo ( $\theta$ ), (b) déficit de pressão de vapor atmosférico (DPV), (c) potencial hídrico do ar ( $\Psi_{ar}$ ) e (d) evapotranspiração potencial (ET0) da bacia experimental de Aiuaba.



A precipitação distribuiu-se em 134 dias chuvosos, sendo apenas 15 dias com precipitação diária superior a 10 mm. A precipitação diária máxima foi observada em 18 de março de 2016 com 112,5 mm

A umidade do solo para o período (Figura 27-a) variou de  $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$  a  $0,49 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ , com comportamento bem distinto entre os dois anos estudados. No primeiro ano, devido ao período chuvoso ter sido concentrado a umidade do solo se mantém elevada por um curto período de tempo, aproximadamente 30 dias. O segundo ano tem mais de três meses de umidade elevada, devido a melhor distribuição temporal dos evento de chuva.

O deficit de pressão de vapor (DPV) horário atingiu valor máximo de 5,95 kPa e uma média diária de 1,70 kPa (Figura 27-b).

A ETo teve valor mínimo diário de  $0,52 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  (fev/2017) e máximo  $6,0 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$  (out/2017) com uma média anual do período de 1370 mm (ver Figura 27-d). e a radiação solar global (Rg) alcançou picos de  $1.096,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (mar/2016) A Tar manteve-se entre 16,0 e 38,6 °C. O DPV médio diário variou entre 0,2 e 2,9 kPa. O potencial hídrico do ar ( $\Psi_{\text{ar}}$ ) variou de -2,7 a -325,1 Mpa.

O monitoramento do fluxo de seiva ocorreu em três plantas de catingueira, sendo duas plantas no campo (*in situ*) e uma sobre o lisímetro de pesagem, conforme dados apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9** - Características das plantas em que o fluxo de seiva foi monitorado. P1 – Planta 01; P2 – Planta 02; P-L1 – Planta do lisímetro 01

Espécies	Identificação	Altura (m)	Diâmetro Basal (cm)	Área do Xilema Ativo ( $\text{cm}^2$ )	Área de Projecção da Copa ( $\text{m}^2$ )	Área Foliar Max ( $\text{m}^2$ )
<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.)	P1	5,00	8,60	30,24	12,50	24,03
<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.)	P2	8,00	14,64	74,68	33,20	69,57
<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.)	P-L1	2,50	4,52	10,00	2,54	2,5

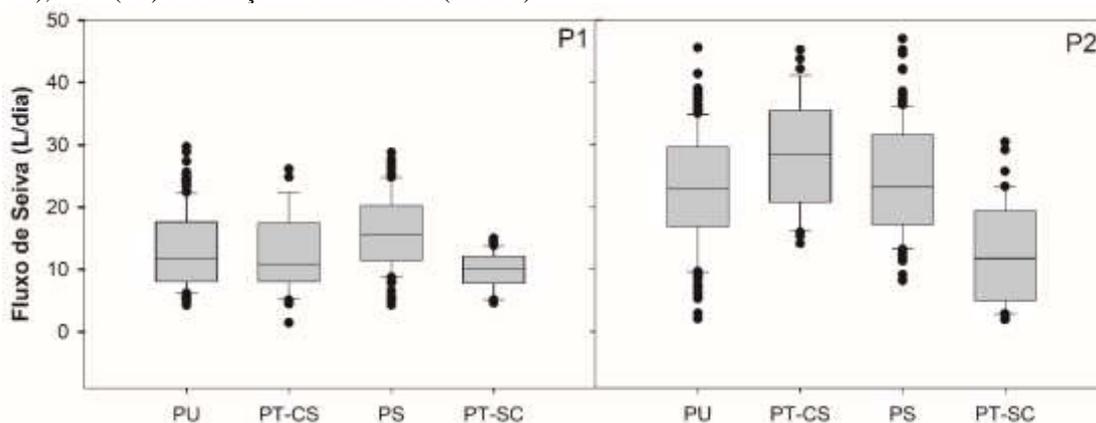
Pelas observações de campo e baseado nas normais climatológicas, Figura 27, dois períodos bem diferenciados para chuva são observados (seco e úmido), interpostos por um período de transição. O período úmido correspondente aos meses (janeiro, fevereiro, março, abril) os secos (julho, agosto, setembro, outubro e novembro) e os de transição (maio, junho, dezembro). Essa divisão coincide com as características sazonais das chuvas no Estado.

Os valores de FS diário são mostrados na Figura 28, na planta 01 (P1) foram medidos FS em 312 dias. Para a planta 02 (P2) foram 387 dias de medição no período. Dados

de FS ausentes são devidos a falhas no equipamento ou o desligamento proposital para análise do gradiente térmico natural

Os valores de FS diário variaram nas plantas P1 e P2 entre 1,4 e 29,7 L.dia<sup>-1</sup> e 1,4 e 47,0 L.dia<sup>-1</sup>, respectivamente. (Figura 28). Analisando-se a série de dados de FS, percebe-se que no período chuvoso (JAN-FEV-MAR-ABR) na planta P1 o valor de FS médio foi de 13,0 L.dia<sup>-1</sup> e de 23,0 L.dia<sup>-1</sup> na planta P2. No primeiro período de transição (MAI-JUN) os valores médios do FS foi de 12,5 L.dia<sup>-1</sup> em P1 e 28,7 L.dia<sup>-1</sup> em P2, e atingem período seco (JUL-AGO-SET-OUT-NOV), valores de P1= 16,0 e P2= 24,4 L.dia<sup>-1</sup> sofrendo declínios apenas no segundo período de transição (DEZ) valores de 9,7 e 12,1 L.dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Tais valores de FS não podem ser exatamente convertidos e compreendidos como transpiração, mas interpretados como uma aproximação mantido os devidos cuidados. Poissabemos que parte deste valor de FS corresponde à redistribuição hidráulica.

**Figura 28** -Box plot comparando os dados de fluxo de seiva medidos durante dois anos em duas plantas de *P. pyramidalis* (Tul). (P1 e P2). Os dados foram agrupados por período: úmido (PU), transição chuvoso-seco (PT-CS), seco (PS) e transição seco-chuvoso (PT-SC).



Ao contrário da nossa expectativa de que o fluxo de seiva em *P. pyramidalis* pode aumentar com o aumento da umidade do solo, FS cresceram P1 durante o período seco em comparação com o período chuvoso e em P2 o FS no período seco se manteve no mesmo patamar em comparação ao período chuvoso, sendo que o valor de FS cresceu no período de transição Chuvoso-seco (Figura 28). Resultados semelhantes foram encontrados por Ji *et al.*, (2016) quando estudaram três espécies dominante na estação de pesquisa da bacia do Rio Linze Inland, extremo sul do deserto de Badain Jaran, na China e Aparecido *et al.*, (2016) em uma floresta tropical úmida pré-montanhosa de transição na Costa Rica. Segundo os autores citados a provável razão para que FS seja menor durante o período úmido está ligada aos valores reduzidos do DPV, Temperatura do ar, a ET<sub>0</sub> quando comparada ao período seco, e uma velocidade de vento levemente menor neste momento. Assim, a temperatura do ar mais baixa e,

em particular, o baixo valor do DPV, parecem ser fatores dominantes que controlam a transpiração das plantas durante os períodos chuvosos.

O FS em *P. pyramidalis* variou entre 1,4 e 47,0 L.dia<sup>-1</sup>, com média de 18,1 L.dia<sup>-1</sup>, está dentro da faixa de ocorrência observada em outras florestas como no Cerrado brasileiro onde Bucci *et al.*, (2008) mediram, em diferentes fisionomias valores médios de fluxo de seiva de 17,20 L.dia<sup>-1</sup> nas áreas de cerrado aberto, além de valores médio de 69,12 L.dia<sup>-1</sup> no cerrado denso e no cerradão (Prec. média anual de 1500 mm). Huang *et al.*, (2015) encontraram FS médio de 76,0 L.dia<sup>-1</sup> em *S. psammophila* no noroeste da China (Prec. média anual de 340 mm). Song *et al.*, (2018) mediram FS em *P. mongolica* e variou de 2,0 a 29,3 L.dia<sup>-1</sup> em uma região semiárida do nordeste da China (Prec. média anual de 474 mm). Pinto Jr *et al.*, (2013) em floresta de transição Amazônia-Cerrado, encontrou valor máximo do fluxo de seiva de 227 L.dia<sup>-1</sup> e valor mínimo de 0,18 L.dia<sup>-1</sup> (Prec. média anual de 2200 mm). Portanto, os valores de FS medidos nesta pesquisa aproximam-se aos de regiões como o cerrado brasileiro e de outras regiões áridas e semiáridas do mundo.

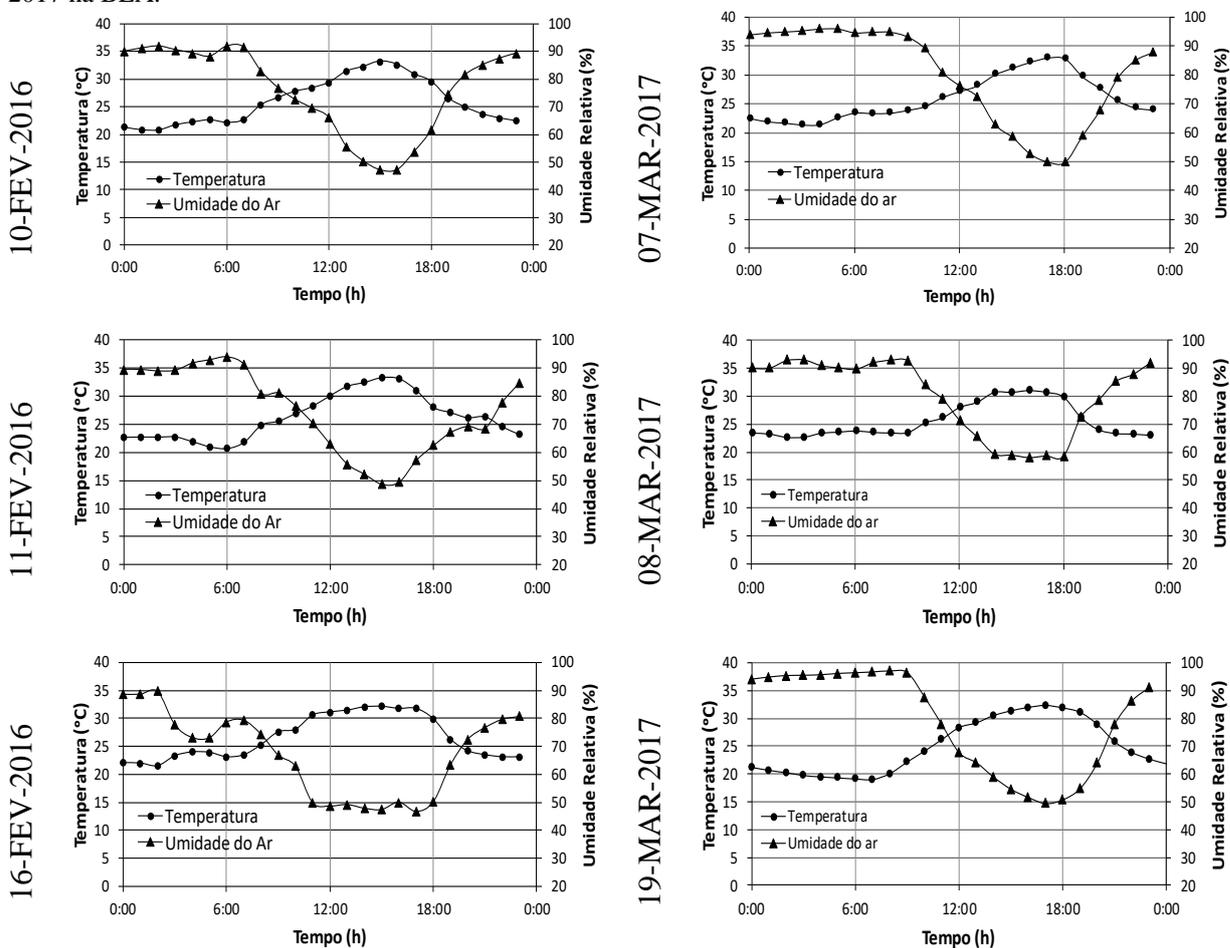
Considerando que as características que agem no fluxo de seiva são diferentes para cada estação, os dados são apresentados em três grupos: (i) estação úmida; (ii) estação de transição e (iii) estação seca.

### **Na estação úmida:**

Observa-se na Figura 29 o comportamento da temperatura e a umidade relativa do ar no período úmido dos anos de 2016 e 2017. Para o ano de 2016, a temperatura do ar média para os dias 10/02/2016, 11/02/2016 e 16/02/2016 foi de 25,97 °C, 26,14°C e 26,45°C, respectivamente. Pode-se observar que o dia 10/02/2016 o menor valor ocorreu às 5h de 20,86°C e o maior valor, 33,22°C às 18h, assim, para esse dia a amplitude térmica é de 12,36°C. A temperatura para o dia 11/02 apresenta uma amplitude de 12,63°C. A temperatura máxima para esse dia ocorreu às 18h com valor de 33,21°C, a temperatura mínima foi de 20,63°C às 6h. No dia 16/02/2016 a máxima e mínima foi de 32,14°C e 21,49°C, respectivamente. Com uma amplitude térmica de 10,65°C. Para o ano de 2017, a temperatura do ar média para os dias 07/03/2017, 08/03/2017 e 19/03/2017 foi de 25,90 °C, 25,50°C e 24,90°C, respectivamente. Pode-se observar que o dia 07/03/2017 o menor valor ocorreu às 3h de 21,32°C e o maior valor, 32,99°C às 17h, assim, para esse dia a amplitude térmica é de 11,67°C. A temperatura para o dia 08/03/2017 apresenta uma amplitude de 8,44°C. A temperatura máxima para esse dia ocorreu às 18h com valor de 31,00°C, a temperatura mínima foi de 22,56°C às 6h. No dia

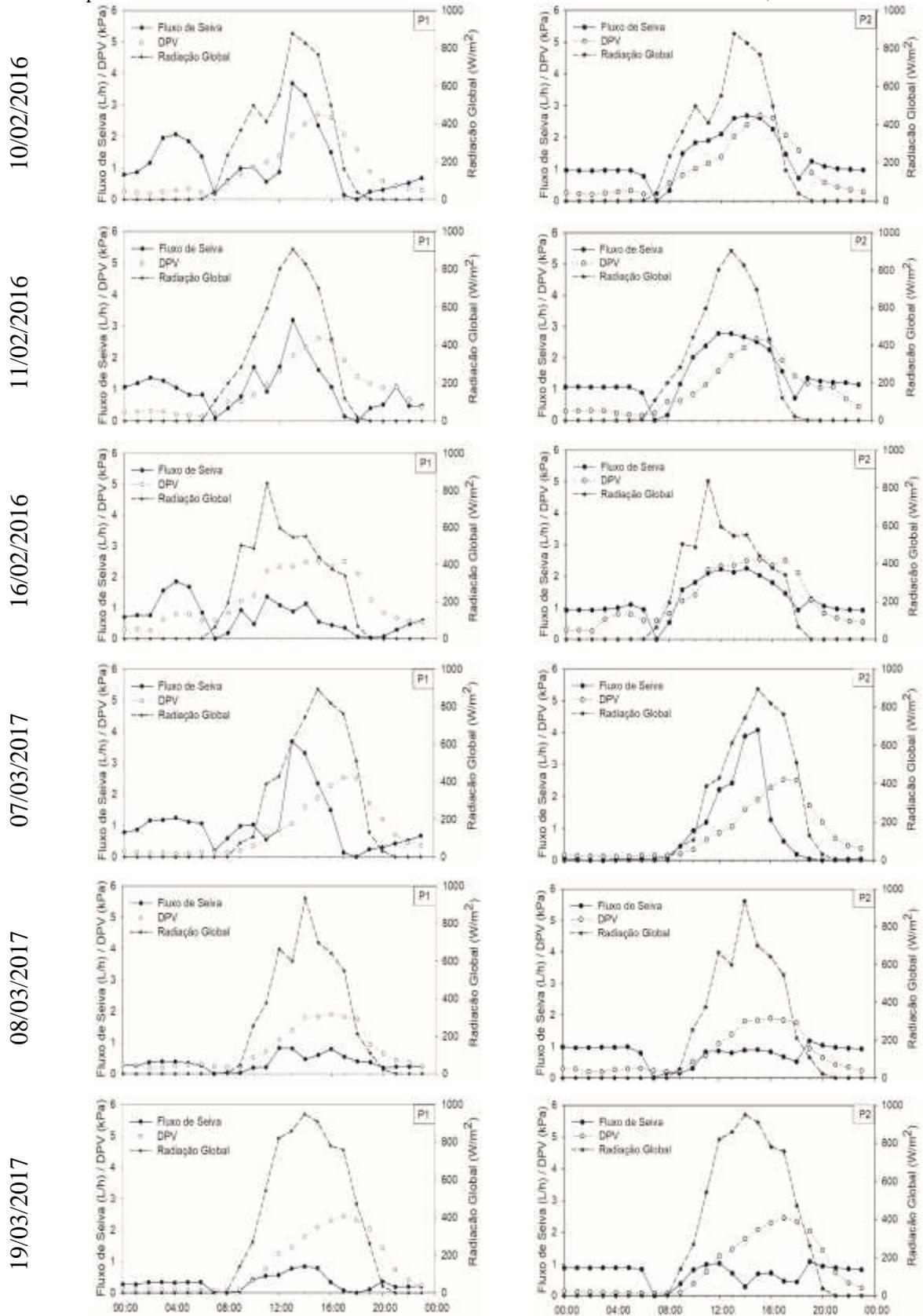
19/03/2017 a máxima e mínima foi de 32,33°C e 19,10°C, respectivamente. Com uma amplitude térmica de 13,23°C.

**Figura 29** - Temperatura e umidade relativa do ar para dias representativos da estação úmida nos anos 2016 e 2017 na BEA.



Na Figura 30 observou-se que nas primeiras horas do dia o fluxo de seiva responde rapidamente à radiação global, mas assim que o fluxo de seiva atinge o valor máximo tende a se manter ou iniciar um decaimento gradativo até o final do dia. Comportamento semelhante foi observado por Mainzer *et al.*, (1999) analisando a transpiração no cerrado brasileiro, em que tipicamente aumentou acentuadamente na parte da manhã, brevemente atingiu um valor máximo entre o horário de 09:30 às 10:30, em seguida, diminuiu acentuadamente, apesar da crescente radiação solar e a demanda por evaporação atmosférica.

**Figura 30** - Fluxo de seiva em duas plantas de *P. Pyramidalis*, déficit de pressão de vapor (DPV) e radiação global para dias representativos da estação úmida dos anos de 2016 e 2017 na BEA. P1 – Planta 01; P2 – Planta 02

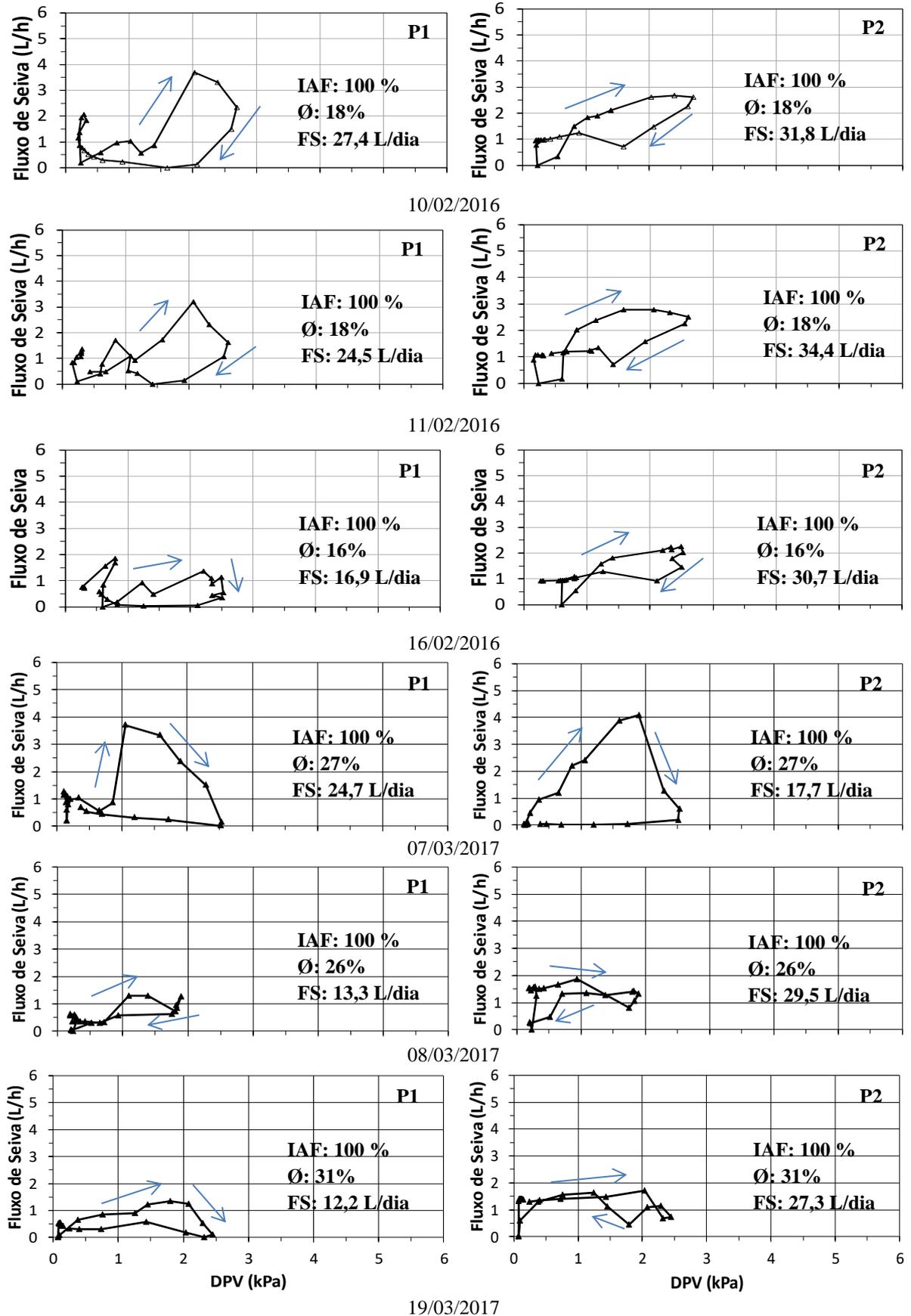


Na estação úmida o pico máximo do fluxo de seiva coincide ou acontece poucas horas antes do valormáximo doDPV. Este comportamento pode ser observado na Figura 30, para todos os dias da estação úmida de 2016 e 2017.

Várias pesquisas indicam a diminuição da transpiração ao aumento do déficit de pressão de vapor do ar (Moore *et al.*, 2018; Aparecido *et al.*, 2016; Zha *et al.*, 2017). Para analisar a evolução dos valores de fluxo de seiva ao longo do dia em função do déficit de pressão de vapor podem ser observados na Figura 31, e através das setas acompanhamos o trajeto de ida e volta no qual mostra o processo de histerese.

Quando o curso diário de FS foi normalizado, decrescendo após a primeira ascensão, uma considerável histerese foi observada em ambas as plantas estudadas. Isto é, o FS em função do DPV mostrou-se uma curva fechada, onde o caminho seguido durante o ciclo de ascensão do FS(aumento do DPV) não coincide com o decaimento. Moore *et al.*, (2018) identificaram resposta semelhante quando estudaram espécies em uma floresta tropical úmida pré-montanhosa de transição na Costa Rica.

**Figura 31**– Relação entre o déficit de pressão de vapor (DPV) e o fluxo de seiva (FS) em duas plantas de *P. Pyramidalis* (P1 e P2), durante a estação úmida para os anos 2016 e 2017 na BEA. A direção das setas indica o curso de aumento e diminuição de DPV ao longo do dia.

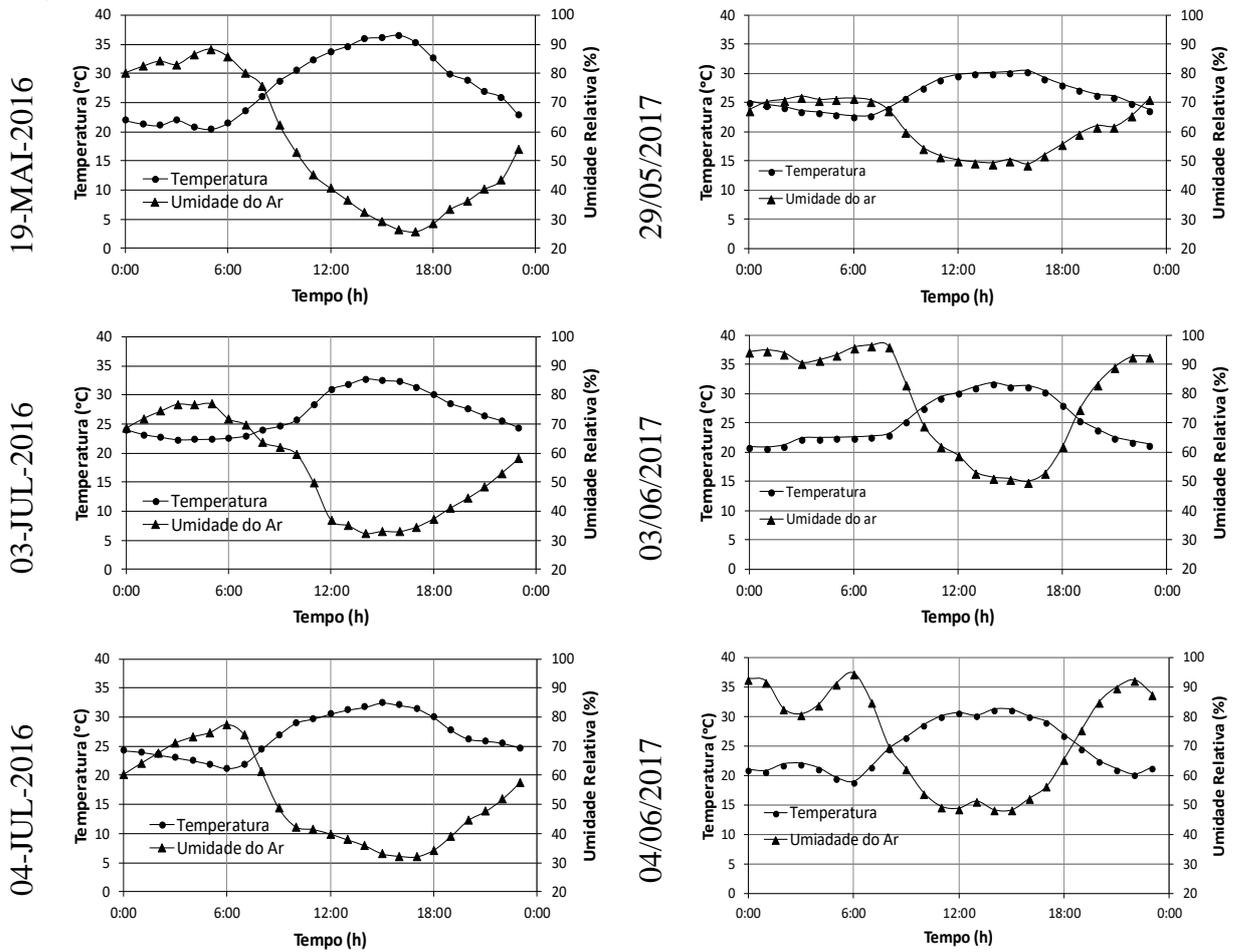


19/03/2017

### **Estação de transição**

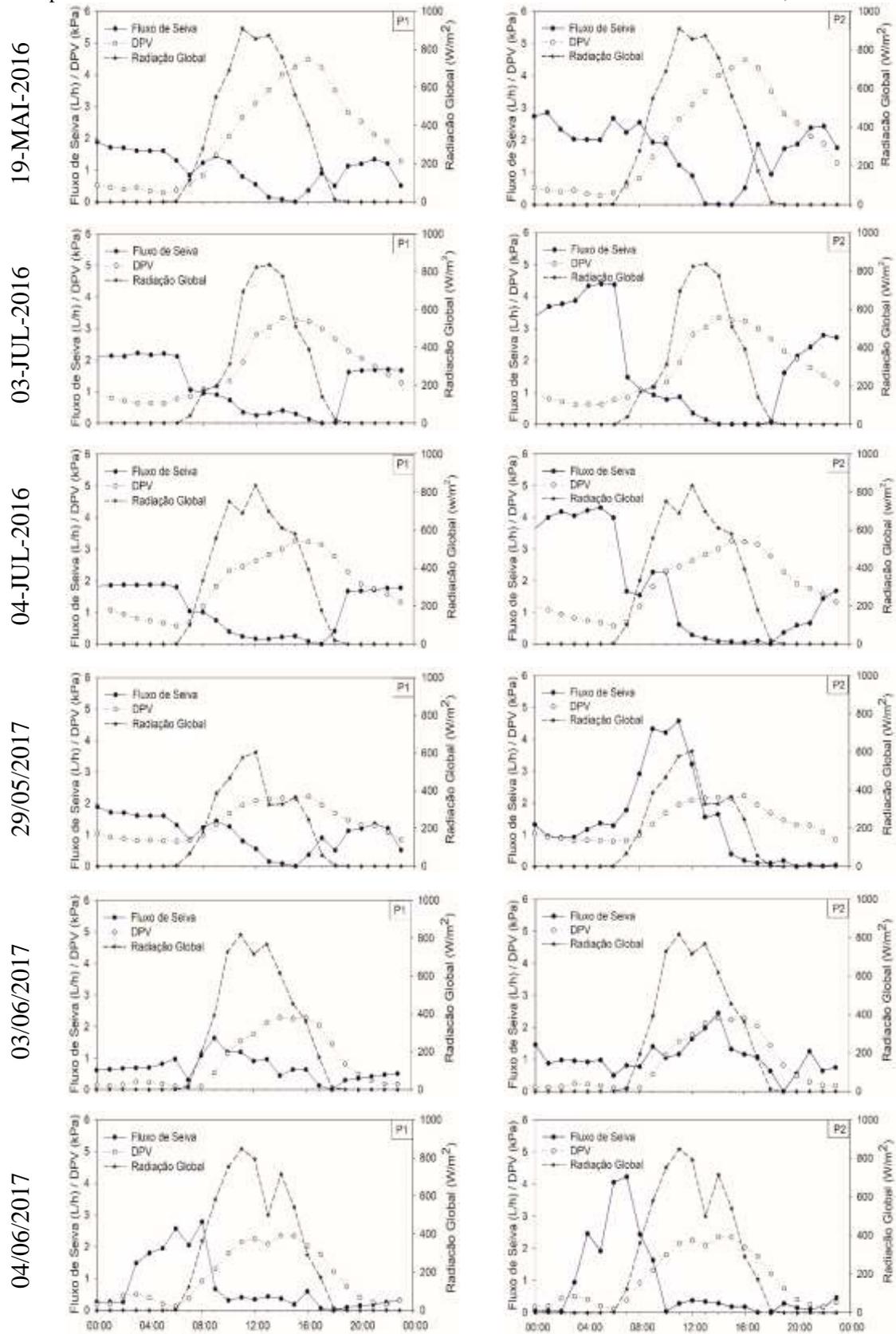
Na Figura 32 é apresentada a temperatura e umidade relativa do ar no período de transição dos anos de 2016 e 2017. Para o ano de 2016, a temperatura do ar média para os dias 19/05/2016, 03/07/2016 e 04/07/2016 foi de 28,16 °C, 26,60°C e 26,71°C, respectivamente. Pode-se observar que o dia 19/05/2016 o menor valor ocorreu às 5h de 20,46°C e o maior valor, 33,22°C às 16h, assim, para esse dia a amplitude térmica é de 16,04°C. A temperatura para o dia 03/07 apresenta uma amplitude de 10,41°C. A temperatura máxima para esse dia ocorreu às 14h com valor de 32,68°C, a temperatura mínima foi de 22,63°C às 6h. No dia 04/07/2016 a máxima e mínima foi de 32,42°C e 21,15°C, respectivamente. Com uma amplitude térmica de 11,27°C. Para o ano de 2017, a temperatura do ar média para os dias 29/05/2017, 03/06/2017 e 04/06/2017 foi de 26,38 °C, 25,45°C e 24,83°C, respectivamente. Pode-se observar que o dia 29/05/2017 o menor valor ocorreu às 6h de 22,74°C e o maior valor, 30,45°C às 16h, assim, para esse dia a amplitude térmica é de 7,79°C. A temperatura para o dia 03/06/2017 apresenta uma amplitude de 11,04°C. A temperatura máxima para esse dia ocorreu às 14h com valor de 31,86°C, a temperatura mínima foi de 20,82°C às 1h. No dia 04/06/2017 a máxima e a mínima temperaturas foram de 31,28°C e 18,93°C, respectivamente. A amplitude térmica foi de 12,34°C.

**Figura 32** - Temperatura e umidade relativa do ar para dias representativos da estação de transição nos anos 2016 e 2017 na BEA.



Na Figura 33 observou-se que o fluxo de seiva não responde a radiação global como ocorreu na estação úmida. Chegando a atingir valores muito próximo de zero nas horas mais quentes do dia e valores maiores do fluxo de seiva durante o período noturno.

**Figura 33** - Fluxo de seiva em duas plantas de *P. Pyramidalis*, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos da estação de transição dos anos de 2016 e 2017 na BEA.P1 – Planta 01; P2 – Planta 02.



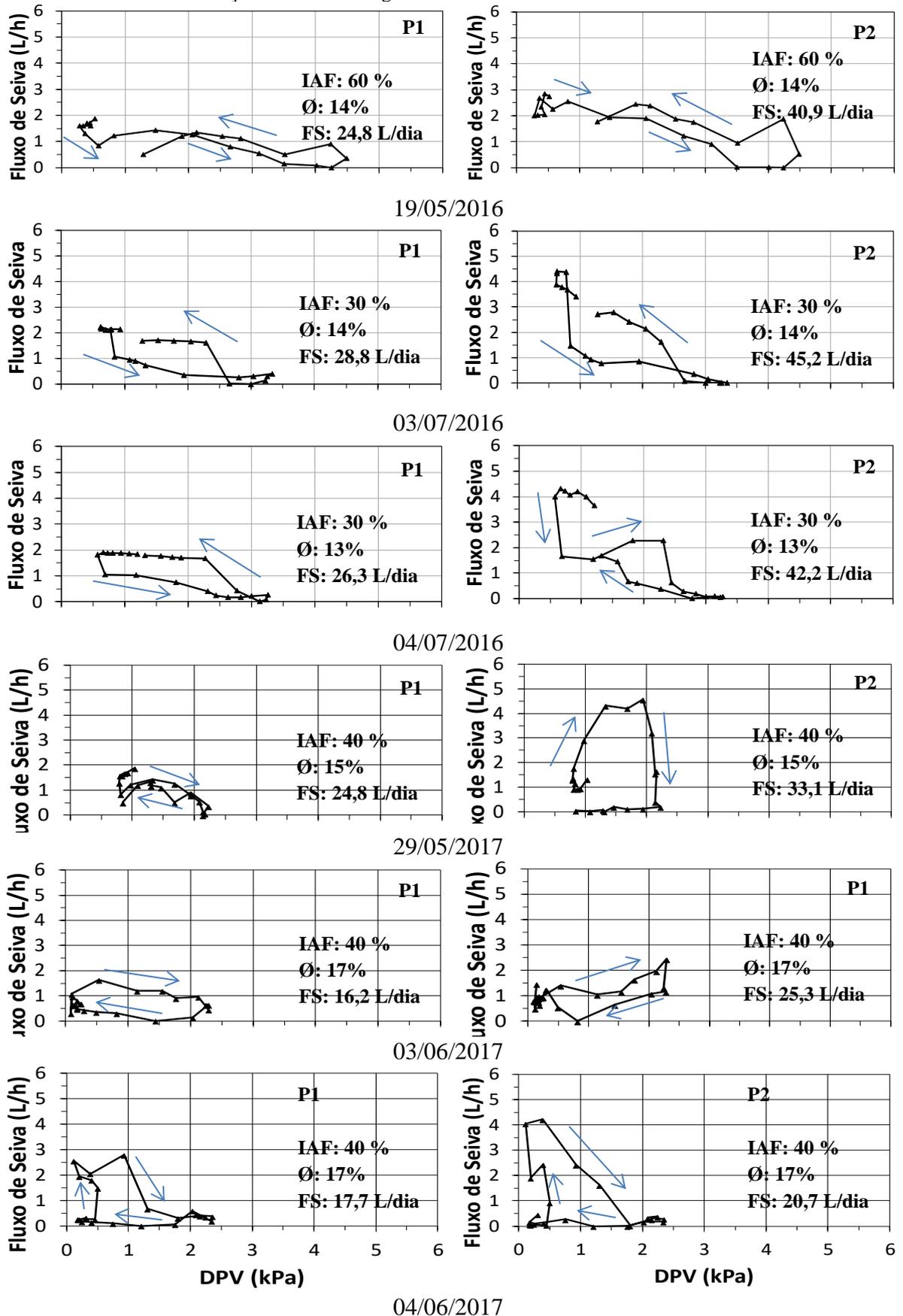
Na estação de transição o fluxo de seiva é zero (ou bem próximo) quando o valor do DPV é máximo. Este comportamento pode ser observado na Figura 33, para a maioria dos dias observados.

O déficit de pressão de vapor diz respeito à demanda atmosférica, quanto mais vapor d'água estiver presente na atmosfera, menor o déficit de pressão de vapor, porém com altos valores de déficit de pressão de vapor em tempos secos, a condutância estomática das plantas diminui (PAIVA *et al.*, 2005) como estratégia para evitar a perda de água para o ambiente.

A queda acentuada do fluxo de seiva, neste horário(12:00 h), quando o déficit de pressão de vapor já atingi os valores limite pode ser atribuído a três fatores:(i) devido ao controle estomático nas duas plantas de *P. pyramidalis* estudadas;(ii) as folhas se encontram em na fase de senescência;

A fim de entender este comportamento, foi colocada a relação entre o DPV e o FS, Figura 34, nestes períodos de transição dos anos de 2016 e 2017.

**Figura 34** - Relação entre o déficit de pressão de vapor (DPV) e Fluxo de seiva (FS) em duas plantas de *P. Pyramidalis* (P1 e P2), durante a estação de transição para os anos 2016 e 2017 na BEA. A direção das setas indica o curso de aumento e diminuição de DPV ao longo do dia.

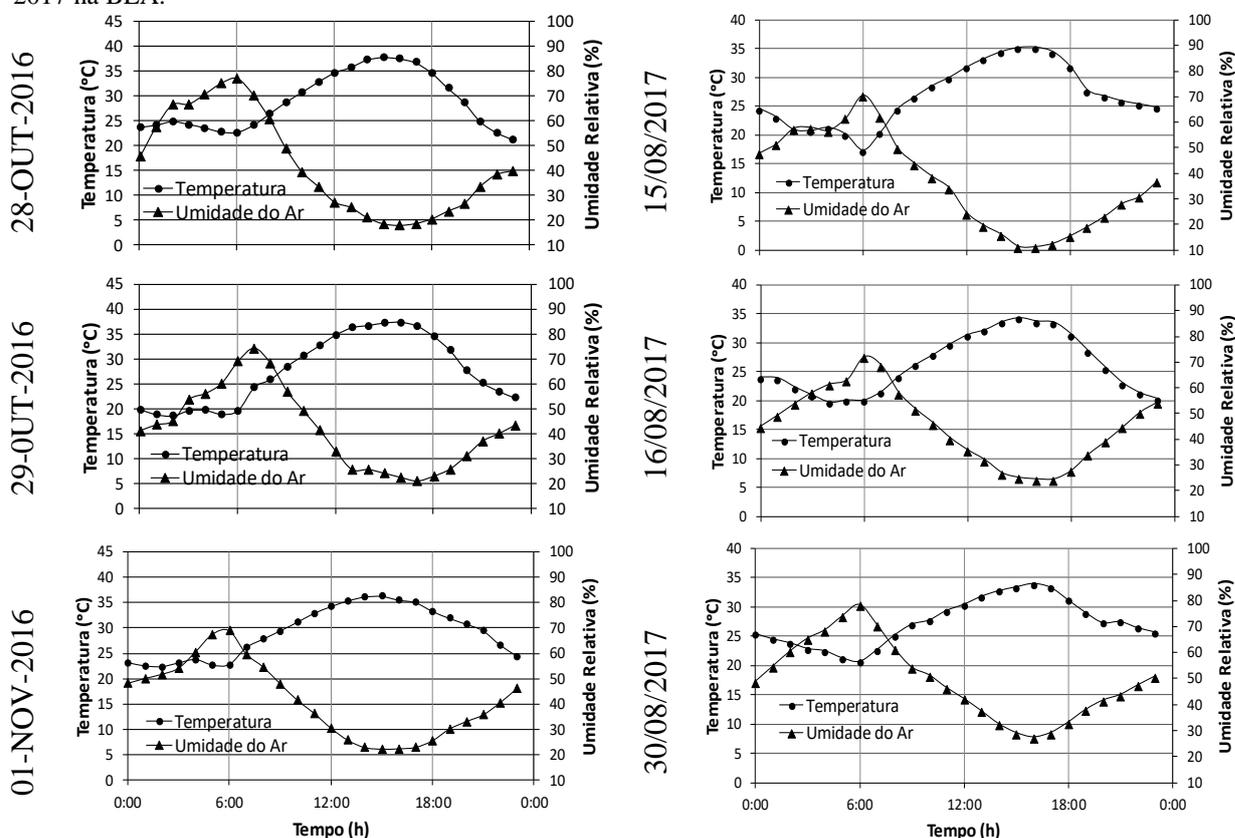


04/06/2017

### Estação seca

Na Figura 35 é apresentada a temperatura e umidade relativa do ar no período seco dos anos de 2016 e 2017.

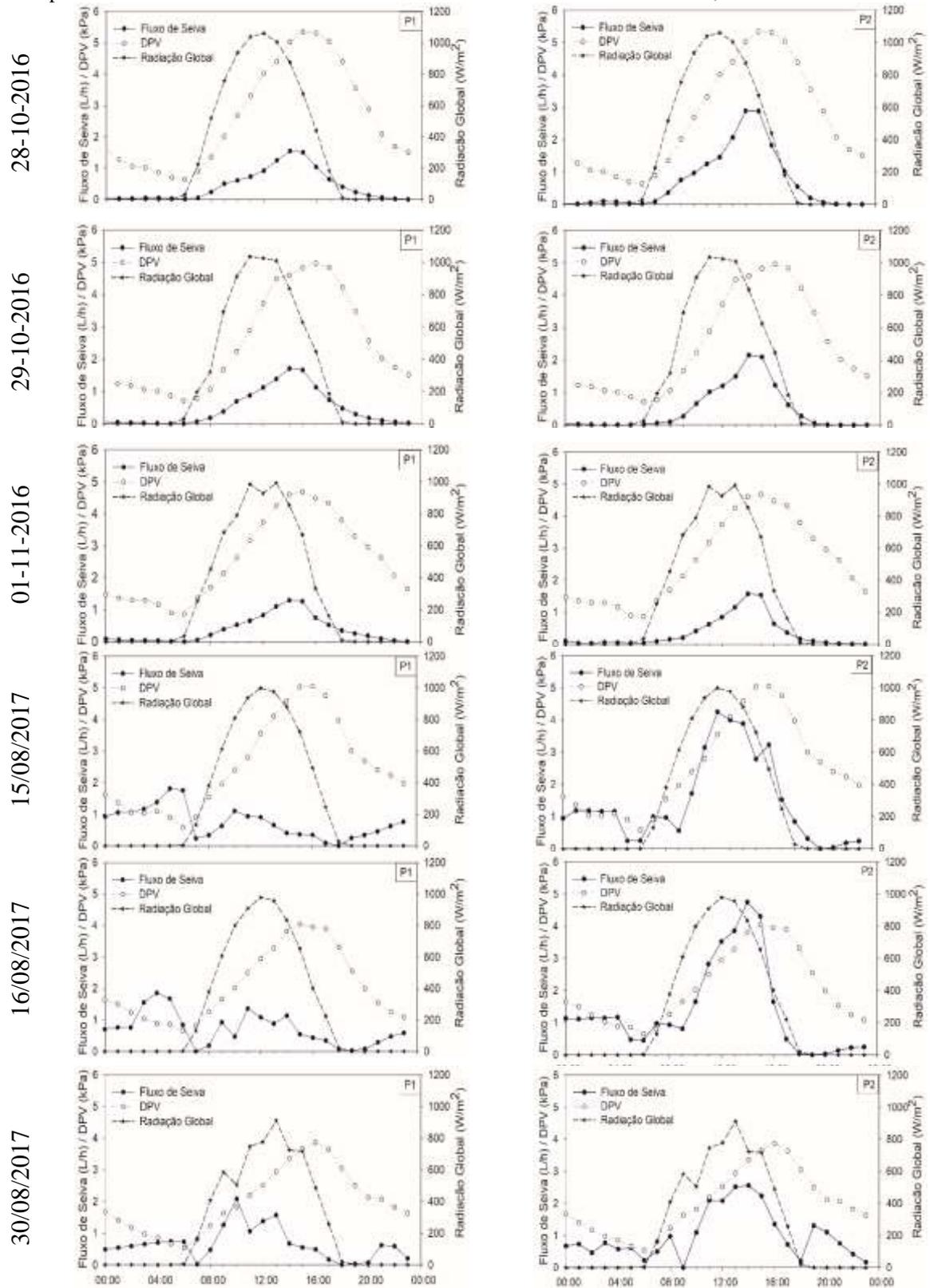
**Figura 35** - Temperatura e umidade relativa do ar para dias representativos da estação seca nos anos 2016 e 2017 na BEA.



Para o ano de 2016, a temperatura do ar (Tar) média para os dias 28/10/2016, 29/10/2016 e 01/11/2016 foi de 28,79 °C, 27,54°C e 28,94°C, respectivamente. A amplitude térmica média foi de 16,4°C (+/- 2,5 °C). Para o ano de 2017, a temperatura do ar média para os dias 15/08/2017, 16/08/2017 e 30/08/2017 foi de 26,86 °C, 26,22°C e 24,42°C, respectivamente. A amplitude térmica média variou entre 17,8°C. à 13,3°C. Isso afeta diretamente o potencial hídrico atmosférico e o déficit de pressão de vapor, que sem apresentam como os principais propusores do FS.

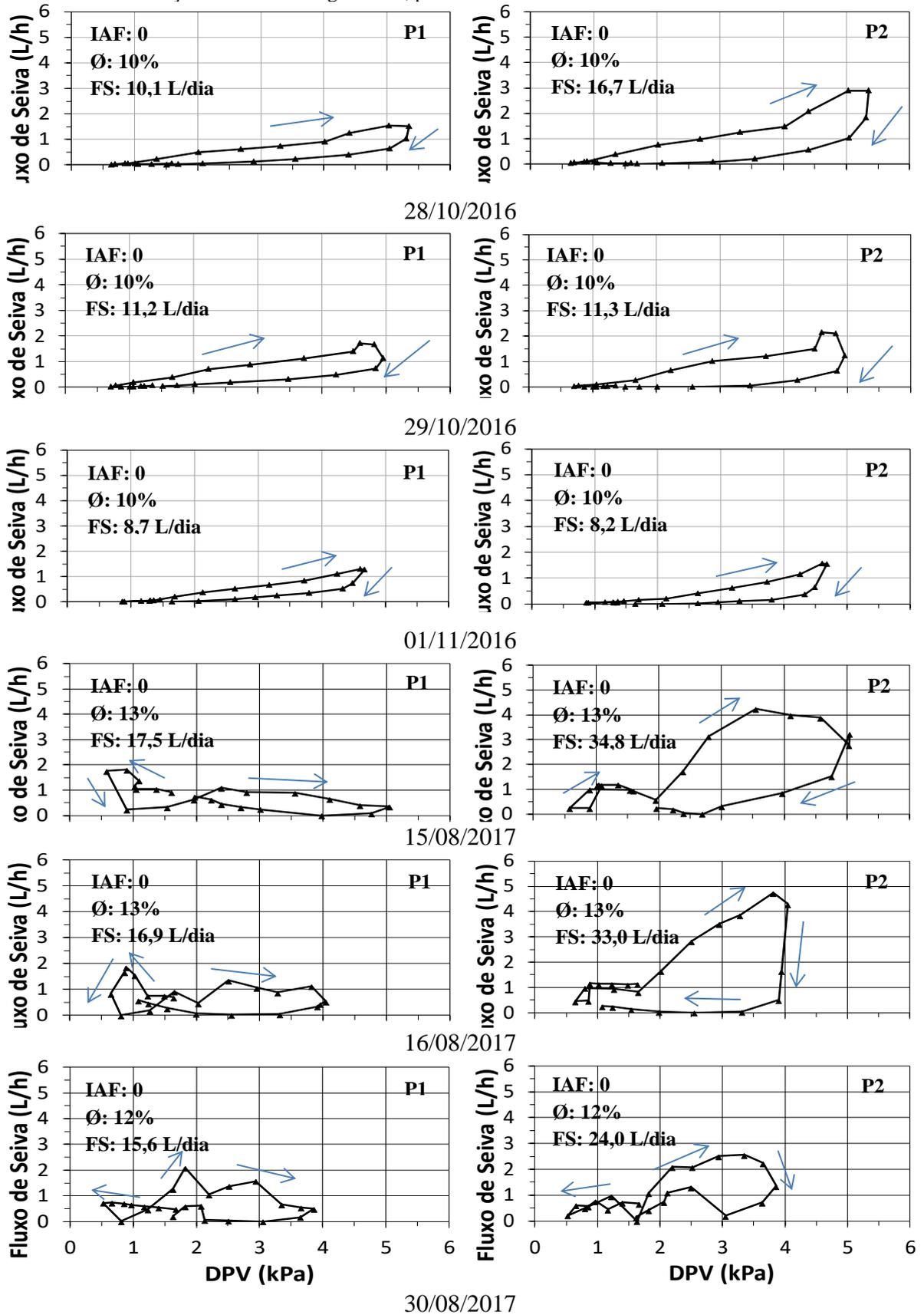
Na Figura 36 observou-se que o fluxo de seiva responde ao DPV e não a radiação global como acontecia na estação úmida. Atingindo valores máximos de fluxo de seiva na mesma hora em que acontece o valor máximo de DPV diário.

**Figura 36** - Fluxo de seiva em duas plantas de *P. pyramidalis*, déficit de pressão de vapor e radiação global para dias representativos da estação secos anos de 2016 e 2017 na BEA.P1 – Planta 01; P2 – Planta 02.



Na estação seca o pico máximo do fluxo de seiva coincide (ou ocorre bem próximo) do valormáximo doDPV (Figura 37), semelhante ao que ocorre na estação úmida, só que agora com as taxas de fluxo de seiva noturna são maiores.

**Figura 37** - Relação entre o déficit de pressão de vapor (DPV) e o Fluxo de seiva (FS) em duas plantas de *P. Pyramidalis* (P1 e P2), durante a estação seca para os anos 2016 e 2017 na BEA. A direção das setas indica o curso de aumento e diminuição de DPV ao longo do dia, para o ano 2016



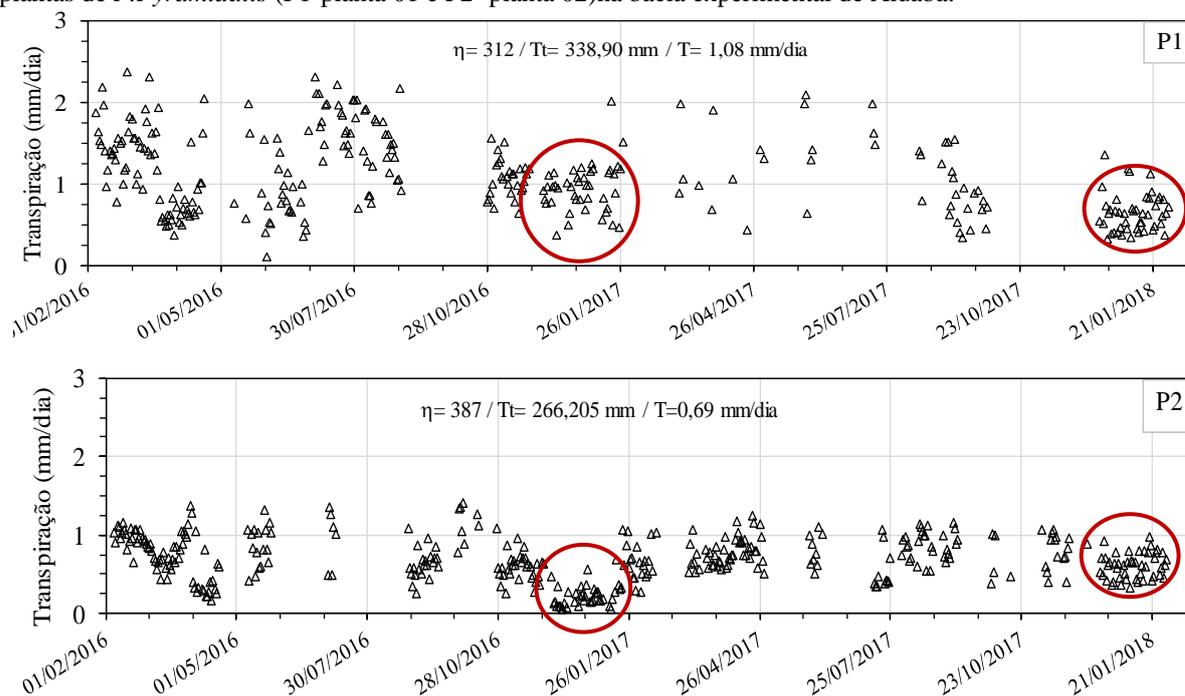
O fluxo de seiva, neste período, quando o déficit de pressão de vapor atingiu os valores máximos anual e as plantas de *P. pyramidalis* estudadas já se encontravam com índice de área foliar (IAF) zerado, podem ser atribuídos à transpiração cuticular pelo caule e/ou redistribuição hidráulica. Uma constatação importante nesta pesquisa foi que oFS continua ocorrendo mesmo quando a planta está desfolhada, e isso pode ser um sistema de defesa para evitar falha hidráulica (ver Urli *et al.*, (2013), Brodribb & Cochard 2009), que provocaria a morte para planta.

### **Avaliação da transpiração no bioma Caatinga**

Considerando-se que a vegetação da BEA tenha características de fluxo de seiva similar aos da espécie *P. pyramidalis*, extrapolamos o valor da transpiração das unidades estudadas para a bacia hidrográfica estudada. A distribuição temporal da transpiração diária em *P. pyramidalis* encontra-se representado na Figura 38. Durante o período de medição a transpiração média em *P. pyramidalis* nas duas plantas medidas in situ variou entre 0,69 e 1,08 mm.dia<sup>-1</sup>, isso representa entre 44 e 69% da precipitação média anual da BEA. Estes valores podem ser comparados com Pinheiro *et al.*, (2016), quando estudaram a BEA através de simulações de hidrologia no SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) encontraram um valor médio para transpiração de 0,52 mm.dia<sup>-1</sup>. Além disso, os autores avaliaram que no bioma Caatinga entre 58%-92% da precipitação anual retorna para a atmosfera através da evapotranspiração. Portanto, os resultados indicam que com as medições realizadas na BEA de FS é possível representar as taxas transpiradas pela vegetação do bioma Caatinga.

Analisando a série de dados do fluxo de seiva, percebe-se que a transpiração do período chuvoso (JAN-FEV-MAR-ABR) na planta P1 é 1,04 mm.dia<sup>-1</sup> e 0,69 na planta P2. No primeiro período de transição (MAI-JUN) os valores da transpiração em P1 foi de 0,99 mm.dia<sup>-1</sup> e 0,84 mm.dia<sup>-1</sup> em P2, e se mantém no período seco (JUL-AGO-SET-OUT-NOV), sofrendo declínios apenas no segundo período de transição (DEZ).

**Figura 38** -Série temporal da transpiração (T) estimada através de medições do fluxo de seiva (FS) em duas plantas de *P.Pyramidalis* (P1-planta 01 e P2- planta 02)na bacia experimental de Aiuaba.

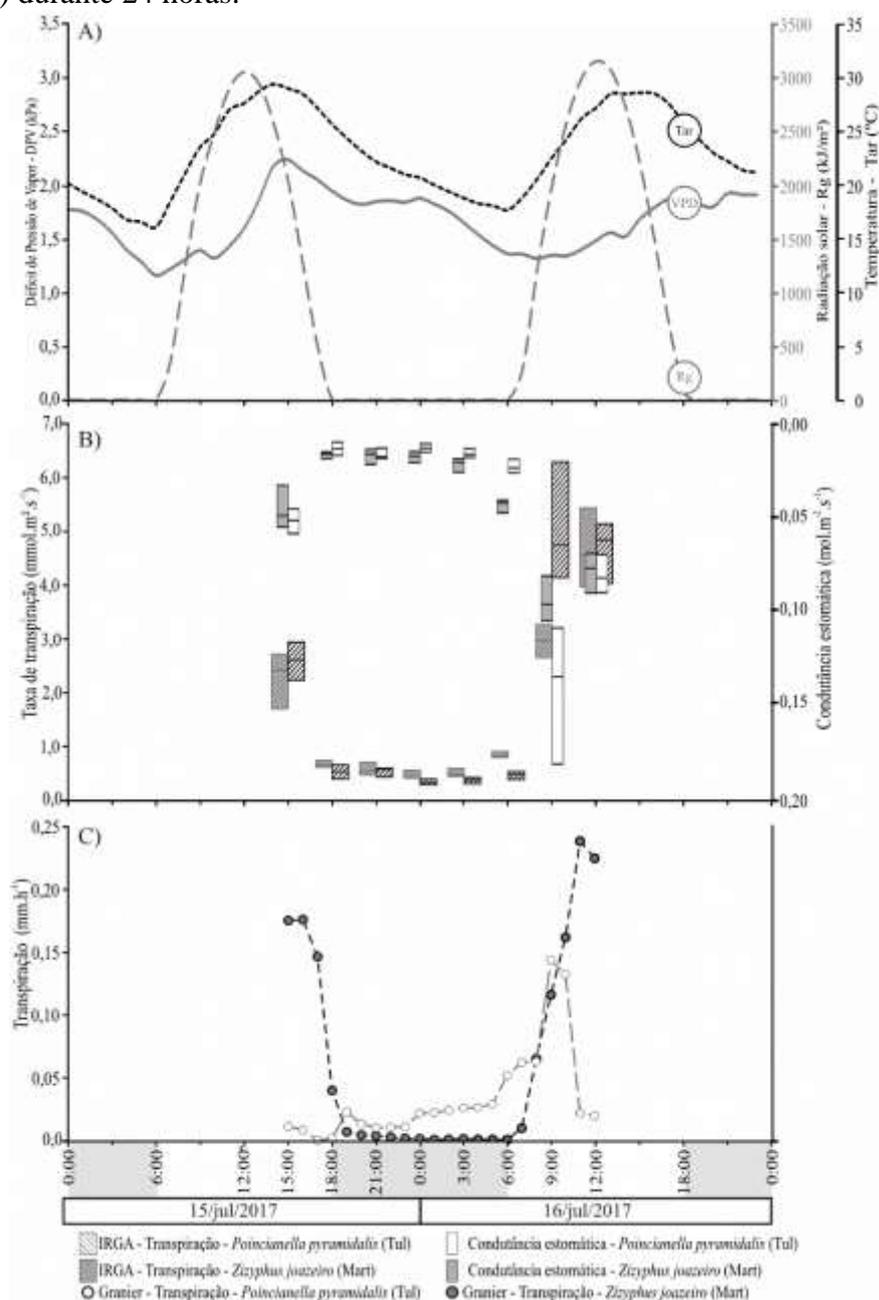


### Avaliação da transpiração noturna em espécies representativas do bioma Caatinga através de diferentes métodos de monitoramento

A umidade do solo não variou significativamente durante o período de monitoramento (24 horas), com valor médio de  $0,13 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ . A umidade relativa do ar variou de 27% (16:00 h) a 69% (06:00 h). O déficit de pressão de vapor (DPV) foi máximo às 15:00 h com 3,51 kPa e mínimo às 06:00 h com 0,67 kPa (Figura 37A). Observa-se também na Figura 37A que a temperatura do ar no período variou de  $16,1^\circ\text{C}$  a  $29,4^\circ\text{C}$ . Isso corresponde à uma amplitude térmica de  $13,3^\circ\text{C}$  durante as 24 h de monitoramento. A radiação solar atingiu valor máximo de  $3.156 \text{ KJ} \cdot \text{m}^{-2}$  às 12:00 h.

O índice área foliar (IAF) de *P. pyramidalis* e *Z. joazeiro* medido durante o monitoramento foi de 0,28 e  $2,05 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , respectivamente. Os resultados de IAF obtidos para a planta caducifólia (*P. pyramidalis*) estão em concordância com Almeida(2016), que mediu o IAF dessas plantas na BEA usando o método da serapilheira, obtendo valores sempre inferiores a  $0,5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ , no ano de 2014. Para as 48 amostras em cada planta, a *P. pyramidalis* apresentou transpiração média de  $1,50 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , mediana de 0,71 e desvio padrão de 1,47. O *Z. joazeiro* apresentou transpiração média de  $1,69 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , mediana de 0,45 e desvio padrão de 1,91. A distribuição da transpiração (T) ao longo das 24 horas monitoradas encontra-se representada na Figura 37B.

**Figura 39** - (A) Valores de temperatura do ar ( $T_{air}$ ), radiação solar ( $R_g$ ) e déficit de pressão de vapor (VPD) medidos durante 24 horas. (B) box plot comparando o comportamento a cada três horas da taxa de transpiração e condutância estomática entre as duas espécies (*P. pyramidalis* e *Z. joazeiro*) durante 24 horas.



O teste de normalidade de Shapiro-Wilk (1968), aplicado aos dados de transpiração obtidos pelo IRGA nas duas espécies, indicou que os mesmos não seguem distribuição normal. Então foi realizado o teste não paramétrico U Mann Whitney (1947) e obteve-se P(bi-caudal) de 0,16, portanto  $P > 0,05$ , ou seja, não existe diferença significativa entre os valores da taxa de transpiração de *P. pyramidalis* e do *Z. joazeiro* segundo as medidas do IRGA.

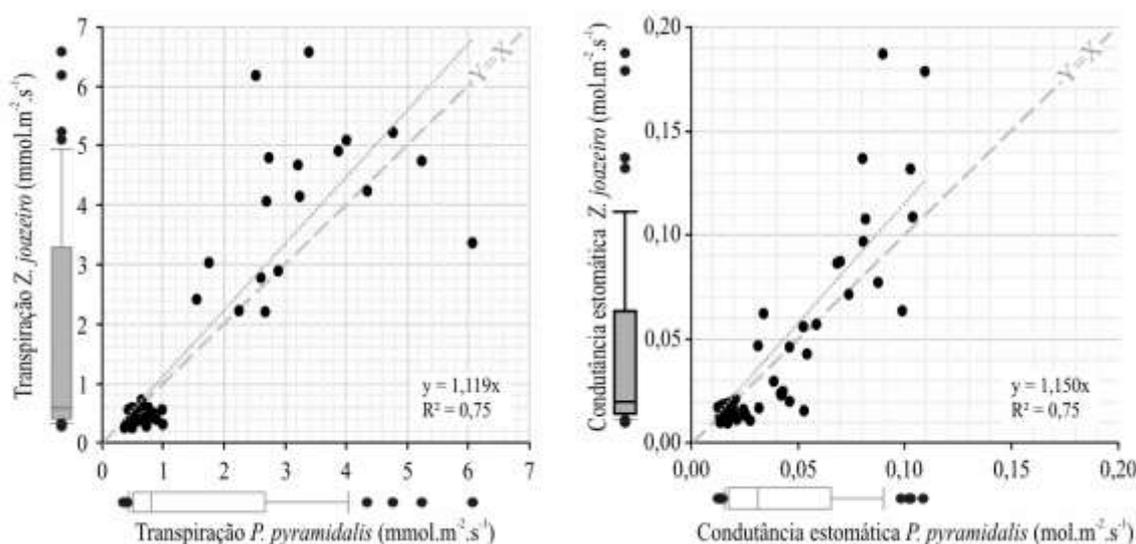
Siddiq and Cao (2017) também não encontraram diferenças na densidade de fluxo de seiva quando compararam espécies sempre verde vs espécies decíduas, no sudoeste da China. Silva *et al.*, (2004) no sertão paraibano encontraram T máximo de 4,92 mmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> em *Z. joazeiro* e 2,87 mmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> para *P. pyramidalis* às 10 horas. Os valores máximos encontrados na BEA foram de 5,04 mmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> para o *Z. joazeiro* e 4,52 mmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> (12 h) para a *P. pyramidalis*, ambos às 12 horas.

A condutância estomática (gs) da *P. pyramidalis* apresentou valor médio de 0,039 mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>. O *Z. joazeiro* apresentou condutância estomática média de 0,041 mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>. A distribuição de gs ao longo das 24 horas monitoradas encontra-se representada na Figura 1B. Os valores máximos diários de gs encontrados na BEA foram de 0,089 mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> para a *P. pyramidalis* e 0,137 mol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup> para o *Z. joazeiro*, ambos às 09:00 h. A análise dos valores de gs a partir do teste de normalidade de Shapiro-Wilk e dos dois grupos (gs na *P. pyramidalis* e gs no *Z. joazeiro*) não apresentaram distribuição normal, ou seja, P<0,05. Obteve-se, a partir do teste não paramétrico U Mann Whitney valor de P(bi-caudal) de 0,22, portanto P>0,05. Aceita-se, portanto, a hipótese de nulidade, ou seja, não existe diferença significativa de gs entre as duas espécies. Esse resultado se assemelha ao de Souza *et al.*, (2015), que investigaram a condutância estomática (somente diurna) na Caatinga.

Uma das possíveis explicações para a transpiração noturna das plantas (caducifólias ou sempre verdes) no bioma Caatinga é a ocorrência do fechamento incompleto dos estômatos. Durante o período noturno, predominariam os processos evaporativos de origem aerodinâmica (Penman, 1948) pois, no bioma, ocorrem ventos noturnos (velocidade média variando de 0,3 a 6,1 m.s<sup>-1</sup> com rajadas de até 13,2 m.s<sup>-1</sup> em julho na BEA: FUNCEME, 2017) com teor de umidade frequentemente baixo (20% a 94% em julho na BEA: FUNCEME, 2017). O fechamento estomático incompleto durante a noite é observado em uma variedade diversa de espécies C3 e C4 e pode levar à perda substancial de água durante a transpiração noturna (Caird *et al.*, 2007). Dombroski *et al.*, (2011), ao estudarem seis espécies do bioma Caatinga, apenas durante o dia, observaram para a espécie *Mimosa caesalpinifolia* valores maiores de gs nas primeiras horas da manhã e o valor não aumentou com a radiação solar, indicando que as reservas de água da planta provavelmente foram baixas e não houve reabastecimento para sustentar a transpiração durante o dia. No caso da BEA, observou-se ainda que gs aumenta no início do dia, atingindo o valor máximo às 9:00 h da manhã, seguindo uma redução até anoitecer. Entretanto, o processo de evapotranspiração não é interrompido totalmente durante o período noturno como pode ser observar na Figura 1B.

Observou-se uma correlação linear entre *P. pyramidalis* e *Z. joazeiro* para os dados de transpiração (T) e condutância estomática (gs) (Figura 38). Observou-se melhor ajuste para o modelo linear com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,75 e coeficiente angular de 1,12 para os dados de transpiração (T). Isso indica uma taxa de transpiração levemente maior no *Z. joazeiro*. Para o gráfico gs em *P. pyramidalis* (Tul) vs gs em *Z. joazeiro*, o coeficiente angular foi de 1,15 com  $R^2$  de 0,75.

**Figura 40** - Correlação linear entre valores de transpiração e condutância estomática em plantas de *P. pyramidalis* (Tul) e *Z. joazeiro* (Mart.) para um período de 24 horas; box plot paralelo aos eixos apresentando a dispersão de T e gs.



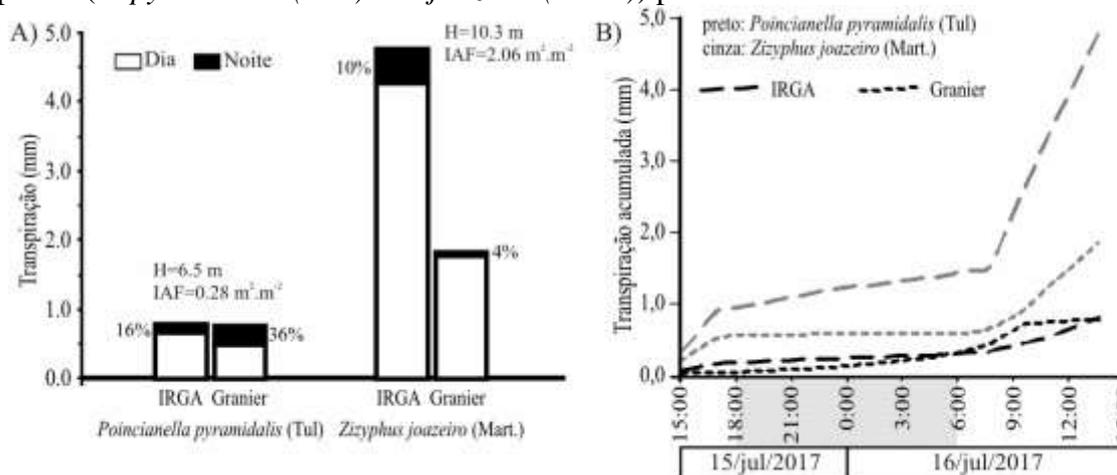
A partir da análise do box plot da Figura 38 observa-se que a dispersão dos dados de T e gs do *Z. joazeiro* são maiores. Entretanto, os valores medianos de T e gs do *Z. joazeiro* e da *P. pyramidalis* são próximos, confirmando a análise estatística e a regressão linear. Isso reflete nas adaptações para sobrevivência no semiárido. De acordo com as observações de campo, pode-se inferir que o *Z. joazeiro*, apesar da maior área foliar, apresenta maior controle na abertura e fechamento dos estômatos e a *P. pyramidalis* apresenta maior abertura nos estômatos e uma área foliar reduzida.

O método proposto por Granier (1985) permitiu estimar uma lâmina transpirada no *Z. joazeiro* e *P. pyramidalis* para 24 horas igual a 1,4 mm e 0,7 mm, respectivamente (Figura 3A). Assim, a transpiração noturna no *Z. joazeiro* e *P. pyramidalis* representou 4% e 36% do total diário, respectivamente. Por outro lado, a estimativa obtida pela medição das trocas gasosas foliares (IRGA) indicou uma lâmina transpirada para 24 horas no *Z. joazeiro* de 4,67 mm e 0,78 mm para a *P. pyramidalis*. Isso representa uma transpiração noturna no *Z. joazeiro* e *P. pyramidalis* representou 10% e 16% do total diário, respectivamente.

Além disso, a análise da variação de medida entre os métodos suscitam algumas hipóteses: (i) a diferença entre a lâmina transpirada diária em *Z. joazeiro* através dos métodos (Granier = 1,4 mm e IRGA = 4,7 mm) ocorre pelo tipo de folha amostrada, havendo variação significativa entre as medições em folhas de sol e folhas de sombra. Como o IAF no *Z. joazeiro* é dez vezes maior que no *P. pyramidalis*, mais folhas estão submetidas ao sombreamento e a estimativa pode ter sido feita com predominância de folhas expostas ao sol. Para a *P. pyramidalis*, o IAF é menor e ocorre fraco sombreamento, predominando, portanto, folhas sob o sol; (ii) a transpiração noturna é maior na *P. pyramidalis* pelo aumento das perdas transpirativas pela cutícula, corroborando com os resultados de Caird *et al.*, (2007). Os autores *op cit.* avaliaram transpiração em plantas sob condições ambientais estressadas, concluindo que uma porção significativa de perda de água por transpiração pode ocorrer através da cutícula, quando os estômatos estão fechados. Dependendo das espécies de plantas, a transpiração cuticular pode representar de 5% a 15% da transpiração da folha e alguns casos pode ser ainda maior (até 25-30%).

Analisando-se os valores de transpiração (T) acumulada da planta inteira (Figura 39B), verifica-se que plantas de *Z. joazeiro* apresentaram lâmina média cinco vezes maior que a *P. pyramidalis*. Isso pode ter ocorrido devido à condição de área foliar que o *Z. joazeiro* manteve ( $IAF = 2,05 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ), por ser uma planta sempre verde, enquanto a *P. pyramidalis*, em processo de senescência foliar, apresentava apenas 10% ( $IAF = 0,28 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ) da sua área foliar máxima.

**Figura 41** - A - Transpiração total - diurna e noturna; B - transpiração acumulada em duas espécies (*P. pyramidalis* (Tul.) e *Z. joazeiro* (Mart.)) período de 24 horas.



Forster (2014) analisou o fluxo de seiva noturno de 98 espécies (246 dados) e verificou que o fluxo de seiva noturna ocorre em muitos táxons, estações e biomas e não há

compreensão geral quanto à quantidade de fluxo de seiva noturno ocorrido e se é uma contribuição significativa para o fluxo de seiva diário total. Para as espécies analisadas por Forster (2014), o fluxo de seiva noturno representou, em média, 12% do fluxo de seiva total diário, com o maior valor chegando a 69%. Esta proporção (fluxo de seiva noturno / fluxo de seiva diurno) é frequentemente maior nos sistemas áridos do deserto (30-60%, ver Snyder *et al.*, 2003), embora na maioria dos ecossistemas essa razão esteja geralmente na faixa de 7-10%. Esses valores potencialmente elevados de transpiração noturna podem ter implicações significativas para os planejamentos hídricos e precisam ser quantificados com precisão.

Os valores obtidos pelos dois métodos (IRGA e Granier) não convergem, principalmente no *Z. joazeiro*; isso pode estar relacionado às diferentes metodologias utilizadas neste estudo e seu local de monitoramento na planta, ou seja, Granier (1985) avalia a transpiração com medidas no caule, enquanto o IRGA mede as trocas gasosas nas folhas. Isso pode ser um reflexo da diferença na resposta fisiológica da planta, não do potencial evaporativo, uma vez que as medidas foram realizadas no campo ao mesmo tempo. A diferença na transpiração obtida pelos dois métodos reforça a hipótese de ocorrência de processos ainda pouco estudados de fluxo de seiva e redistribuição hidráulica nas plantas. Para Caird, *et al.*, (2007) as medidas de troca gasosas ao nível da folha geralmente incluem componentes cutâneos e estomáticos da condutância foliar para o vapor de água, enquanto os métodos de fluxo de seiva normalmente têm incertezas de atendimento quanto à proporção do fluxo medido, resultando em reabastecimento de cobertura em vez de transpiração do dossel.

Snyder *et al.*, (2003), usando um analisador de gás infravermelho portátil, mediram a transpiração em onze espécies no deserto de Mojave no sudoeste dos Estados Unidos, e concluíram que existiu transpiração noturna em todas as espécies avaliadas, tendo superado 10% da transpiração (T)diária. Em sete espécies a transpiração noturna essa razão foi maior que 15%. Dios *et al.*, (2015) mediram variações de T noturna entre 11% e 19% em relação aos valores diários, em plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris*) e algodão (*Gossypium hirsutum*) em Montpellier, no sul da França. Os autores ainda ressaltam que a transpiração noturna poderia ter um impacto na evapotranspiração global, numa ordem de grandeza maior do que as mudanças atuais na intensidade do ciclo de evapotranspiração resultante do aquecimento global.

Para Snyder *et al.*, (2003) os modelos hidrometeorológicos baseados em climas atuais e futuros podem demandar a modificação de algoritmos de uso da água da planta, especialmente se esse fenômeno de perda de água durante a noite for generalizado em ambientes quentes e secos. Ao desconsiderar a transpiração noturna pode-se cometer um erro maior que o

resultado das previsões climáticas de aquecimento global. Os resultados de Dios *et al.*, (2015) corroboram as mesmas conclusões, pois a transpiração noturna pode atingir valores entre 50-100 mm.ano<sup>-1</sup>.

No bioma Caatinga há transpiração continuada, apesar de, à noite, a transpiração ser em taxa menor, variando de 4% a 36% da transpiração total diária. Caird *et al.*, (2007) fizeram uma revisão bibliográfica de mais de 150 trabalhos e afirmaram que as taxas de transpiração noturnas são tipicamente de 5% a 13% das taxas diárias, embora às vezes, essa taxa chegue a 23%. As medidas acima referidas tiveram como base avaliação de troca gasosa de folhas individuais, fluxo de seiva de planta inteira e lisimetria em escala de campo.

## CONCLUSÕES

O xilema hidroativo de *Poincianella pyramidalis* (Tul.) representa em média 64% da área basal, podendo variar de 34% a 90% e não foi possível observar diferenças entre as estações chuvosa e seca, para as medições realizadas.

As medidas realizadas no lisímetro de pesagem mostraram-se eficientes ao longo de todo o estudo, pois toda perturbação, causada pela entrada ou saída de água no sistema experimental, foi percebida imediatamente por esses sensores.

As medições do fluxo de seiva utilizando coeficientes originais da equação de Granier (1985) subestimou em 44% os valores de fluxo de seiva em escala diária, variando de -39% a 74%, quando comparado com a equação ajustada.

O fluxo de seiva médio em *P. pyramidalis* foi de 18,1 L.dia<sup>-1</sup> e variou entre 1,4 e 47,0 L.dia<sup>-1</sup>. Além disso, para análise da distribuição temporal do FS os dados foram agrupados em quatro regimes hídricos: chuvoso; transição chuvoso-seco; seco e transição seco-chuvoso. Observou-se que o FS aumentou durante o período de transição chuvoso-seco e seco em comparação com o período chuvoso. Esta constatação indica que a influência, neste regime hídrico, dos baixos valores de déficit de pressão de vapor (DPV), temperatura do ar e ET<sub>0</sub> fazem com que FS seja menor durante o período úmido em comparação com o período seco.

A relação do fluxo de seiva em intervalos de uma hora e o déficit de pressão de vapor não mostraram um comportamento linear, apresentando um padrão de histerese durante o ciclo diário.

As medições do gradiente térmico natural (GTN) em *P. pyramidalis* (Tul.) em períodos com e sem déficit hídrico corroboraram com a necessidade e importância das correções do gradiente térmico natural (GTN) às medidas padrão da sonda de dissipação térmica (SDT), particularmente quando se realizam medições de fluxo de seiva em condições semiáridas, pois o recurso hídrico é escasso e pequenos volumes podem representar um percentual significativo do todo. No período seco ocorreram as maiores variações do GTN e consequentemente houve menor correlação com os parâmetros atmosféricos.

A transpiração noturna ocorreu em quantidades mensuráveis nas duas espécies avaliadas neste estudo (*P. Pyramidalis* e *Z. joazeiro*), que representam tipos funcionais contrastantes (decídua e sempre verdes, respectivamente) do bioma Caatinga. Ambas as espécies apresentaram valores semelhantes de transpiração e condutância estomática, quando avaliadas pelo método IRGA e considerando apenas as medidas foliares, no início da estação seca. Ao considerar a área foliar de cada planta, *P. pyramidalis* apresentou lâmina transpirada

cinco vezes menor quando comparada à perene *Z. joazeiro*. Portanto, a caducifolia de *P. Pyramidalis* teve influência direta na profundidade da transpiração, mesmo no período noturno. A transpiração noturna em ambas as espécies variou de 4% a 36%, de acordo com o método de dissipação térmica (Granier); e de 10% a 16% pelo método do analisador de gases infravermelhos (IRGA) em relação à transpiração diária. Estes resultados indicam que os valores de transpiração noturna devem ser computados nos modelos hidrológicos da Caatinga, dada a sua magnitude. A redistribuição hidráulica na planta pode explicar a divergência das medidas de transpiração feitas pelos métodos IRGA e Granier, os dois métodos não permitem essa avaliação. Além disso, as diferenças na transpiração medidas pelos dois métodos (IRGA e Granier) podem estar associadas à metodologia assumida em cada caso. De fato, o local de medição na planta difere substancialmente (folha e caule, respectivamente). Recomendamos fortemente outros estudos que possam avaliar a redistribuição hidráulica.

Conclui-se ainda que a transpiração média anual de *P. pyramidalis* corresponde a 44-69% da precipitação média anual na BEA; e que o método da sonda de dissipação térmica e fluxo de seiva é eficiente no cálculo da transpiração em plantas do bioma Caatinga.

Estes resultados destacam alguns aspectos únicos na medição de transpiração em florestas tropicais sazonalmente secas que são relevantes para estudos futuros.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG, J.J.; REZENDE, G.D. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v.251, p.10-21, 2007. doi: 10.1016/j.foreco.2007.06.009.
- ALMEIDA, CICERO LIMA de. **Relações solo-planta-atmosfera em caatinga preservada: o caso da Bacia Experimental de Aiuaba**. 2016. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- ALVES, T. B. C., ALVES, G. H., RIBEIRO, H. B., MARTINS NETO, L.. Verificação Termográfica da Distribuição da Corrente Elétrica No Linor de um Motor Linear. In: **XIV CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. Anais**. Universidade Federal de Uberlândia - UFU Uberlândia, Minas Gerais, 2016.
- ALVES, E. U., CARDOSO, E. DE A., BRUNO, R. DE L. A., ALVES, A. U., ALVES, A. U., GALINDO, E. A., BRAGA JUNIOR, J. M.. Superação da dormência em sementes de *Caesalpinia pyramidalis* Tul.**Rev. Árvore**[online]. Vol.31, n.3, pp. 405-415. 2007. ISSN 1806-9088. Doi: 10.1590/S0100-67622007000300006
- APARECIDO, L. M. T., MILLER, G. R., CAHILL, A. T., MOORE, G. W. Comparison of tree transpiration under wet and dry canopy conditions in a Costa Rican premontane tropical forest, **Hydrol. Process**.30: 5000–5011.2010. DOI: 10.1002/HYP.10960
- ARAÚJO, B. DE A., SILVA, M.C.B DA, MOREIRA, F.J.C., SILVA, K. DA F., TAVARES, M. K. DAS N.. Caracterização biométrica de frutos e sementes, química e rendimento de polpa de juazeiro (*Ziziphus joazeiro* Mart.). **ACSA - Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 11, n. 2, p. 15-21, Abr - Jun, 2015. ISSN 1808-6845
- BARROS, ILEANE OLIVEIRA; SOARES, ARLETE APARECIDA. Adaptações anatômicas em folhas de marmeleiro e velame da Caatinga brasileira.**Rev. Ciênc. Agron.**, Fortaleza , v. 44, n. 1, p. 192-198, Mar. 2013. DOI: 10.1590/S1806-66902013000100024.
- BAUERLE, T. L., RICHARDS, J. H., SMART, D. R., EISSENSTAT, D. M. (2008), Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil. **Plant, Cell & Environment**, 31: 177–186.2008. DOI: 10.1111/J.1365-3040.2007.01749.X.
- BRODRIBB, T. J., COCHARD, H. Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. **Plant Physiol**. 149, 575–584 .2009. DOI: 10.1104/PP.108.129783
- BUCCI, S. J.; SHOLZ, F. G.; GOLDSTEIN, G.; HOFFMANN, W. A.; MEINZER, F. C.; FRANCO, A. C.; GIAMBELLUCA, T.; WILHELM, F. M. Controls on stand transpiration and soil water utilization along a tree density gradient in a Neotropical savanna. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.839-849, 2008. DOI: 10.1016/J.AGRFORMET.2007.11.013

- BURGESS, S. S. O., PATE, J. S., ADAMS, M. A., DAWSON, T. E.. 2000. Seasonal water acquisition and redistribution in the Australian woody phreatophyte *Banksia prionotes*. **Ann. Bot.** 85:215–224.2000. DOI: 10.1006/ANBO.1999.1019.
- BURGESS, S. S. O., PATE, J. S., ADAMS, M. A., DAWSON, T. E.. 2000. Seasonal water acquisition and redistribution in the Australian woody phreatophyte *Banksia prionotes*. **Ann. Bot.** 85:215–224.
- BUSH SE, HULTINE KR, SPERRY JS, EHLERINGER JR. Calibration of thermal dissipation of sap flow probes for ring and diffuse porous trees. **Tree Physiology**30: 1545-1554. 2010. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPQ096.
- CABIBEL, B.; DO, F. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres: I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. **Agronomie**, Paris, v.11, p.669-78. 1991.
- CAIRD, M.A., RICHARDS, J.H., DONOVAN, L.A. Nighttime Stomatal Conductance and Transpiration in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> Plants. **Plant Physiology** Jan 2007, 143 (1) 4-10; DOI: 10.1104/PP.106.092940
- CALIXTO JÚNIOR, J. T. **Análise estrutural de duas fitofisionomias de caatinga em diferentes em diferentes estados de conservação no semiárido pernambucano**. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Campina Grande- UFCG, Patos, Paraíba, 2009.
- CARVALHO, P. M. R. **Juazeiro - Ziziphus joazeiro**. Colombo, PR, Embrapa, 8p. (Comunicado Técnico, 139) 2007.
- CARVALHO, T. R. A. **Índice de área foliar em Caatinga preservada: avaliação in-situ e através da resposta espectral da vegetação**. 2016. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- CERMÁK, J.; DEML, M.; PENKA, M. A new method of sap flow rate determination in trees. **Biol. Plant.** (*Praha*) n.15, p. 171– 178, 1973.
- CERQUEIRA JUNIOR, J. G.; FERNANDEZ, J. H.; HOELZEMANN, J. J.; LEME, N. M. P.; SOUSA, C. T.. Estudo da Variabilidade da Coluna de Água Precipitável (PWC) no Semiárido Brasileiro para Calibração de Fotômetro Solar. **HOLOS**, [S.l.], v. 4, p. 298-316, ago. 2014. ISSN 1807-1600. DOI: 10.15628/HOLOS.2014.2065.
- CHEN, L., ZHANG, Z., ZEPPEL, M., LIU, C., GUO, J., ZHU, J., ZHA, T.. Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semiarid plantation. **Int J Biometeorol**, 58, 1569–1581. 2014. DOI: 10.1007/S00484-013-0761-9.
- CLEARWATER MJ, MEINZER FC, ANDRADE JL, GOLDSTEIN G, HOLBROOK NM. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. **Tree Physiology** 19: 681-687. 1999. DOI: 10.1093/TREEPHYS/19.10.681.

- CHEN, L., ZHANG, Z., ZEPPEL, M., LIU, C., GUO, J., ZHU, J., ... ZHA, T. Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semiarid plantation. **Int J Biometeorol**, 58, 1569–1581. 2014a DOI: 10.1007/S00484-013-0761-9
- CHEN, L. X., ZHANG, Z. Q., ZHA, T. G., MO, K. L., ZHANG, Y., & FANG, X. R. Soil water affects transpiration response to rainfall and vapor pressure deficit in poplar plantation. **New Forest**, 45, 235–250. 2014b DOI: 10.1007/S11056-014-9405-0
- COELHO, R. D., VELLAME, L. M., & FRAGA JÚNIOR, E. F. Estimation of transpiration of the 'Valencia' orange young plant using thermal dissipation probe method. **Engenharia Agrícola**, vol. 32(3), pg. 573-581. 2012.
- COSTA, C. A. G. **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de Caatinga preservada**. 188f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- COSTA, C. A. G.; LOPES, J. W. B.; PINHEIRO, E.A.R. De ARAÚJO, J.C.; GOMES FILHO, R. R. *et al.* Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga biome. **Rev. Ciênc. Agron.**[online].vol.44, n.4, pp. 685-694. 2013. ISSN 1806-6690.
- DALEY, M. J., PHILLIPS, N. G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest, **Tree Physiol.**, vol. 26 (pg. 411-419) 2006.
- DANTAS, F.C.P., TAVARES, M.L.R., TARGINO, M.DA S., COSTA, A.P.DA, DANTAS, F.D.. *Ziziphus joazeiro* Mart. - Rhamnaceae: características biogeoquímicas e importância no bioma Caatinga **Revista Principia**. N. 25, 2014 Pág. 51-57. ISSN 1517-0306
- DAVIS, S. D., EWERS, F. W., SPERRY, J. S., PORTWOOD, K. A., CROCKER, M. C., ADAMS, G. C. Shoot dieback during prolonged drought in *Ceanothus* (Rhamnaceae) chaparral of California: a possible case of hydraulic failure. **American Journal of Botany** 89: 820–828.2002.
- De ARAÚJO JC, PIEDRA JIG. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes** 23: 1169 – 1178. 2009. DOI: 10.1002/HYP.7232
- De FIGUEIREDO, J. V.; de ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A.; COSTA, A.C. Runoff 179 initiation in a preserved semiarid caatinga small watershed, Northeastern Brazil. 180 **Hydrological Processes**, 11p, 2016. DOI: 10.1002/HYP.10801.
- DELGADO-ROJAS, J. S.; ANGELOCCI, L. R.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO FILHO, M. A. Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida. **Revista Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.404-413, 2007.
- DENG, J.; DING, G.; GAO, G.; WU, B.; ZHANG, Y.; QIN, S.; FAN, W. The Sap Flow Dynamics and Response of *Hedysarum scoparium* to Environmental Factors in Semiarid Northwestern China. **PLoS ONE**. 10(7): e0131683.2015. DOI: 10.1371/JOURNAL.PONE.0131683.

DIOS, VR de, ROY, J, FERRIO, JP, ALDAY, JG, LANDAIS, D, MILCU, A, GESSLER, A. Processes driving nocturnal transpiration and implications for estimating land evapotranspiration. **NatureScientific Reports**. [2045-2322] vol:5 iss:1 pg:10975. DOI: 10.1038/SREP10975. 2015.

DINIZ, M. C. M. M.. **Desenvolvimento e rebrota da cunhã (*Clitoria ternatea* L.) sob estresse hídrico, em associação com fungos micorrízicos-*Bradyrhizobium***. 78f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 1999.

DO, F.; ROCHETEAU, A.. Influence of natural temperature gradients on measurements of 183 xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. 184 **Tree Physiology**, 22:641–648. 2012. DOI: 10.1093/TREEPHYS/22.9.649

DURLO, M.A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v.8, p.55-56, 1998.

DU, S., WANG, Y.L., KUME, T., ZHANG, J.G., OTSUKI, K., YAMANAKA, N., LIU, G.B.. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. **Agric. For. Meteorol.**, 151, pp. 1–10. 2011.

DU, S., WANG, Y.L., KUME, T., ZHANG, J.G., OTSUKI, K., YAMANAKA, N., LIU, G.B.. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. **Agric. For. Meteorol.**, 151, pp. 1–10. 2011.

DOMBROSKI JLD, PRAXEDES SC, FREITAS RMO, PONTES FM; Water relations of Caatinga trees in the dry season. **S Afr J Bot** 77:430–434. 2011. DOI: 10.1016/J.SAJB.2010.11.001

DORONILA, A. I., FORSTER, M. A.. Performance measurement via sap flow monitoring of three Eucalyptus species for mine site and dryland salinity phytoremediation. **Int J Phytorem.**, vol. 17 (pg: 101 -108).2015.

ELAIUY, M. L. C.; SATO, L. M.; VARALLO, A. C. T.; SOUZA, C. F. Desenvolvimento e avaliação de sonda TDR para o manejo racional de água em substratos utilizados na produção de mudas forestais. **Revista Ambi-Agua**, v.4, n.1, 2009. DOI: 10.4136/AMBI-AGUA.77.

ELLER, C. B., LIMA, A. L., OLIVEIRA, R. S. Foliar uptake of fog water and transport belowground alleviates drought effects in the cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae). **New Phytologist** 199: 151–162.2013.

ELLER, C. B., BURGESS, S. S. O., OLIVEIRA, R. S.; Environmental controls in the water use patterns of a tropical cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae). **Tree Physiol**; 35 (4): 387-399.2015. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPV001

FERNANDES, D.R.R., ARAÚJO, E.L.. Occurrence of *Zaprionus indianus* Gupta (Diptera: Drosophilidae) In “Juazeiro” Fruits *Ziziphus Joazeiro* Mart. (Rhamnaceae) in the state of Rio Grande Do Norte, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 33 pp. 1356-1358. 2013.

FFOLLIOTT PF, GOTTFRIED GJ, COHEN Y, SCHILLER G. Transpiration by dryland oaks: studies in the south-western United States and Northern Israel. **J Arid Environ.** 55: 595–605.2003. DOI: 10.1016/S0140-1963(02)00290-2

FISHER, J. B., BALDOCCHI, D. D., MISSON, L., DAWSON, T. E., GOLDSTEIN, A. H.. What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two Ameriflux sites in California, **Tree Physiol.**, vol. 27 (pg. 597-610) .2007.DOI: 10.1093/TREEPHYS/27.4.597

FLEMING, P.M., ANTONINO, A.C.D., PIMENTEL, R.M., LIRA, C.A.B.O., ALVES, G.D., CABRAL, J.J.S.D. Transpiração em plantas de Algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.) cultivadas no semi-árido nordestino. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8 n.4, pp. 25-30. 2003.

FORSTER, M. A. How significant is nocturnal sap flow? **Tree Physiol.**, 34:757-765.2014. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPU051

FRANCONE, C., PAGANI, V., FOI, M., CAPPELLI, G., CONFALONIERI, R. Comparison of leaf area index estimates by ceptometer and PocketLAI smart app in canopies with different structures. **Field Crops Res.** 2014, 155, 38-41.

GAO, J.; ZHOU, J.; SUN, Z.; NIU, J.; ZHOU, C.; GU, D.; ZHAO, P. Suppression of nighttime sap flux with lower stem photosynthesis in Eucalyptus trees. **Int. J. Biometeorol.** 60, 545–556.2016. DOI: 10.1007/S00484-015-1050-6

GENTIL, M. S. **Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de Eucalyptus aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia.** Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 65 p. 2010.

GIUNTI NETO, C. J., HAKAMADA, R. E., OTTO, M. S. G., SILVA, S. R., STAPE, J. L. Calibração de dois métodos indiretos para estimativa do índice de área foliar em plantações de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, volume 43, n. 108 p.919-930, dezembro de 2015 DOI: DX.DOI.ORG/10.18671/SCIFOR.V43N108.16

GRANIER , A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières** 42:193-200. 1985.

GRANIER, A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. **Tree Physiol.** 3, 309–319. 1987.

GRANIER A., BOBAY V., GASH J.H.C., GELPE J., SAUGIER B., SHUTTLEWORTH W.J.. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest, **Agric. For. Meteorol.** vol. 51 (pg. 309-319) DOI:10.1016/0168-1923 (90)90115-M. 1990.

GRANIER, E.; BERGER, A. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. **Journal of Applied Ecology**, v.23, p.193-209, 1986.

GREGÓRIO, J. P. C. **Avaliação do regime hídrico na produtividade e qualidade do tomate de indústria.** 52 p. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre na área de Agricultura Sustentável, na Escola Superior Agrária de Santarém. 2014.  
Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.15/1419>

GOLDSMITH, G. R. Changing directions: the atmosphere–plant–soil continuum. **New Phytol**, 199: 4–6. 2013. DOI: 10.1111/NPH.12332

HEATHMAN, G. C.; LAROSE, M.; COSH, M. H.; BINDLISH, R. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA. **Catena**, v.78, p.159-169, 2009.

HÖLTTÄÄ, T., LINKOSALOA, T., RIIKONENA, A., SEVANTOB, S., NIKINMAAA, E. An analysis of Granier sapflow method, its sensitivity to heat storage and a new approach to improve its time dynamics. **Agricultural and Forest Meteorology**. 211–212, 2–12. 2015.

HUANG, J.; ZHOU, Y.; YIN, L.; WENNINGER, J.; ZHANG, J.; HOU, G.; ZHANG, E.; UHLENBROOK, E.. Climatic controls on sap flow dynamics and used water sources of *Salix psammophila* in a semi-arid environment in northwest China. **Environ. Earth Sci.** 73 289–301. 2015. DOI: 10.1007/S12665-014-3505-1.

HUBBARD, R.M.; RYAN, M.G.; GIARDINA, C.P.; BARNARD, H. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental forest. **Global Change Biology**, Colorado, v.10, n.4, p.427-36, 2004.

HUBER B. Weitere quantitative Untersuchungen über das Wasserleitungssystem der Pflanzen. **Jahrb Wiss Bot**, 67, 877-959. 1928.

HUBER, B: Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. **Ber. deutsch. Bot. Ges.**, 50, 89-109. 1932

HULTINE, K. R., NAGLER, P. L., MORINO, K., BUSH, S. E., BURTCHE, K. G., DENNISON, P. E., GLENN, E. P., EHLERINGER, J. R.. Sap flux-scaled transpiration by tamarisk (*Tamarix spp.*) before, during and after episodic defoliation by the saltcedar leaf beetle (*Diorhabda carinulata*), **Agric. For. Meteorol.** vol. 150 (pg. 1467-1475), 2012. DOI: 10.1016/J.AGRFORMET.2010.07.009.

JANSSON, J. **Rehabilitation in a tropical secondary rain forest in Malaysian Borneo - Early effects of canopy properties on light conditions at the forest floor.** 2015. 40 p. Master of Science in Forestry, Faculty of Forest Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Borneo, Malásya. ISSN 1654-1898. 2015.

JIAO, L., LU, N., SUN, G., WARD, E. J., ANDFU, B. Biophysical controls on canopy transpiration in a black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantation on the semi-arid Loess Plateau, China. **Ecohydrol.** 9:1068–1081. 2016. DOI:10.1002/ECO.1711.

JI, X.; ZHAO, W.; KANG, E.; JIN, B.; XU, S.. (2016) Transpiration from three dominant shrub species in a desert-oasis ecotone of arid regions of Northwestern China, **Hydrol. Process.**, 30: 4841–4854. 2016. DOI: 10.1002/HYP.10937.

KUME T., OTSUKI K., DU S., YAMANAKA N., WANG YL., LIU GB. Spatial variation in sap flow velocity in semiarid region trees: its impact on stand-scale transpiration estimates. **Hydrological Processes** 26: 1161–1168.2012. DOI: 10.1002/HYP.8205.

KURSAR, T. A.; ENGELBRECHT, B. M. J.; BURKE, A.; TYREE, M. T.; EI OMARI, B.; GIRALDO, J. P.. Tolerance to low leaf water status of tropical tree seedlings is related to drought performance and distribution. **Funct. Ecol.** 23, 93–102. 2009. DOI: 10.1111/J.1365-2435.2008.01483.X

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2006. 550 p. 2006

LEI, Y.; LUBO, G.; HUAXING, B.; QINGKE, Z.; XIAOYAN, W. Spatio-temporal dynamics of soil moisture in silvopastoral system in the Loess Plateau of west Shanxi province. **Procedia Environmental Sciences**, v.8, p.153-160, 2011. DOI:10.1016/J.PROENV.2011.10.025

LEMONS, JESUS RODRIGUES; MEGURO, MARICO. Estudo fitossociológico de uma área de Caatinga na Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba, Ceará, Brasil. **Biotemas**, Florianópolis, v. 28, n. 2, p. 39-50, mar. 2015. ISSN 2175-7925. DOI: HTTP://DX.DOI.ORG/10.5007/2175-7925.2015V28N2P39.

LI, S., XIAO, H., ZHAO, L., ZHOU, M., WANG, F.. “Foliar Water Uptake of Tamarix ramosissima from an Atmosphere of High Humidity,” **The Scientific World Journal**, vol. 2014, Article ID 529308, 10 pages, 2014. DOI: 10.1155/2014/529308

LIMA FILHO, J. M. P. Ecofisiologia de plantas da Caatinga. **XXVII Reunião Nordestina de Botânica**. Petrolina, 22 a 25 de março de 2004.

LIMA, Y. C. P.; LIMA NETO, I. E.; ARAUJO, J. C. **Análise Ex-Post do Assoreamento de um Pequeno Reservatório: Estudo de Caso Açude Boqueirão, Aiuaba, Ceará**. In Anais: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 2010.

LIMA, R. T.; SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; LIMA, M. J. A. Modelos para estimativa da área foliar da mangueira utilizando medidas lineares. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 4, p. 974-980, 2012. DOI: 10.5327/Z1982-8470201500012134

LIMA FILHO, J. M. P.. Gas exchange of the umbu tree under semi-arid conditions. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 206-208, Aug. 2004. DOI: 10.1590/S0100-29452004000200006.

LIU, C., LI, Y., GAO, W., SHI, R., BAI, K. Retrieval of columnar water vapor using multispectral radiometer measurements over northern china. **J. Appl. Remote Sens.** 0001;5(1):053558-053558-12.2011. DOI:10.1117/1.3647483.

LOPES, C.M.; ANDRADE, I.; PEDROSO, V.; MARTINS, S. Modelos empíricos para estimativa da área foliar da videira na casta Jaen. **Ciência e Técnica Vitivinícola**, Dois Portos, v.19, n.2, p.61-75, 2004.

LU, P., URBAN, L., ZHAO, P. Granier’s thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. **Acta Bot. Sin.** 46, 631–646. 2004.

LUBCZYNSKI, M. W.; CHAVARRO-RINCON, D. C.; ROSSITER, D. G.. Conductive sapwood area prediction from stem and canopy areas—allometric equations of Kalahari trees, Botswana. **Ecohydrology**. 10: e1856. 2017. DOI: 10.1002/ECO.1856.

MAIA, G.N. Catingueira. In: MAIA, G.N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 197 São Paulo: Leitura e Arte. p.159-165.2004.

MALAVASI, U. C.; DAVIS, A. S.; MALAVASI, M.de M.. Estimating Water in Living Woody Stems - A Review. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 4, p. 415-422, Dec. 2016. DOI: 10.1590/01047760201622032169.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Ann. Math. Statist.** 18, 50-60. 1947.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; MELLO, L. T. A. Uso dos Métodos de Krigagem e Spline de Tensão no Mapeamento de Chuvas na Região Metropolitana de Goiânia e Seu Entorno. **II Simpósio Internacional Caminhos Atuais da Cartografia na Geografia**. São Paulo: EDUSP. p. 128-128.2010.

MARENCO, R. A., ANTEZANA-VERA, S. A., GOUVÊA, P. R. DOS S., CAMARGO, M. A. B., OLIVEIRA, M. F. de, SANTOS, J. K. da S.. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 61, supl. p. 786-799, Dec. 2014. DOI: 10.1590/0034-737X201461000004.

MCDOWELL, N., POCKMAN, W. T., ALLEN, C. D., BRESHEARS, D. D., COBB, N., KOLB, T.; PLAUT, J.; SPERRY, J.; WEST, A.; WILLIAMS, D. G.; YEPEZ, E. A.. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? **New Phytol.** 178, 719–739, 2008. DOI: 10.1111/J.1469-8137.2008.02436.X

MEDEIROS, P.H.A., De ARAÚJO, J.C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils and Sediments**. 14 (7), pp. 1216-1223.2014. DOI: 10.1007/S11368-013-0809-9.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba,CE**. 2002. 120p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MEINZER, F.C.; GOLDSTEIN, G.; FRANCO, A.C.; BUSTAMANTE, M.; INGLER, E.; JACKSON, P.; CALDAS, L.; RUNDEL, P.W. Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species. **Functional Ecology**, v. 13, p. 273-282, 1999.

MEINZER, F. C.; JOHNSON, D. M.; LACHENBRUCH, B.; MCCULLOH, K. A.; WOODRUFF, D. R. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. **Functional Ecology**. 23:922-930. 2009. DOI: 10.1111/J.1365-2435.2009.01577.X

MITCHELL, P. J., VENEKLAAS, E., LAMBERS, H., BURGESS, S. S. O.. Partitioning of evapotranspiration in a semi-arid eucalypt woodland in south-western Australia. **Agric For Meteorol.** 149:25–37.2009.

MONTEIRO, J.E.B.A., SENTELHA, P. C., CHIAVEGATO, E. J., GUISELINI, C., SANTIAGO, A. V. & PRELA, A. Estimação da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, 64(01): 15-24.2005.

MOORE, G.W., OROZCO, G., APARECIDO, L.M.T., MILLER, G.R.. Upscaling transpiration in diverse forests: insights from a tropical premontane site. **Ecohydrology**. 2018;11:e1920. doi: 10.1002/eco.1920.

MORAIS, M. FONSECA DE. **Estimativa do Balanço Hídrico na Bacia Experimental / Representativa de Santa Maria / Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ.** 2007. 251f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MOREIRA, JOSÉ SIMÕES. **Notas de aula de PME 2361 – Processos de Transferência de Calor.** Disponível em <<http://sites.poli.usp.br/pme/sisea/>> Acessado em 20 de março de 2017.

NADEZHDINA, N.; ČERMÁK, J.; NADEZHDINA, V. Heat field deformation method for sap flow measurements. In: ČERMÁK J. & NADEZHDINA, N. (eds.). Measuring sap flow in intact plants. Proceedings of 4th International Workshop, Židlochovice, Czech Republic, IUFRO Publ. Brno, Czech Republic: Mendel University. p. 72–92, 1998.

NADEZHDINA, N., DAVID, T. S., DAVID, J. S., FERREIRA, M. I., DOHNAL, M., TESAŘ, M., GARTNER, K., LEITGEB, E., NADEZHDIN, V., CERMAK, J., JIMENEZ, M. S., MORALES, D. Trees never rest: the multiple facets of hydraulic redistribution. **Ecohydrol.**, 3: 431–444. 2010. DOI: 10.1002/ECO.148.

NADEZHDINA N., CERMAK J., CEULEMANS R.. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. **Tree Physiology**22(13): 907–918. 2012. DOI:10.1093/TREEPHYS/22.13.907.

NAITHANI KJ, EWERS BE, PENDALL E. Sap flux-scaled transpiration and stomatal conductance response to soil and atmospheric drought in a semi-arid sagebrush ecosystem. **J Hydro.** 464–465: 176–185.2012. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2012.07.008.

NAVES-BARBIERO, C. C., FRANCO, A. C., BUCCI, S. J., GOLDSTEIN, G. **Fluxo de Seiva e Condutância Estomática de Duas Espécies Lenhosas Sempre-Verdes no Campo Sujo e Cerradão.** R. Bras. Fisiol. Veg., 12(2):119-134, 2000.

NEVES, A. L. R.; LACERDA, C. F.; ALVES, M. P.; SOUSA, C. H. C.; GOMES FILHO, E. . Leaf gas exchange and nutrients accumulation in cowpea plants under different management strategies with brackish water. **Irriga** (UNESP. CD-ROM), v. 22, p. 129-139. DOI: 10.15809/IRRIGA.2017V22N1P129-139. 2017.

NOBREGA, RANYÉRE SILVA. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP. **Rev. bras. meteorol.**

[online]. vol.29, n.spe, pp. 111-120. ISSN 0102-7786. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130024.2017>.

NOBEL PS. **Physicochemical and environmental plant physiology**, 4th edn. Oxford, UK: Academic Press.2009.

OLIVEIRA, L. S.; CRUZ, M. L. B. DA. Vetores de Pressão sobre a Unidade de Conservação de Proteção Integral: A Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol.07, n.06, 1126-1132. 2014. DOI: 10.26848/RBGF.V7I6.814

OREN, R.; PATAKI, D.. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests. **Oecologia** 127: 549. 2001. DOI: 10.1007/S004420000622.

OUYANG, L.; ZHAO, P.; ZHOU, G., et al. Stand-scale transpiration of a *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* plantation and its potential hydrological implication. **Ecology**. e1938. 2018. DOI: 10.1002/ECO.1938.

PAIVA, A.S.; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J.D.; TURCO, J.R.P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.161-169, 2005. DOI: 10.1590/S0100-69162005000100018

PAMPONET, A. J. M., AMORIM, M. S., ANDRADE, T. P. COELHO, E.F., SILVA, A. C. P. Produtividade da bananeira cv. prata anã no terceiro ciclo submetido a diferentes lâminas de irrigação e densidades de plantas. **Congresso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola e XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola CLIA/CONBEA 2012**. Londrina - PR, Brasil, 15 a 19 de julho 2012.

PARENTE, H.N.. **Avaliação da vegetação e do solo em áreas de Caatinga sob pastejo caprino no cariri da Paraíba** [tese]. Areia: Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba; 2009.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N, DÍAZ S, GARNIER E, et. al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**; 61:137–234, 2013.

PEREIRA, K. M. C. **Representação da arquitetura de copa de indivíduos jovens de *Poincianella pyramidalis* (TUL) L. P. Queiroz (Caatingueira) espécie da Caatinga brasileira**. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas)- Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

PFAUTSCH, S., KEITEL, C., TURNBULL, T., BRAIMBRIDGE, M.J., WRIGHT, T.E., SIMPSON, R.R., O'BRIEN, J.A., ADAMS, M.A.. Diurnal patterns of water use in *Eucalyptus victrix* indicate pronounced desiccation–rehydration cycles despite unlimited water supply.. **Tree Physiol.** 31:1041–1051. 2011.

PHILLIPS, N. G., LEWIS, J. D., LOGAN, B., TISSUE, D. T.. Inter- and intra-specific variation in nocturnal water transport in *Eucalyptus*, **Tree Physiol.** vol. 30 (pg. 586-596). 2010.

PINHEIRO, E. A. R.; COSTA, C. A.G.; De ARAÚJO, J. C. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**, v. 89, p. 1-4, 2013. DOI: 10.1016/J.JARIDENV.2012.10.003

PINHEIRO, E. A. R.; METSELAAR, K.; VAN LIER, Q. de J.; De ARAÚJO, J. C. Importance of soil-water to the Caatinga biome, Brazil. **Ecohydrology**, v. 9, n. 7, p. 1313-1327, 2016. DOI: 10.1002/ECO.1728

PINTO JR., O. B.; VOURLITIS, G. L.; SANCHES, L.; DALMAGRO, H. J.; LOBO, F. A.; NOGUEIRA, J. S. Transpiração pelo método da sonda de dissipação térmica em floresta de transição amazônica-cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.3, p.268-274, 2013.

RAZALI, N.M., WAH, Y.B. Power comparison of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modelling and Analytics**, Vo.2, No 1, 21–33. 2011.

REYES-ACOSTA, J. L., VANDEGEHUCHTE, W., STEPPE, K., LUBCZYNSKI, M. 214 W.. Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients 215 in sap flow measurements. Part 2. Laboratory validation. **Tree physiology** [0829-318X] yr: 216 vol: 32 iss: 7 pg: 913 – 929. 2012. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPS042. 217 218

REYES-ACOSTA, J.L., LUBCZYNSKI, M.W. Optimization of dry-season sap flow 219 measurements in an oak semi-arid open woodland in Spain. **Ecohydrology**, 2014, 7, 2, 258–220 277. DOI: 10.1002/ECO.1339.

RICHARDS, J. H., CALDWELL, M. M., Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. **Oecologia** 73, 486–489 1987. DOI: 10.1007/BF00379405

RIBEIRO, B. D.; BARRETO, D. W.; COELHO, M. A. Z.. Recovery of Saponins from *Jua* (*Ziziphus joazeiro*) by Micellar Extraction and Cloud Point Preconcentration. **Journal of Surfactants and Detergents**. 17: 553. 2014. DOI: 10.1007/S11743-013-1526-5.

RODRIGUES, H. J. B., COSTA, R. F.da, RIBEIRO, J. B. M., SOUZA FILHO, J. D.da C., RUIVO, M.de L. P., SILVA JÚNIOR, J.de A.. Variabilidade sazonal da condutância estomática em um ecossistema de manguezal amazônico e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 26(2), 189-196. 2011. DOI: 10.1590/S0102-77862011000200003.

ROSADO, B. H. P., OLIVEIRA. R. S., JOLY, C. A., AIDAR, M. P. M., BURGESS, S. S. O.. Diversity in nighttime transpiration behavior of woody species of the Atlantic Rain Forest, Brazil. 2012. **Agric For Meteorol.** 158–159:13–20.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tokyo, v.39, p.9-17, 1981.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant physiology**. 4.ed. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1992. 682p.

SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. Adaptive strategies of woody species in neotropical savanas. **Biological Review**, v.60, p.315-355, 1985.

SBRISSIA, A. F.; SILVA, S. C. DA.. Comparação de três métodos para estimativa do índice de área foliar em pastos de capim-marandu sob lotação contínua. **R. Bras. Zootec.** Viçosa, v. 37, n. 2, p. 212-220, 2008. DOI: 10.1590/S1516-35982008000200006

SCHMID B, THOME KJ, DEMOULIN P, PETER R, MATZLER C, SEKLER J. Comparison of modeled and empirical approaches for retrieving columnar water vapor from solar transmittance measurements in the 0.94 mm region. **J. Geophys. Res.** 101: 9345–9358. 1996.

SCHOLZ, F. G., BUCCI, S. J., GOLDSTEIN, G., MEINZER, F. C., FRANCO, A. C.; Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees. **Tree Physiol.** 22 (9): 603-612.2002. DOI: 10.1093/TREEPHYS/22.9.603

SCHOLZ, F. G., BUCCI, S. J., GOLDSTEIN, G., MOREIRA, M. Z., MEINZER, F. C., DOMEQ, J.-C., VILLALOBOS-VEGA, R., FRANCO, A. C., MIRALLES-WILHELM, F.. Biophysical and life-history determinants of hydraulic lift in Neotropical savanna trees. **Functional Ecology**, 22: 773–786. 2008, DOI: 10.1111/J.1365-2435.2008.01452.X

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit Hídrico e os Processos Morfológicos e Fisiológicos das Plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294.1998.

SANTOS J.C.N., ANDRADE E.M., GUERREIRO M.J.S., MEDEIROS P.H.A., PALÁCIO H.A.Q., ARAÚJO NETO J.R. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **J Hydrol** 541(Part B):1057–1066.2016. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2016.08.016

SANZ-SÁEZ, Á; KOESTER, R. P.; ROSENTHAL, D. M.; MONTES, C. M.; ORT, D. R.; AINSWORTH, E. A.. Leaf and canopy scale drivers of genotypic variation in soybean response to elevated carbon dioxide concentration. **Glob Change Biol.** 2017; 23:3908–3920. DOI: 10.1111/GCB.13678

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, Great Britain, v. 52, n. 3, p. 591-611.1965.

SIDDIQ, Z.; CAO, K-F.. Nocturnal transpiration in 18 broadleaf timber species under a tropical seasonal climate, **Forest Ecology and Management**, 2017, ISSN 0378-1127, DOI: 10.1016/J.FORECO.2017.12.043.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; SILVA JÚNIOR, V. P.. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, n.2, p.293-303, 2015. DOI:10.5039/AGRARIA.V10I2A4219.

SILVA, MARCELO GABETTO E. **Desenvolvimento de Sensor de Fluxo de Seiva e de Coeficiente Indicador de Estresse Hídrico para Plantas de Cafeeiro Arábica.** 102 f. Tese

(Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes, 2008.

SILVA, E.C., NOGUEIRA RJMC, AZEVEDO NETO AD, BRITO JZ, CABRAL, EL. Aspectos ecofisiológicos de dez espécies em uma área de Caatinga no município de Cabaceiras, Paraíba, Brasil. **Iheringia Ser. Bot.** Porto Alegre, v. 59, n. 2, p. 201-205, 2004.

SILVA, S. F., CABANEZ, P. A., MENDONÇA, R. F., PEREIRA, L. R., DO AMARAL, J. A. T. Modelos alométricos para estimativa da área foliar de mangueira pelo método não destrutivo. **Revista Agro@mbiente On-Line**, 9(1), 86-90. 2015. DOI: 10.18227/1982-8470RAGRO.V9I1.2134

SILVA, P.F.; LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R. SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M.; Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil, **Journal of Arid Environments**, V. 147, Pages 71-82, ISSN 0140-1963, 2017. DOI: 10.1016/J.JARIDENV.2017.09.003.

SILVA, V. P. R., On climate variability in North east of Brazil. **J. Arid Environ.** 58 (4), 575–596.2004. DOI: 10.1016/J.JARIDENV.2003.12.002

SNYDER, K. A., RICHARDS, J. H., DONOVAN, L. A.. Night-time conductance in C3 and C4 species: do plants lose water at night?, **J. Exp. Bot.** Vol. 54 (pg. 861-865).2003. DOI: 10.1093/JXB/ERG082

SMITH, D.M., JACKSON, N.A., ROBERTS, J.M., ONG, C.K. Reverse flow of sap in tree roots and downward siphoning of water by *Grevillea robusta*. **Funct. Ecol.** 13:256–264.1999.

STEPPE, K., VANDEGEHUCHTE, M. W., TOGNETTI, R., MENCUCCINI, M.; Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning. **Tree Physiol.** 35 (4): 341-345.2015. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPV033

STEPPE, K., DE PAUW, D. J. W., DOODY, T. M., TESKEY, R. O.. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods, **Agric. For. Meteorol.** Vol. 150 (pg. 1046-1056). 2010. DOI: 10.1016/J.AGRFORMET.2010.04.004

SUN, H., AUBREY, D.P. & TESKEY, R.O. A simple calibration improved the accuracy of the thermal dissipation technique for sap flow measurements in juvenile trees of six species. **Trees.** 26: 631.2012. DOI: 10.1007/S00468-011-0631-1.

TATARINOV, F.; KUCERA, J.; CIENCIALA, E. The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. **Measurement Science Technology**, v.16, p.1157- 1169, 2005.

TEXEIRA, LÉA MORAES NUNES. 2018. **Evapotranspiração em Vegetação Natural do Bioma Caatinga Obtida por Balanço Hídrico no Solo e por Sensoriamento Remoto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

THIMONIER, A.; SEDIVY, I.; SCHLEPPI, P.. Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. **Eur. J. For. Res.** 129: 543-562.2010. DOI:10.1007/S10342-009-0353-8

TILLESSE, FRANCISCO ESMAYLE ALVES de. 2017. **Potencial de Armazenamento de Água no Caule de Plantas do Bioma Caatinga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

TYREE, M. T., VARGAS, G., ENGELBRECHT, B. M. J., KURSAR, T. A. Drought until death do us part: a case study of the desiccation-tolerance of a tropical moist forest seedling-tree, *Licania platypus* (Hemsl.) Fritsch. **Journal of Experimental Botany** 53: 2239–2247.2002.

UNGAR, E. D., ROTENBERG, E., RAS YASEEF, N., COHEN, S., YAKIR, D., SCHILLER, G. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: implications for forest management. **Forest Ecology and Management**.298:39-51. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.03.003. 2013.

URLI, M.; PORTÉ, A. J.; COCHARD, H.; GUENGANT, Y.; BURLETT, R.; DELZON, S.. Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees, **Tree Physiology**. Volume 33, Issue 7, 1 July 2013, Pages 672–683, 2013. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPT030.

VELLAME, L. M. **Transpiração em plantas de laranja e manga utilizando sonda de dissipação térmica e balanço de calor**. 2007. 67p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Centro de ciências agrárias, ambientais e biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2007.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S.. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.5, p.516-523, 2009.

VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A.; PAZ, V.P.S.; COELHO, E.F. Gradientes térmicos naturais na estimativa do fluxo de seiva pelo método Granier. **Revista Caatinga**, v.24, p.116-122, 2011.

VIANELLO, R.L. & ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, Imprensa Universitária, 449 p.1991.

WANG, D., WANG, L.. Dynamics of evapotranspiration partitioning for apple trees of different ages in a semiarid region of northwest China. **Agricultural Water Management** 191,1–15. 2017. DOI: 10.1016/J.AGWAT.2017.05.010

WANG, X. P.; ZHANG, Y. F.; HUA, R.; PAN, Y. X.; BERNDTSSON, R.. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China. **J Hydro**. 454–455: 152–159. 2012. DOI: 10.1016/J.JHYDROL.2012.06.003.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between

years. **Annals of Botany**, v.11, p.41-76, 1947. DOI: 10.1093/OXFORDJOURNALS.AOB.A083148

WARREN, R. K.; PAPPAS, C.; HELBIG, M.; CHASMER, L. E.; BERG, A. A.; BALTZER, J. L.; QUINTON, W. L.; SONNENTAG, O.. Minor contribution of overstory transpiration to landscape evapotranspiration in boreal permafrost peatlands. **Ecohydrology**. 2018;e1975. DOI: 10.1002/ECO.1975.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A.; MACHADO, R. E.. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/Landsat. **Eng. Agríc.**, Botucatu , v. 24, n. 2, p. 421-430, 2004. DOI: 10.1590/S0100-69162004000200022

ZANINE, A. M.; SANTOS, E. M.; FERREIRA, D. J.; ALMEIDA, J. C. C.; MACEDO JUNIOR, G. L. & OLIVEIRA, J. S. 2005. Composição bromatológica de leguminosas do semiárido brasileiro. **Livestock Research for Development**, 17(8): 1-5.2005.

ZEPPEL, M. J. B., TISSUE, D., TAYLOR, D. T., MACINNIS-NG, C., EAMUS, D.. Rates of nocturnal transpiration in two evergreen temperate woodland species with differing water-use strategies. **Tree Physiol.** 30:988-1000.2010.

ZEPPEL, M. J. B., LEWIS, J. D., PHILLIPS, N. G., TISSUE, D. T. Consequences of nocturnal water loss: A synthesis of regulating factors and implications for capacitance, embolism and use in models. **Tree Physiology**, 34, 1047–1055. 2014. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPU089.

ZHA, T., QIAN, D., JIA, X., BAI, Y., TIAN, Y., BOURQUE, C. P.-A., MA, J., FENG, W., WU, B., PELTOLA, H.: Soil moisture control of sap-flow response to biophysical factors in a desert-shrub species, *Artemisia ordosica*. **Biogeosciences**, 14, 4533-4544, 2017. DOI: 10.5194/BG-14-4533-2017.

ZHANG, J-G.; GUAN, J-H.;SHI, W-Y.; YAMANAKA, N.; DU S. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semiarid black locust plantation, Loess Plateau, China. **Ecohydrology**8(1): 137–147. 2015. DOI:10.1002/ECO.1495.

ZHANG H, WEI W, CHEN L, YANG L. Evaluating canopy transpiration and water use of two typical planted tree species in the dryland Loess Plateau of China. **Ecohydrology**. 10:e1830. 2017. DOI: 10.1002/ECO.1830.

ZHAO, W., LIU, B. The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China. **Agricultural and forest meteorology**, 150, 1297–1306. 2010. DOI: 10.1016/J.AGRFORMET.2010.05.012.

ZHENG, C.;WANG, Q.(2015)Seasonal and annual variation in transpiration of a dominant desert species,*Haloxylon ammodendron*, in Central Asia up-scaled from sap flow measurement.**Ecohydrolog.**,8:948–960. DOI:10.1002/ECO.1547. 2015.

ZHU, L., HU, Y., ZHAO, X., ZENG, X., ZHAO, P., ZHANG, Z., JU, Y.. The impact of drought on sap flow of cooccurring *Liquidambar formosana Hance* and *Quercus variabilis Blume* in a temperate forest, Central China. **Ecohydrology**. 1828.2017 DOI: 10.1002/ECO.1828.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados, através da análise das variáveis medidas na Bacia Experimental de Aiuaba, fornecem elementos importantes sobre o início do escoamento superficial em microbacias semiáridas de escoamento efêmero, servindo de base para guiar pesquisas futuras com enfoque sobre esse tema, ou servir de auxílio para outros temas ligados à hidrologia de regiões semiáridas.

A medição do fluxo de seiva em espécies do bioma Caatinga apresentou resultados inéditos e importantes para o entendimento do processo de deslocamento da água no sistema solo-planta-atmosfera em espécies deste bioma. Mas, devido as dificuldades encontradas e a um período de tempo curto (apenas 02 anos) no monitoramento, corroboraram com a necessidade e importância da continuidade nas medições de fluxo de seiva em condições semiáridas, pois o recurso hídrico é escasso e pequenos volumes podem representar um percentual significativo do todo. A compreensão do processo de transpiração em florestas tropicais sazonalmente secas se torna relevantes para estudos futuros.

As recomendações desta pesquisa são: (i) monitoramento do fluxo de seiva reverso (negativo) e/ou redistribuição hidráulica na Bacia Experimental de Aiuaba, não foi possível ser avaliado pelo método usado nesta pesquisa. (ii) investigar a transpiração noturna, uma vez que pode representar valores importante da total diário transpirado pela plantas.

## REFERENCIAS

- ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V.; LANDSBERG, J. J.; REZENDE, G.D. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology Management**, Amsterdam, v.251, p.10-21, 2007. doi: 10.1016/j.foreco.2007.06.009.
- ALMEIDA, CICERO LIMA de. **Relações solo-planta-atmosfera em caatinga preservada: o caso da Bacia Experimental de Aiuaba**. 2016. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- ALVES, E. U., CARDOSO, E. DE A., BRUNO, R. DE L. A., ALVES, A. U., ALVES, A. U., GALINDO, E. A., BRAGA JUNIOR, J. M.. Superação da dormência em sementes de *Caesalpinia pyramidalis* Tul.**Rev. Árvore**[online]. Vol.31, n.3, pp. 405-415. 2007. ISSN 1806-9088. Doi: 10.1590/S0100-67622007000300006.
- ALVES, T. B. C., ALVES, G. H., RIBEIRO, H. B., MARTINS NETO, L.. Verificação Termográfica da Distribuição da Corrente Elétrica No Linor de um Motor Linear. In: **XIV CEEL - Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. Anais**. Universidade Federal de Uberlândia - UFU Uberlândia, Minas Gerais, 2016.
- AMOOZEGAR A.. A compact, constant-head permeameter for measuring saturated hydraulic conductivity of the vadose zone. **Soil Science Society of America Journal**. 53: 1356–1361. 1989a. doi: 10.2136/sssaj1989.03615995005300050009x.
- AMOOZEGAR A.. Comparison of the Glover solution with the simultaneous-equations approach for measuring hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**. 53: 1362–1367. 1989b. doi: 10.2136/sssaj1989.03615995005300050010x.
- ANDRADE, D. E.; ARAÚJO NETO, J. R.; PALÁCIO H. A. Q.; RODRIGUES J. O.; SANTOS, J. C. N. Escoamento superficial versus manejo da vegetação em microbacias do semiárido. In: **I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS NATURAIS DO SEMIÁRIDO**, 2013, Iguatu. Anais... Fortaleza: MASSA, 2013. p. 1-7.
- APARECIDO, L. M. T., MILLER, G. R., CAHILL, A. T., MOORE, G. W. Comparison of tree transpiration under wet and dry canopy conditions in a Costa Rican premontane tropical forest, **Hydrol. Process**.30: 5000–5011.2010. doi: 10.1002/HYP.10960.
- ARAÚJO, B. DE A., SILVA, M.C.B DA, MOREIRA, F.J.C., SILVA, K. DA F., TAVARES, M. K. DAS N.. Caracterização biométrica de frutos e sementes, química e rendimento de polpa de juazeiro (*Ziziphus joazeiro* Mart.). **ACSA - Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 11, n. 2, p. 15-21, Abr - Jun, 2015. ISSN 1808-6845.
- ARAÚJO, L. C. M. de. **Análise da Susceptibilidade à Erosão dos Solos da Estação Ecológica de Aiuaba/CE**. Dissertação de Mestrado. UFC. Departamento de Geologia. 119p, 2005.
- BARROS, ILEANE OLIVEIRA; SOARES, ARLETE APARECIDA. Adaptações anatômicas em folhas de marmeleiro e velame da Caatinga brasileira.**Rev. Ciênc. Agron.**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 192-198, Mar. 2013. DOI: 10.1590/S1806-66902013000100024.

BAUERLE, T. L., RICHARDS, J. H., SMART, D. R., EISSENSTAT, D. M. (2008), Importance of internal hydraulic redistribution for prolonging the lifespan of roots in dry soil. **Plant, Cell & Environment**, 31: 177–186.2008. DOI: 10.1111/J.1365-3040.2007.01749.X.

BELO, P. S. C.. 2007. **Contribuição ao zoneamento da zona de amortecimento de uma unidade de conservação**: estudo de caso ESEC Aiuaba, Ce. Dissertação de Mestrado. PRODEMA – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2007.

BELTRAME, A. V. **Diagnóstico do meio físico de bacias hidrográficas: modelo e aplicação**. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1994. 112 p.

BONELL M, GILMOUR DA.. The development of overland flow in a tropical rainforest catchment. **Journal of Hydrology** 39: 365–382, 1978. doi:10.1016/0022-1694(78)90012-4.

BORSATO, F. H. & MARTONI, A. M. Estudo da fisiografia das bacias hidrográficas urbanas no Município de Maringá, Estado do Paraná. **Acta Scientiarum**. Human and Social Sciences Maringá, v. 26, n. 2, p. 273-285, 2004. doi: 10.4025/actascihumansoc.v26i2.1391.

BRAGA JUNIOR, B. P.; CONEJO, J. G. L. Simulação digital do ciclo hidrológico através do “Stanford Watershed Model IV”. In: **Hidrologia dinâmica**: curso de engenharia hidrológica. São Paulo: EPUSP/DAEE/ABRH, 1983. p. B1-B23. vol. 1.

BRODRIBB, T. J., COCHARD, H. Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. **Plant Physiol**. 149, 575–584 .2009. DOI: 10.1104/PP.108.129783.

BUCCI, S. J.; SHOLZ, F. G.; GOLDSTEIN, G.; HOFFMANN, W. A.; MEINZER, F. C.; FRANCO, A. C.; GIAMBELLUCA, T.; WILHELM, F. M. Controls on stand transpiration and soil water utilization along a tree density gradient in a Neotropical savanna. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.839-849, 2008. doi: 10.1016/J.AGRFORMET.2007.11.013.

BURGESS, S. S. O., PATE, J. S., ADAMS, M. A., DAWSON, T. E.. 2000. Seasonal water acquisition and redistribution in the Australian woody phreatophyte *Banksia prionotes*. **Ann. Bot.** 85:215–224.2000. DOI: 10.1006/ANBO.1999.1019.

BUSH SE, HULTINE KR, SPERRY JS, EHLERINGER JR. Calibration of thermal dissipation of sap flow probes for ring and diffuse porous trees. **Tree Physiology**30: 1545-1554. 2010. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPQ096.

CABIBEL, B.; DO, F. Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres: I. Analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieurs. **Agronomie**, Paris, v.11, p.669-78. 1991.

CAIRD, M.A., RICHARDS, J.H., DONOVAN, L.A. Nighttime Stomatal Conductance and Transpiration in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> Plants. **Plant Physiology**Jan 2007, 143 (1) 4-10; DOI: 10.1104/PP.106.092940.

CALIXTO JÚNIOR, J. T. **Análise estrutural de duas fitofisionomias de caatinga em diferentes em diferentes estados de conservação no semiárido pernambucano.** 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, Patos, Paraíba, 2009.

CARVALHO, N. O. **Hidrosedimentologia prática.** CPRM, Rio de Janeiro, 2000, 372p.

CARVALHO, P. M. R. **Juazeiro - Ziziphus joazeiro.** Colombo, PR, Embrapa, 8p. (Comunicado Técnico, 139) 2007.

CARVALHO, R. G. de. As Bacias Hidrográficas Enquanto Unidades de Planejamento e Zoneamento Ambiental no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, n.36, Volume Especial, p. 26-43, 2014.

CARVALHO, T. R. A. **Índice de área foliar em Caatinga preservada: avaliação in-situ e através da resposta espectral da vegetação.** 2016. 81f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

CERMÁK, J.; DEML, M.; PENKA, M. A new method of sap flow rate determination in trees. **Biol. Plant. (Praha)** n.15, p. 171– 178, 1973.

CERQUEIRA JUNIOR, J. G.; FERNANDEZ, J. H.; HOELZEMANN, J. J.; LEME, N. M. P.; SOUSA, C. T.. Estudo da Variabilidade da Coluna de Água Precipitável (PWC) no Semiárido Brasileiro para Calibração de Fotômetro Solar. **HOLOS**, [S.l.], v. 4, p. 298-316, ago. 2014. ISSN 1807-1600. DOI: 10.15628/HOLOS.2014.2065.

CHAPPELL NA, SHERLOCK MD.. Contrasting flow pathways within tropical forest slopes of Ultisol soils. **Earth Surface Processes and Landforms**. 30: 735–753. 2005. doi:10.1002/esp.1173.

CHEN, L. X., ZHANG, Z. Q., ZHA, T. G., MO, K. L., ZHANG, Y., & FANG, X. R. Soil water affects transpiration response to rainfall and vapor pressure deficit in poplar plantation. **New Forest**, 45, 235–250. 2014b DOI: 10.1007/S11056-014-9405-0.

CHEN, L., ZHANG, Z., ZEPPEL, M., LIU, C., GUO, J., ZHU, J., ZHA, T. Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semiarid plantation. **Int J Biometeorol**, 58, 1569–1581. 2014a DOI: 10.1007/S00484-013-0761-9.

CHORLEY, R. J.: **The hillslope hydrologic cycle, in: Hillslope Hydrology.** ed: Kirkby, M. J., J. Wiley & Sons, Chichester, Pg. 1–42, 1978.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology.** McGRAWHILL International Editions: Civil Engineering Series. 1988. 572 p.

CLEARWATER MJ, MEINZER FC, ANDRADE JL, GOLDSTEIN G, HOLBROOK NM. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. **Tree Physiology** 19: 681-687. 1999. DOI: 10.1093/TREEPHYS/19.10.681.

COELHO, R. D., VELLAME, L. M., & FRAGA JÚNIOR, E. F. Estimation of transpiration of the 'Valencia' orange young plant using thermal dissipation probe method. **Engenharia Agrícola**, vol. 32(3), pg. 573-581. 2012.

COLLARES, E. G. **Avaliação de alterações em redes de drenagem de microbacias como subsídios ao zoneamento geoambiental de bacias hidrográficas: aplicação na bacia hidrográfica do Rio Capivari – SP**. 2000. 193 f. Tese (Doutorado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP. 2000.

COSTA, A. C. **Hidrologia em uma Bacia Experimental em Caatinga Conservada no Semi-árido Brasileiro**. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE. 2007.

COSTA, C. A. G. **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de Caatinga preservada**. 2012. 188 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2012.

COSTA, C. A. G.; COSTA, A. C.; TEIXEIRA, A. dos S.; ALVES, N. N. de L.; ANDRADE, E. M. de; SOUSA, B. F. S.; LEÃO, A. de O. **Comparação do uso do SRTM para delimitação e caracterização fisiográfica de uma microbacia hidrográfica**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIII, Florianópolis. Anais eletrônicos. Florianópolis: INPE, 2007.

COSTA, C. A. G.; LOPES, J. W. B.; PINHEIRO, E.A.R.; De ARAÚJO, J.C.; GOMES FILHO, R. R.. Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga biome. **Rev. Ciênc. Agron.**[online]. 2013, vol.44, n.4, pp. 685-694. ISSN 1806-6690. doi: 10.1590/S1806-66902013000400004.

COSTA, C.A.G.; De ARAÚJO, J.C.; LOPES, J. W. B. ; PINHEIRO, E.A.R.. Permanence of water effectiveness in the root zone of the Caatinga biome. **Revista Caatinga (Online) JCR**, v. 29, p. 622-699, 2016. doi: 10.1590/1983-21252016v29n320rc.

DALEY, M. J., PHILLIPS, N. G. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest, **Tree Physiol.**, vol. 26 (pg. 411-419) 2006.

DANTAS, F.C.P., TAVARES, M.L.R., TARGINO, M.DA S., COSTA, A.P.DA, DANTAS, F.D.. *Ziziphus joazeiro Mart.* - Rhamnaceae: características biogeoquímicas e importância no bioma Caatinga **Revista Principia**. N. 25, 2014 Pág. 51-57. ISSN 1517-0306.

DAVIS, S. D., EWERS, F. W., SPERRY, J. S., PORTWOOD, K. A., CROCKER, M. C., ADAMS, G. C. Shoot dieback during prolonged drought in *Ceanothus* (Rhamnaceae) chaparral of California: a possible case of hydraulic failure. **American Journal of Botany** 89: 820–828.2002.

De ARAÚJO JC, DÖLL P, GÜNTNER A, KROL M, ABREU CBR, HAUSCHILD M, MENDIONDO EM.. Water scarcity under scenarios for global climate change and regional development in semiarid Northeastern Brazil. **Water International**. 29(2): 209–220. 2004. doi:10.1080/02508060408691770.

De ARAÚJO JC, GÜNTNER A, BRONSTERT A.. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**. 51(1): 157–170. 2006. doi:10.1623/hysj.51.1.157.

De ARAÚJO JC, PIEDRA JIG. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes** 23: 1169 – 1178. 2009. doi: 10.1002/HYP.7232.

De ARAÚJO, J.C., MEDEIROS, P H A.. Impact of Dense Reservoir Networks on Water Resources in Semiarid Environments. **Australasian Journal of Water Resources**, 17:1, 87-100. 2013. doi: 10.7158/13241583.2013.11465422.

De FIGUEIREDO, J. V., De ARAÚJO, J. C., MEDEIROS, P. H. A., COSTA, A. C.. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrol. Process.**, 30: 2390–2400. 2016. doi: 10.1002/hyp.10801.

De FIGUEIREDO, J. V.; de ARAÚJO, J. C.; MEDEIROS, P. H. A.; COSTA, A.C. Runoff 179 initiation in a preserved semiarid caatinga small watershed, Northeastern Brazil. 180 **Hydrological Processes**, 11p, 2016. doi: 10.1002/HYP.10801.

De FIGUEIREDO, J.V. de.. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia semiárida em Caatinga preservada**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado) em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2011.

DELGADO-ROJAS, J. S.; ANGELOCCI, L. R.; FOLEGATTI, M. V.; COELHO FILHO, M. A. Desempenho da sonda de dissipação térmica na medida da transpiração de plantas jovens de lima ácida. **Revista Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.404-413, 2007.

DENG, J.; DING, G.; GAO, G.; WU, B.; ZHANG, Y.; QIN, S.; FAN, W. The Sap Flow Dynamics and Response of *Hedysarum scoparium* to Environmental Factors in Semiarid Northwestern China. **PLoS ONE**. 10(7): e0131683.2015. doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0131683.

DINIZ, M. C. M. M.. **Desenvolvimento e rebrota da cunhã (*Clitoria ternatea* L.) sob estresse hídrico, em associação com fungos micorrízicos-*Bradyrhizobium***. 78f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 1999.

DIOS, VR de, ROY, J, FERRIO, JP, ALDAY, JG, LANDAIS, D, MILCU, A, GESSLER, A. Processes driving nocturnal transpiration and implications for estimating land evapotranspiration. **NatureScientific Reports**. [2045-2322] vol:5 iss:1 pg:10975. DOI: 10.1038/SREP10975. 2015.

DO, F.; ROCHETEAU, A.. Influence of natural temperature gradients on measurements of 183 xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. 184 **Tree Physiology**, 22:641–648. 2012. DOI: 10.1093/TREEPHYS/22.9.649.

DOMBROSKI JLD, PRAXEDES SC, FREITAS RMO, PONTES FM; Water relations of Caatinga trees in the dry season. **S Afr J Bot** 77:430–434. 2011. DOI: 10.1016/J.SAJB.2010.11.001.

- DORONILA, A. I., FORSTER, M. A.. Performance measurement via sap flow monitoring of three Eucalyptus species for mine site and dryland salinity phytoremediation. **Int J Phytorem.**, vol. 17 (pg: 101 -108).2015.
- DU, S., WANG, Y.L., KUME, T., ZHANG, J.G., OTSUKI, K., YAMANAKA, N., LIU, G.B.. Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China. **Agric. For. Meteorol.**, 151, pp. 1–10. 2011.
- DURLO, M.A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**. Santa Maria, v.8, p.55-56, 1998.
- ELAIUY, M. L. C.; SATO, L. M.; VARALLO, A. C. T.; SOUZA, C. F. Desenvolvimento e avaliação de sonda TDR para o manejo racional de água em substratos utilizados na produção de mudas forestais. **Revista Ambi-Agua**, v.4, n.1, 2009. DOI: 10.4136/AMBI-AGUA.77.
- ELLER, C. B., BURGESS, S. S. O., OLIVEIRA, R. S.; Environmental controls in the water use patterns of a tropical cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae). **Tree Physiol**; 35 (4): 387-399.2015. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPV001.
- ELLER, C. B., LIMA, A. L., OLIVEIRA, R. S. Foliar uptake of fog water and transport belowground alleviates drought effects in the cloud forest tree species, *Drimys brasiliensis* (Winteraceae). **New Phytologist** 199: 151–162.2013.
- FARIAS, T. R. L.; ARAUJO, J. C. . **Hidrologia e sedimentologia comparada de pequenas bacias em região tropical sub-úmida no Ceará**. In: IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008, Salvador. Anais do IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2008.
- FERNANDES, D.R.R., ARAÚJO, E.L.. Occurrence of *Zaprionus indianus* Gupta (Diptera: Drosophilidae) In “Juazeiro” Fruits *Ziziphus Joazeiro* Mart. (Rhamnaceae) in the state of Rio Grande Do Norte, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 33 pp. 1356-1358. 2013.
- FFOLLIOTT PF, GOTTFRIED GJ, COHEN Y, SCHILLER G. Transpiration by dryland oaks: studies in the south-western United States and Northern Israel. **J Arid Environ**. 55: 595–605.2003. DOI: 10.1016/S0140-1963(02)00290-2.
- FISHER, J. B., BALDOCCHI, D. D., MISSON, L., DAWSON, T. E., GOLDSTEIN, A. H.. What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two Ameriflux sites in California, **Tree Physiol.**, vol. 27 (pg. 597-610) .2007. doi: 10.1093/TREEPHYS/27.4.597.
- FLEMING, P.M., ANTONINO, A.C.D., PIMENTEL, R.M., LIRA, C.A.B.O., ALVES, G.D., CABRAL, J.J.S.D. Transpiração em plantas de Algaroba (*Prosopis juliflora* (Sw.) DC.) cultivadas no semi-árido nordestino. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8 n.4, pp. 25-30. 2003.
- FORSTER, M. A. How significant is nocturnal sap flow? **Tree Physiol.**, 34:757-765.2014. DOI: 10.1093/TREEPHYS/TPU051.

- FRANCONE, C., PAGANI, V., FOI, M., CAPPELLI, G., CONFALONIERI, R. Comparison of leaf area index estimates by ceptometer and PocketLAI smart app in canopies with different structures. **Field Crops Res.** 2014, 155, 38-41.
- FRISCHKORN, H.; De ARAÚJO, J. C. de; SANTIAGO, M.M.F. **Water resources of Ceará and Piauí.** In: GAISER, T.; KROL, M.; FRISCHKORN, H.; ARAÚJO, J. C.de. Global change and regional impacts. Berlin: Springer - Verlag, p.87-94, 2003.
- FURTUNATO, O. M.. **Simulação Hidrológica na Bacia do Alto Paraíba com efeito da Variabilidade do Clima.** 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2004.
- GAO, J.; ZHOU, J.; SUN, Z.; NIU, J.; ZHOU, C.; GU, D.; ZHAO, P. Suppression of nighttime sap flux with lower stem photosynthesis in Eucalyptus trees. **Int. J. Biometeorol.** 60, 545–556.2016. DOI: 10.1007/S00484-015-1050-6.
- GENTIL, M. S. **Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de Eucalyptus aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia.** Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 65 p. 2010.
- GERMER S, NEILL C, KRUSCHE AV, ELSENBEEER H. Influence of land-use change on near-surface hydrological processes: undisturbed forest to pasture. **Journal of Hydrology.** 380(3-4): 473–480. 2010. doi:10.1016/j. jhydrol.2009.11.022.
- GIUNTI NETO, C. J., HAKAMADA, R. E., OTTO, M. S. G., SILVA, S. R., STAPE, J. L. Calibração de dois métodos indiretos para estimativa do índice de área foliar em plantações de Eucalyptus. **Scientia Forestalis**, volume 43, n. 108 p.919-930, dezembro de 2015 DOI: DX.DOI.ORG/10.18671/SCIFOR.V43N108.16.
- GOLDSMITH, G. R. Changing directions: the atmosphere–plant–soil continuum. **New Phytol**, 199: 4–6. 2013. DOI: 10.1111/NPH.12332.
- GRANIER, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. **Annales des Sciences Forestières** 42:193-200. 1985.
- GRANIER A., BOBAY V., GASH J.H.C., GELPE J., SAUGIER B., SHUTTLEWORTH W. J.. Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest, **Agric. For. Meteorol.** vol. 51 (pg. 309-319) doi:10.1016/0168-1923 (90)90115-M. 1990.
- GRANIER, A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. **Tree Physiol.** 3, 309–319. 1987.
- GRANIER, E.; BERGER, A. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. **Journal of Applied Ecology**, v.23, p.193-209, 1986.
- GREGÓRIO, J. P. C. **Avaliação do regime hídrico na produtividade e qualidade do tomate de indústria.** 52 p. Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre na área de Agricultura Sustentável, na Escola Superior Agrária de Santarém. 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.15/1419>.

GREGORY, K.J., WALLING, D. E.. **Drainage Basin Form and Process**. Edward Arnold, London, 1973, 456p.

GROTTKER, M. Runoff quality from a street with medium traffic loading. **Sci. Total Environ.** v. 59, p. 457-466, 1987. doi: 10.1016/0048-9697(87)90469-4.

HARDOON DR, SZEDMAK S, SHAWE-TAYLOR J.. Canonical Correlation Analysis: an overview with application to learning methods. **Neural Computation** 16(12): 2639–2664. 2004. doi:10.1162/0899766042321814.

HASSLER, S. K.; ZIMMERMANN, B.; VAN BREUGEL, M.; HALL, J. S.; ELSENBEER, H. Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1634–1642, 2011. doi: 10.1016/j.foreco.2010.06.031.

HEATHMAN, G. C.; LAROSE, M.; COSH, M. H.; BINDLISH, R. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA. **Catena**, v.78, p.159-169, 2009.

HÖLTTÄÄ, T., LINKOSALOA, T., RIIKONENA, A., SEVANTOB, S., NIKINMAAA, E. An analysis of Granier sapflow method, its sensitivity to heat storage and a new approach to improve its time dynamics. **Agricultural and Forest Meteorology**. 211–212, 2–12. 2015.

HORNBERGER, G. M.; RAFFENSPERGER, J. P.; WIBERG, P. L.; ESHLEMAN, K. N. **Elements of Physical Hydrology**. J. Hopkins, p. 302, 1998.

HORTON, R. E.. The role of infiltration in the hydrologic cycle. **EOS, Am. Geophys. Union. Trans.**, vol. 14: pg. 446–460. 1933. doi: 10.1029/TR014i001p00446.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol. Soc. Am. Bull.**, v.56, n.3, p.275-370, 1945.

HUANG, J.; ZHOU, Y.; YIN, L.; WENNINGER, J.; ZHANG, J.; HOU, G.; ZHANG, E.; UHLENBROOK, E.. Climatic controls on sap flow dynamics and used water sources of *Salix psammophila* in a semi-arid environment in northwest China. **Environ. Earth Sci.** 73 289–301. 2015. DOI: 10.1007/S12665-014-3505-1.

HUBBARD, R.M.; RYAN, M.G.; GIARDINA, C.P.; BARNARD, H. The effect of fertilization on sap flux and canopy conductance in a *Eucalyptus saligna* experimental forest. **Global Change Biology**, Colorado, v.10, n.4, p.427-36, 2004.

HUBER B. Weitere quantitative Untersuchungen über das Wasserleitungssystem der Pflanzen. **Jahrb Wiss Bot**, 67, 877-959. 1928.

HUBER, B: Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. **Ber. deutsch. Bot. Ges.**, 50, 89-109. 1932

HULTINE, K. R., NAGLER, P. L., MORINO, K., BUSH, S. E., BURTCHE, K. G., DENNISON, P. E., GLENN, E. P., EHLERINGER, J. R.. Sap flux-scaled transpiration by

tamarisk (*Tamarix spp.*) before, during and after episodic defoliation by the saltcedar leaf beetle (*Diorhabda carinulata*), **Agric. For. Meteorol.** vol. 150 (pg. 1467-1475), 2012. DOI: 10.1016/J.AGRFORMET.2010.07.009.

INETI (2009). **Sistema nacional de informação geocientífica** - léxico de termos hidrogeológicos. e-geo.ineti.pt.

ISTOK JD, BOERSMA L.. Effect of antecedent rainfall on runoff during low-intensity rainfall. **Journal of Hydrology** 88: 29–42. 1986. doi:10.1016/0022-1694(86)90098-3.

JANSSON, J. **Rehabilitation in a tropical secondary rain forest in Malaysian Borneo - Early effects of canopy properties on light conditions at the forest floor.** 2015. 40 p. Master of Science in Forestry, Faculty of Forest Sciences, Swedish University of Agricultural Sciences, Borneo, Malásya. ISSN 1654-1898. 2015.

JI, X.; ZHAO, W.; KANG, E.; JIN, B.; XU, S.. (2016) Transpiration from three dominant shrub species in a desert-oasis ecotone of arid regions of Northwestern China, **Hydrol. Process.**, 30: 4841–4854. 2016. DOI: 10.1002/HYP.10937.

JIAO, L., LU, N., SUN, G., WARD, E. J., ANDFU, B. Biophysical controls on canopy transpiration in a black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantation on the semi-arid Loess Plateau, China. **Ecohydrol.** 9:1068–1081.2016. doi:10.1002/ECO.1711.

KUME T., OTSUKI K., DU S., YAMANAKA N., WANG YL., LIU GB. Spatial variation in sap flow velocity in semiarid region trees: its impact on stand-scale transpiration estimates. **Hydrological Processes** 26: 1161–1168.2012. doi: 10.1002/HYP.8205.

KURSAR, T. A.; ENGELBRECHT, B. M. J.; BURKE, A.; TYREE, M. T.; EI OMARI, B.; GIRALDO, J. P.. Tolerance to low leaf water status of tropical tree seedlings is related to drought performance and distribution. **Funct. Ecol.** 23, 93–102. 2009. doi: 10.1111/J.1365-2435.2008.01483.X.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal.** São Carlos: RiMa, 2006. 550 p. 2006.

LEI, Y.; LUBO, G.; HUAXING, B.; QINGKE, Z.; XIAOYAN, W. Spatio-temporal dynamics of soil moisture in silvopastoral system in the Loess Plateau of west Shanxi province. **Procedia Environmental Sciences**, v.8, p.153-160, 2011. doi:10.1016/J.PROENV.2011.10.025.

LEMOS, JESUS RODRIGUES; MEGURO, MARICO. Estudo fitossociológico de uma área de Caatinga na Estação Ecológica (ESEC) de Aiuaba, Ceará, Brasil. **Biotemas**, Florianópolis, v. 28, n. 2, p. 39-50, mar. 2015. ISSN 2175-7925. doi: 10.5007/2175-7925.2015V28N2P39.

LI, S., XIAO, H., ZHAO, L., ZHOU, M., WANG, F.. “Foliar Water Uptake of *Tamarix ramosissima* from an Atmosphere of High Humidity,” **The Scientific World Journal**, vol. 2014, Article ID 529308, 10 pages, 2014. doi: 10.1155/2014/529308.

LIMA ALA, SAMPAIO EVSB, CASTRO CC, RODAL, MJN, ANTONINO ACD, MELO AL.. Do the phenology and functional stem attributes of woody species allow for the

identification of functional groups in the semiarid region of Brazil? **Trees** 26: 1605–1616. 2012. doi: 10.1007/s00468-012-0735-2.

LIMA FILHO, J. M. P. Ecofisiologia de plantas da Caatinga. **XXVII Reunião Nordestina de Botânica**. Petrolina, 22 a 25 de março de 2004.

LIMA FILHO, J. M. P.. Gas exchange of the umbu tree under semi-arid conditions. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 206-208, Aug. 2004. doi: 10.1590/S0100-29452004000200006.

LIMA, R. T.; SOUZA, P. J. O. P.; RODRIGUES, J. C.; LIMA, M. J. A. Modelos para estimativa da área foliar da mangueira utilizando medidas lineares. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 34, n. 4, p. 974-980, 2012. doi: 10.5327/Z1982-8470201500012134.

LIMA, Y. C. P.; LIMA NETO, I. E.; ARAUJO, J. C. **Análise Ex-Post do Assoreamento de um Pequeno Reservatório: Estudo de Caso Açude Boqueirão, Aiuaba, Ceará**. In Anais: IX Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. 2010.

LINACRE ET.. Estimating U.S. Class A pan evaporation from few climate data. **Water International**. 19(1): 5–14. 1994. doi: 10.1080/02508069408686189.

LIU, C., LI, Y., GAO, W., SHI, R., BAI, K. Retrieval of columnar water vapor using multispectral radiometer measurements over northern china. **J. Appl. Remote Sens.** 0001;5(1):053558-053558-12.2011. doi:10.1117/1.3647483.

LOAGUE, K., HEPPNER, C. S., EBEL, B. A., JOEL E. VANDERKWAAK, J. E.. The quixotic search for a comprehensive understanding of hydrologic response at the surface: Horton, Dunne, Dunton, and the role of concept-development simulation. **Hydrological processes**. 2010, vol: 24 iss:17, pg: 2499 – 2505. doi: 10.1002/hyp.7834.

LOPES, C.M.; ANDRADE, I.; PEDROSO, V.; MARTINS, S. Modelos empíricos para estimativa da área foliar da videira na casta Jaen. **Ciência e Técnica Vitivinícola**, Dois Portos, v.19, n.2, p.61-75, 2004.

LOPES, J. W. B.; COSTA, C. A. G.; PINHEIRO, E. A. R.; TOLEDO, C. E.; de ARAÚJO, J. C. Calibração in loco de sensor de umidade do solo sob vegetação de Caatinga preservada. In: Congresso Latino americano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA e Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 9., 39., Vitória. **Apresentações...** Vitória: CONBEA, 2010.

LU, P., URBAN, L., ZHAO, P. Granier's thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. **Acta Bot. Sin.** 46, 631–646. 2004.

LUBCZYNSKI, M. W.; CHAVARRO-RINCON, D. C.; ROSSITER, D. G.. Conductive sapwood area prediction from stem and canopy areas—allometric equations of Kalahari trees, Botswana. **Ecohydrology**. 10: e1856. 2017. doi: 10.1002/ECO.1856.

MAIA, G.N. Catingueira. In: MAIA, G.N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 197 São Paulo: Leitura e Arte. p.159-165.2004.

MALAVASI, U. C.; DAVIS, A. S.; MALAVASI, M.de M.. Estimating Water in Living Woody Stems - A Review. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 4, p. 415-422, Dec. 2016. doi: 10.1590/01047760201622032169.

MAMEDE, G. L.; ARAUJO, N.A.M.; SCHNEIDER, C.M.; ARAUJO, J. C.; HERRMANN, H.J.. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **PNAS**, v. 109, p. 7191-7195, 2012. doi: 10.1073/pnas.1200398109.

MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. **Ann. Math. Statist.** 18, 50-60. 1947.

MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; MELLO, L. T. A. Uso dos Métodos de Krigagem e Spline de Tensão no Mapeamento de Chuvas na Região Metropolitana de Goiânia e Seu Entorno. **II Simpósio Internacional Caminhos Atuais da Cartografia na Geografia**. São Paulo: EDUSP. p. 128-128.2010.

MARENCO, R. A., ANTEZANA-VERA, S. A., GOUVÊA, P. R. DOS S., CAMARGO, M. A. B., OLIVEIRA, M. F. de, SANTOS, J. K. da S.. Fisiologia de espécies florestais da Amazônia: fotossíntese, respiração e relações hídricas. **Rev. Ceres**, Viçosa, v. 61, supl. p. 786-799, Dec. 2014. DOI: 10.1590/0034-737X201461000004.

MCDOWELL, N., POCKMAN, W. T., ALLEN, C. D., BRESHEARS, D. D., COBB, N., KOLB, T.; PLAUT, J.; SPERRY, J.; WEST, A.; WILLIAMS, D. G.; YEPEZ, E. A.. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants survive while others succumb to drought? **New Phytol.** 178, 719–739, 2008. DOI: 10.1111/J.1469-8137.2008.02436.X.

MEDEIROS P.H.A, GÜNTNER A, FRANKE T, MAMEDE GL, De ARAÚJO JC.. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal.** 55: 636–648. 2010. doi: 10.5194/gmdd-1-285-2008.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.** 2002. 120p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MEDEIROS, P.H. A. **Medida e modelagem da interceptação em uma bacia experimental do semiárido.** 2005. 81 f. Dissertação - Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MEDEIROS, P.H.A, De ARAÚJO, J.C., BRONSTERT, A.. Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agronômica.** 40: 165–174. 2009. doi: 10.1590/S0100-69162014000200004.

MEDEIROS, P.H.A., De ARAÚJO, J.C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils and Sediments.** 14 (7), pp. 1216-1223.2014. DOI: 10.1007/S11368-013-0809-9.

MEDEIROS, P.H.A.; De ARAÚJO, J.C. . **Modelagem da interceptação no semi-árido brasileiro: aplicação do modelo de Gash na Bacia Experimental de Aiuaba - CE.** In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa, PB. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005.

MEINZER, F. C.; JOHNSON, D. M.; LACHENBRUCH, B.; MCCULLOH, K. A.; WOODRUFF, D. R. Xylem hydraulic safety margins in woody plants: coordination of stomatal control of xylem tension with hydraulic capacitance. **Functional Ecology**. 23:922-930. 2009. DOI: 10.1111/J.1365-2435.2009.01577.X.

MEINZER, F.C.; GOLDSTEIN, G.; FRANCO, A.C.; BUSTAMANTE, M.; INGLER, E.; JACKSON, P.; CALDAS, L.; RUNDEL, P.W. Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species. **Functional Ecology**, v. 13, p. 273-282, 1999.

MITCHELL, P. J., VENEKLAAS, E., LAMBERS, H., BURGESS, S. S. O.. Partitioning of evapotranspiration in a semi-arid eucalypt woodland in south-western Australia. **Agric For Meteorol.** 149:25–37.2009.

MONTEIRO, J.E.B.A., SENTELHA, P. C., CHIAVEGATO, E. J., GUISELINI, C., SANTIAGO, A. V. & PRELA, A. Estimação da área foliar do algodoeiro por meio de dimensões e massa das folhas. **Bragantia**, 64(01): 15-24.2005.

MOORE, G.W., OROZCO, G., APARECIDO, L.M.T., MILLER, G.R.. Upscaling transpiration in diverse forests: insights from a tropical premontane site. **Ecohydrology**. 2018;11:e1920. doi: 10.1002/eco.1920.

MORAIS, M. FONSECA DE. **Estimativa do Balanço Hídrico na Bacia Experimental / Representativa de Santa Maria / Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ.** 2007. 251f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MORAIS, M. FONSECA de. **Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental / representativa de Santa Maria / Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ.** 2007. 251f. Tese (Doutor em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MOREIRA, JOSÉ SIMÕES. **Notas de aula de PME 2361 – Processos de Transferência de Calor.** Disponível em <<http://sites.poli.usp.br/pme/sisea/>> Acessado em 20 de março de 2017.

MOURA, EULINA M. de, MEDEIROS, VICTOR M. de A. **Diferenças em microescala no regime de precipitação no Nordeste: litoral e semi-árido.** In: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB, 2005.

NADEZHDINA N., CERMAK J., CEULEMANS R.. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. **Tree Physiology**22(13): 907–918. 2012. doi:10.1093/TREEPHYS/22.13.907.

NADEZHDINA, N., DAVID, T. S., DAVID, J. S., FERREIRA, M. I., DOHNAL, M., TESAŘ, M., GARTNER, K., LEITGEB, E., NADEZHDIN, V., CERMAK, J., JIMENEZ, M. S., MORALES, D. Trees never rest: the multiple facets of hydraulic redistribution. **Ecohydrol.**, 3: 431–444. 2010. doi: 10.1002/ECO.148.

NADEZHDINA, N.; ČERMÁK, J.; NADEZHDINA, V. **Heat field deformation method for sap flow measurements**. In: ČERMÁK J. & NADEZHDINA, N. (eds.). Measuring sap flow in intact plants. Proceedings of 4th International Workshop, Židlochovice, Czech Republic, IUFRO Publ. Brno, Czech Republic: Mendel University. p. 72–92, 1998.

NAITHANI KJ, EWERS BE, PENDALL E. Sap flux-scaled transpiration and stomatal conductance response to soil and atmospheric drought in a semi-arid sagebrush ecosystem. **J Hydro.** 464–465: 176–185.2012. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2012.07.008.

NAVARRO HEVIA J, De ARAÚJO JC, MONGIL MJ.. Assessment of 80 years of ancient-badlands restoration in Saldaña, Spain. **Earth Surface Processes and Landforms**. 39(12): 1563–1575. 2014. doi:10.1002/esp.3541.

NAVES-BARBIERO, C. C., FRANCO, A. C., BUCCI, S. J., GOLDSTEIN, G. **Fluxo de Seiva e Condutância Estomática de Duas Espécies Lenhosas Sempre-Verdes no Campo Sujo e Cerradão**. R. Bras. Fisiol. Veg., 12(2):119-134, 2000.

NEVES, A. L. R.; LACERDA, C. F.; ALVES, M. P.; SOUSA, C. H. C.; GOMES FILHO, E. . Leaf gas exchange and nutrients accumulation in cowpea plants under different management strategies with brackish water. **Irriga** (UNESP. CD-ROM), v. 22, p. 129-139. doi: 10.15809/IRRIGA.2017V22N1P129-139. 2017.

NOBEL PS. **Physicochemical and environmental plant physiology**, 4th edn. Oxford, UK: Academic Press.2009.

NOBREGA, R. S.. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo, v. 29, n. spe, p. 111-120, dec. 2014. doi.org/10.1590/0102-778620130024.

NOTO, L.V.; IVANOV, V.Y.; BRAS, R.L.; VIVONI, E.R.. Effects of initialization on response of a fully-distributed hydrologic model. **Journal of Hydrology**. 352(1–2): 107–125. 2008. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.12.031.

OLIVEIRA, L. S.; CRUZ, M. L. B. DA. Vetores de Pressão sobre a Unidade de Conservação de Proteção Integral: A Estação Ecológica de Aiuaba, Ceará, Brasil.**Revista Brasileira de Geografia Física**, vol.07, n.06, 1126-1132. 2014. doi: 10.26848/RBGF.V7I6.814.

OREN, R.; PATAKI, D.. Transpiration in response to variation in microclimate and soil moisture in southeastern deciduous forests. **Oecologia** 127: 549. 2001. doi: 10.1007/S004420000622.

OUYANG, L.; ZHAO, P.; ZHOU, G., et al. Stand-scale transpiration of a Eucalyptus urophylla × Eucalyptus grandis plantation and its potential hydrological implication. **Ecohydrology**. e1938. 2018. doi: 10.1002/ECO.1938.

PAIVA, A.S.; FERNANDES, E.J.; RODRIGUES, T.J.D.; TURCO, J.R.P. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.161-169, 2005. doi: 10.1590/S0100-69162005000100018.

PAMPONET, A. J. M., AMORIM, M. S., ANDRADE, T. P. COELHO, E.F., SILVA, A. C. P. Produtividade da bananeira cv. prata anã no terceiro ciclo submetido a diferentes lâminas de irrigação e densidades de plantas. **Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola e XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola CLIA/CONBEA 2012**. Londrina - PR, Brasil, 15 a 19 de julho 2012.

PARENTE, H.N.. **Avaliação da vegetação e do solo em áreas de Caatinga sob pastejo caprino no cariri da Paraíba** [tese]. Areia: Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba; 2009.

PEARSON K.. On lines and planes of closest fit to systems of points in space. **Philosophical Magazine** 2(6): 559–572. 1901.

PENNA D, VAN MEERVELD HJ, OLIVIERO O, ZUECCO G, ASSENDELFT RS, FONTANA GD, BORGA M.. Seasonal changes in runoff generation in a small forested mountain catchment. **Hydrological Processes**. 29: 2027–2042. 2015. doi: 10.1002/hyp.10347.

PEREIRA, K. M. C. **Representação da arquitetura de copa de indivíduos jovens de Poincianella pyramidalis (TUL) L. P. Queiroz (Caatingueira) espécie da Caatinga brasileira**. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas)- Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N, DÍAZ S, GARNIER E, et. al. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**; 61:137–234, 2013.

PETER, S.; De ARAÚJO, J.C.; De ARAÚJO, N.; HERRMANN H.J.. Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network. **Journal of Hydrology**. 512: 408–420. 2014. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.001.

PFAUTSCH, S., KEITEL, C., TURNBULL, T., BRAIMBRIDGE, M.J., WRIGHT, T.E., SIMPSON, R.R., O'BRIEN, J.A., ADAMS, M.A.. Diurnal patterns of water use in *Eucalyptus victrix* indicate pronounced desiccation–rehydration cycles despite unlimited water supply.. **Tree Physiol**. 31:1041–1051. 2011.

PHILLIPS, N. G., LEWIS, J. D., LOGAN, B., TISSUE, D. T.. Inter- and intra-specific variation in nocturnal water transport in *Eucalyptus*, **Tree Physiol**. vol. 30 (pg. 586-596). 2010.

PINHEIRO E. A. R., COSTA C. A. G., De ARAÚJO J. C.. Effective root depth of the Caatinga biome. **J Arid Environ**. 2013. 89:1–4. doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.003.

PINHEIRO, E. A. R.; ALMEIDA, C. L.; FARIAS, T. R. L.; ARAUJO, J. C.. **Análise de tendência da taxa de retenção de sedimento em reservatórios do Estado do Ceará**. In: X ENES, 2012, Foz do Iguaçu. X encontro nacional de engenharia de sedimentos, 2012.

PINHEIRO, E. A. R.; METSELAAR, K.; VAN LIER, Q. de J.; De ARAÚJO, J. C. Importance of soil-water to the Caatinga biome, Brazil. **Ecohydrology**, v. 9, n. 7, p. 1313-1327, 2016. DOI: 10.1002/ECO.1728.

PINTO JR., O. B.; VOURLITIS, G. L.; SANCHES, L.; DALMAGRO, H. J.; LOBO, F. A.; NOGUEIRA, J. S. Transpiração pelo método da sonda de dissipação térmica em floresta de transição amazônica-cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.3, p.268-274, 2013.

PRICE, K.; JACKSON, C.R.; PARKER, A. J.. Variation of surficial soil hydraulic properties across land uses in the southern Blue Ridge Mountains, North Carolina, USA. **Journal of Hydrology**. 383, pp. 256-268. 2010.

PRUSKI, F.F.; BRANDÃO, V.S.; SILVA, D.D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFV, 2ª. Edição, 2003, 87p.

RAZALI, N.M., WAH, Y.B. Power comparison of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modelling and Analytics**, Vo.2, No 1, 21–33. 2011.

REICHARDT, Klaus. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 186 p.  
REIS, L. F. R. **Escoamento superficial**. Notas de hidrologia e recursos hídricos. Disponível em: <<http://www.shs.eesc.usp.br/graduacao/disciplinas/shs403/download/escoamento-superficial.pdf>>, 25 de maio de 2009.

REYES-ACOSTA, J. L., VANDEGEHUCHTE, W., STEPPE, K., LUBCZYNSKI, M. 214 W.. Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients 215 in sap flow measurements. Part 2. Laboratory validation. **Tree physiology** [0829-318X] yr: 216 vol: 32 iss: 7 pg: 913 – 929. 2012. doi: 10.1093/TREEPHYS/TPS042. 217 218.

REYES-ACOSTA, J.L., LUBCZYNSKI, M.W. Optimization of dry-season sap flow 219 measurements in an oak semi-arid open woodland in Spain. **Ecohydrology**, 2014, 7, 2, 258–220 277. DOI: 10.1002/ECO.1339.

RIBEIRO, B. D.; BARRETO, D. W.; COELHO, M. A. Z.. Recovery of Saponins from Jua (*Ziziphus joazeiro*) by Micellar Extraction and Cloud Point Preconcentration. **Journal of Surfactants and Detergents**. 17: 553. 2014. doi: 10.1007/S11743-013-1526-5.

RICHARDS, J. H., CALDWELL, M. M., Hydraulic lift: substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentata* roots. **Oecologia** 73, 486–489 1987. doi: 10.1007/BF00379405.

RODRIGUES, H. J. B., COSTA, R. F. da, RIBEIRO, J. B. M., SOUZA FILHO, J. D. da C., RUIVO, M.de L. P., SILVA JÚNIOR, J.de A.. Variabilidade sazonal da condutância estomática em um ecossistema de manguezal amazônico e suas relações com variáveis meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 26(2), 189-196. 2011. doi: 10.1590/S0102-77862011000200003.

ROSADO, B. H. P., OLIVEIRA, R. S., JOLY, C. A., AIDAR, M. P. M., BURGESS, S. S. O.. Diversity in nighttime transpiration behavior of woody species of the Atlantic Rain Forest, Brazil. 2012. **Agric For Meteorol.** 158–159:13–20.

SAKURATANI, T. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. **Journal of Agricultural Meteorology**, Tokyo, v.39, p.9-17, 1981.

SALEMI FL, GROppo JD, TREVISAN R, DE MORAES JM, FERRAZ SFB, VILLANI JP, DUARTE-NETO PJ, MARTINELLI LA.. Land-use change in the Atlantic rainforest region: consequences for the hydrology of small catchments. **Journal of Hydrology.** 499: 100–109. 2013. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.06.049.

SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Plant physiology.** 4.ed. Belmont: Wadsworth Publishing Company, 1992. 682p.

SALVADOR, M. M. S.; LIBARDI, P. L.; BRITO, A. dos S.; MOREIRA, N. B.. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da distribuição da armazenagem de água no solo numa sucessão feijão/aveia-preta. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1434-1447, Nov. 2012. doi: 10.1590/S0100-06832012000500007.

SANTOS J.C.N., ANDRADE E.M., GUERREIRO M.J.S., MEDEIROS P.H.A., PALÁCIO H.A.Q., ARAÚJO NETO J.R. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **J Hydrol** 541(Part B):1057–1066.2016. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2016.08.016.

SANTOS, J.C.N., ANDRADE, E.M., GUERREIRO, M.J.S., MEDEIROS, P.H.A., PALÁCIO, H.A.Q., ARAÚJO NETO, J.R.. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **J Hydrol.**, 541(Part B), 1057–1066. 2016. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.08.016.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit Hídrico e os Processos Morfológicos e Fisiológicos das Plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 287-294.1998.

SANZ-SÁEZ, Á; KOESTER, R. P.; ROSENTHAL, D. M.; MONTES, C. M.; ORT, D. R.; AINSWORTH, E. A.. Leaf and canopy scale drivers of genotypic variation in soybean response to elevated carbon dioxide concentration. **Glob Change Biol.** 2017; 23:3908–3920. doi: 10.1111/GCB.13678

SARMIENTO, G.; GOLDSTEIN, G.; MEINZER, F. Adaptive strategies of woody species in neotropical savanas. **Biological Review**, v.60, p.315-355, 1985.

SBRISSIA, A. F.; SILVA, S. C. DA.. Comparação de três métodos para estimativa do índice de área foliar em pastos de capim-marandu sob lotação contínua. **R. Bras. Zootec.** Viçosa, v. 37, n. 2, p. 212-220, 2008. doi: 10.1590/S1516-35982008000200006.

SCHEFFLER, R.; NEILL, C.; KRUSCHE, A. V.; ELSENBEEER, H. Soil hydraulic response to land-use change associated with the recent soybean expansion at the Amazon agricultural frontier. **Agriculture, Ecosystems Environment**, v. 144, p. 281–289, 2011. doi: 10.1016/j.agee.2011.08.016.

SCHEIDEGGER, A. E.. Horton's Law of Stream Numbers, **Water Resour. Res.**, 4(3), 655–658, 1968. doi:10.1029/WR004i003p00655.

SCHMID B, THOME KJ, DEMOULIN P, PETER R, MATZLER C, SEKLER J. Comparison of modeled and empirical approaches for retrieving columnar water vapor from solar transmittance measurements in the 0.94 mm region. **J. Geophys. Res.** 101: 9345–9358. 1996.

SCHOLZ, F. G., BUCCI, S. J., GOLDSTEIN, G., MEINZER, F. C., FRANCO, A. C.; Hydraulic redistribution of soil water by neotropical savanna trees. **Tree Physiol.** 22 (9): 603–612.2002. doi: 10.1093/TREEPHYS/22.9.603.

SCHOLZ, F. G., BUCCI, S. J., GOLDSTEIN, G., MOREIRA, M. Z., MEINZER, F. C., DOMEQ, J.-C., VILLALOBOS-VEGA, R., FRANCO, A. C., MIRALLES-WILHELM, F.. Biophysical and life-history determinants of hydraulic lift in Neotropical savanna trees. **Functional Ecology**, 22: 773–786. 2008, DOI: 10.1111/J.1365-2435.2008.01452.X

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, Great Britain, v. 52, n. 3, p. 591-611.1965.

SHI, Z.-H.; CHEN, L.-D.; FANG, N.-F.; QIN, D.-F.; CAI, C.-F.. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China **Catena**, 77 (1), pp. 1-7. 2009. doi: 10.1016/j.catena.2008.11.006.

SIDDIQ, Z.; CAO, K.-F.. Nocturnal transpiration in 18 broadleaf timber species under a tropical seasonal climate, **Forest Ecology and Management**, 2017, ISSN 0378-1127, DOI: 10.1016/J.FORECO.2017.12.043.

SIEFERT, C. A. C., SANTOS, I. dos. Mecanismos de Geração de Escoamento e Áreas Hidrológicamente Sensíveis: uma Abordagem Hidrogeomorfológica para Delimitação de Áreas de Preservação Permanente. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, [S.l.], v. 24, mar. 2012. ISSN 2177-2738. doi: 10.5380/raega.v24i0.26216.

SILVA, C. O. A. **Análise de modelos de escoamento aplicados a águas superficiais e subterrâneas**. 2007. 80f. Dissertação (Recursos Hídricos). Universidade do Algarve, Faro. 2007.

SILVA, E.C., NOGUEIRA RJMC, AZEVEDO NETO AD, BRITO JZ, CABRAL, EL. Aspectos ecofisiológicos de dez espécies em uma área de Caatinga no município de Cabaceiras, Paraíba, Brasil. **Iheringia Ser. Bot.** Porto Alegre, v. 59, n. 2, p. 201-205, 2004.

SILVA, J R L.; MONTENEGRO, A A A.; MONTEIRO, A L N.; SILVA JÚNIOR, V P.. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 10 9 06, 2015. doi: 10.5039/agraria.v10i2a4219.

SILVA, MARCELO GABETTO E. **Desenvolvimento de Sensor de Fluxo de Seiva e de Coeficiente Indicador de Estresse Hídrico para Plantas de Cafeeiro Arábica**. 102 f. Tese (Doutorado) - Curso de Produção Vegetal, Tecnologias Agropecuárias, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Uenf, Campos dos Goytacazes, 2008.

SILVA, P. M. de O.; MELLO, C. R. de; SILVA, A. M. da; COELHO, G.. Modelagem da hidrógrafa de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 258-265, 2008.

SILVA, P.F.; LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R. SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M.; Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil, **Journal of Arid Environments**, V. 147, Pages 71-82, ISSN 0140-1963, 2017. doi: 10.1016/J.JARIDENV.2017.09.003.

SILVA, S. F., CABANEZ, P. A., , MENDONÇA, R. F., PEREIRA, L. R., DO AMARAL, J. A. T. Modelos alométricos para estimativa da área foliar de mangueira pelo método não destrutivo. **Revista Agro@mbiente On-Line**, 9(1), 86-90. 2015. doi: 10.18227/1982-8470RAGRO.V9I1.2134

SILVA, V. D. P. R; PEREIRA, E. R. R; ALMEIDA, R. S. R. Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 163-172, 2012.

SILVA, V. P. R., On climate variability in North east of Brazil. **J. Arid Environ.** 58 (4), 575–596.2004. doi: 10.1016/J.JARIDENV.2003.12.002

SMITH, D.M., JACKSON, N.A., ROBERTS, J.M., ONG, C.K. Reverse flow of sap in tree roots and downward siphoning of water by *Grevillea robusta*. **Funct. Ecol.** 13:256–264.1999.

SNYDER, K. A., RICHARDS, J. H., DONOVAN, L. A.. Night-time conductance in C3 and C4 species: do plants lose water at night? **J. Exp. Bot.** Vol. 54 (pg. 861-865).2003. doi: 10.1093/JXB/ERG082.

STEPPE, K., DE PAUW, D. J. W., DOODY, T. M., TESKEY, R. O.. A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods, **Agric. For. Meteorol.** Vol. 150 (pg. 1046-1056). 2010. doi: 10.1016/J.AGRFORMET.2010.04.004

STEPPE, K., VANDEGEHUCHTE, M. W., TOGNETTI, R., MENCUCCINI, M.; Sap flow as a key trait in the understanding of plant hydraulic functioning. **Tree Physiol.** 35 (4): 341-345.2015. doi: 10.1093/TREEPHYS/TPV033

STRAHLER, A.N.. Statistical analysis in geomorphicresearch. **Journal of Geology** 62:1-25. 1954.

SUN, H., AUBREY, D.P. & TESKEY, R.O. A simple calibration improved the accuracy of the thermal dissipation technique for sap flow measurements in juvenile trees of six species. **Trees.** 26: 631.2012. doi: 10.1007/S00468-011-0631-1.

TATARINOV, F.; KUCERA, J.; CIENCIALA, E. The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. **Measurement Science Technology**, v.16, p.1157- 1169, 2005.

TEXEIRA, LÉA MORAES NUNES. 2018. **Evapotranspiração em Vegetação Natural do Bioma Caatinga Obtida por Balanço Hídrico no Solo e por Sensoriamento Remoto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

THIMONIER, A.; SEDIVY, I.; SCHLEPPI, P.. Estimating leaf area index in different types of mature forest stands in Switzerland: a comparison of methods. **Eur. J. For. Res.** 129: 543-562.2010. DOI:10.1007/S10342-009-0353-8.

TIAN F, LI H, SIVAPALAN M.. Model diagnostic analysis of seasonal switching of runoff generation mechanisms in the Blue River basin, Oklahoma. **Journal of Hydrology.** 418–419: 136–149. 2012. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.03.011.

TILLESSE, FRANCISCO ESMAYLE ALVES de. 2017. **Potencial de Armazenamento de Água no Caule de Plantas do Bioma Caatinga**. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

TONELLO, KELLY CRISTINA. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. 2005. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG. 2005.

TORRES, R.. **Regime hídrico do solo**. Online. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAWZsAF/regime-hidrico-solo> > Acesso: 06 de março de 2017.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Ed. UFRGS, 2000.

TUCCI, CARLOS E. M, SILVEIRA, ANDRÉ L. L. da. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 2004, 943p.

TURNER, A. K.. Infiltration runoff and soil classifications. **Jour. Hydrol.** 1, 2, 129-143. 1963. doi: 10.1016/0022-1694(63)90036-2.

TYREE, M. T., VARGAS, G., ENGELBRECHT, B. M. J., KURSAR, T. A. Drought until death do us part: a case study of the desiccation-tolerance of a tropical moist forest seedling-tree, *Licania platypus* (Hemsl.) Fritsch. **Journal of Experimental Botany** 53: 2239–2247.2002.

UNGAR, E. D., ROTENBERG, E., RAS YASEEF, N., COHEN, S., YAKIR, D., SCHILLER, G. Transpiration and annual water balance of Aleppo pine in a semiarid region: implications for forest management. **Forest Ecology and Management.**298:39-51. doi: 10.1016/j.foreco.2013.03.003. 2013.

URLI, M.; PORTÉ, A. J.; COCHARD, H.; GUENGANT, Y.; BURLETT, R.; DELZON, S.. Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees, **Tree Physiology**. Volume 33, Issue 7, 1 July 2013, Pages 672–683, 2013. doi: 10.1093/TREEPHYS/TPT030.

VAN DE GIESENA, N., TJEERD-JAN S., AYODELE EBENEZER AJAYIC, D., FAFRÉ BAGAYOKOE. Scale effects in Hortonian surface runoff on agricultural slopes in West

Africa: Field data and models. **Agriculture, ecosystems & environment**. [0167-8809] 2011 vol: 142 iss: 1 pg: 95 -101.

VAN SCHAİK NLMB, BRONSTERT A, DE JONG SM, JETTEN VG, VAN DAM JC, RITSEMA CJ, SCHNABEL S.. Process-based modelling of a headwater catchment in a semi-arid area: the influence of macropore flow. **Hydrological Processes**. 28(24): 5805–5816. 2014. doi: 10.1002/hyp.10086.

VELLAME, L. M. **Transpiração em plantas de laranja e manga utilizando sonda de dissipação térmica e balanço de calor**. 2007. 67p.Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Centro de ciências agrárias, ambientais e biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2007.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; PAZ, V. P. S.. Transpiração em mangueira pelo método Granier. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.5, p.516-523, 2009.

VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A.; PAZ, V.P.S.; COELHO, E.F. Gradientes térmicos naturais na estimativa do fluxo de seiva pelo método Granier. **Revista Caatinga**, v.24, p.116-122, 2011.

VELLOSO, S. G. S.; SANTOS, D. L.; FERREIRA FILHO, J. G. de A.. Estimativa da Lâmina Máxima de Escoamento Superficial na Bacia do Rio São Miguel, Minas Gerais. **Scientia Agraria**, [S.l.], v. 16, n. 3, maio 2016. ISSN 1983-2443. doi: 10.5380/rsa.v16i3.46825.  
VIANELLO, R.L. & ALVES, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, Imprensa Universitária, 449 p.1991.

VILLELA, S. M.; Mattos, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo, McGraw-Hill, 1975. 245p.

WANG, D., WANG, L.. Dynamics of evapotranspiration partitioning for apple trees of different ages in a semiarid region of northwest China. **Agricultural Water Management** 191,1–15. 2017. doi: 10.1016/J.AGWAT.2017.05.010.

WANG, X. P.; ZHANG, Y. F.; HUA, R.; PAN, Y. X.; BERNDTSSON, R.. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China. **J Hydro**. 454–455: 152–159. 2012. doi: 10.1016/J.JHYDROL.2012.06.003.

WARREN, R. K.; PAPPAS, C.; HELBIG, M.; CHASMER, L. E.; BERG, A. A.; BALTZER, J. L.; QUINTON, W. L.; SONNENTAG, O.. Minor contribution of overstory transpiration to landscape evapotranspiration in boreal permafrost peatlands. **Ecohydrology**. 2018;e1975. doi: 10.1002/ECO.1975.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v.11, p.41-76, 1947. doi: 10.1093/OXFORDJOURNALS.AOB.A083148.

WIEGAND, M. C.; RODRIGUES, J. O.; ALVES, N. N. L.; SOUSA, B. F. S.; LIMA, Y. C. P.; De ARAÚJO, J. C.. **Estimativa da produção de sedimentos em uma bacia**

**experimental usando modelos empíricos.** In: Anais do VIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Campo Grande – MS. 2008.

WORRALL F., BURT T.P., ADAMSON J.K. Change in runoff initiation probability over a severe drought in a peat soil - Implications for flowpaths. **Journal of Hydrology**, 345 (1-2), pp. 16-26. 2007. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.07.008.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A.; MACHADO, R. E.. Relação entre índice de área foliar e frações de componentes puros do modelo linear de mistura espectral, usando imagens ETM+/Landsat. **Eng. Agríc.**, Botucatu , v. 24, n. 2, p. 421-430, 2004. doi: 10.1590/S0100-69162004000200022.

ZANINE, A. M.; SANTOS, E. M.; FERREIRA, D. J.; ALMEIDA, J. C. C.; MACEDO JUNIOR, G. L. & OLIVEIRA, J. S. 2005. Composição bromatologica de leguminosas do semiárido brasileiro. **Livestock Research for Development**, 17(8): 1-5.2005.

ZEPPEL, M. J. B., LEWIS, J. D., PHILLIPS, N. G., TISSUE, D. T. Consequences of nocturnal water loss: A synthesis of regulating factors and implications for capacitance, embolism and use in models. **Tree Physiology**, 34, 1047–1055. 2014. doi: 10.1093/TREEPHYS/TPU089.

ZEPPEL, M. J. B., TISSUE, D., TAYLOR, D. T., MACINNIS-NG, C., EAMUS, D.. Rates of nocturnal transpiration in two evergreen temperate woodland species with differing water-use strategies. **Tree Physiol.** 30:988-1000.2010.

ZHA, T., QIAN, D., JIA, X., BAI, Y., TIAN, Y., BOURQUE, C. P.-A., MA, J., FENG, W., WU, B., PELTOLA, H.: Soil moisture control of sap-flow response to biophysical factors in a desert-shrub species, *Artemisia ordosica*. **Biogeosciences**, 14, 4533-4544, 2017. doi: 10.5194/BG-14-4533-2017.

ZHANG H, WEI W, CHEN L, YANG L. Evaluating canopy transpiration and water use of two typical planted tree species in the dryland Loess Plateau of China. **Ecohydrology**. 10:e1830. 2017. doi: 10.1002/ECO.1830.

ZHANG, J-G.; GUAN, J-H.;SHI, W-Y.; YAMANAKA, N.; DU S. Interannual variation in stand transpiration estimated by sap flow measurement in a semiarid black locust plantation, Loess Plateau, China. **Ecohydrology**8(1): 137–147. 2015. doi:10.1002/ECO.1495.

ZHAO, W., LIU, B. The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China. **Agricultural and forest meteorology**, 150, 1297–1306. 2010. doi: 10.1016/J.AGRFORMET.2010.05.012.

ZHENG, C., WANG, Q.. Seasonal and annual variation in transpiration of a dominant desert species, *Haloxylon ammodendron*, in Central Asia up-scaled from sap flow measurement. **Ecohydrolog.** 8, 948–960. 2015. doi: 10.1002/eco.1547.

ZHU, L., HU, Y., ZHAO, X., ZENG, X., ZHAO, P., ZHANG, Z., JU, Y.. The impact of drought on sap flow of cooccurring *Liquidambar formosana* Hance and *Quercus variabilis* Blume in a temperate forest, Central China. **Ecohydrology**. 1828.2017 doi: 10.1002/ECO.1828.

ZIEGLER, A.D.; NEGISHI, J.N.; SIDLE, R.C.; NOGUCHI, S.; NIK, A.R.. 2006. Impacts of logging disturbance on hillslope saturate hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. **Catena**. 67:89-104. doi: 10.1016/j.catena.2006.02.008.

ZIMMERMANN, A.; SCHINN, D.; FRANCKE, T.; ELSENBEER, H.; ZIMMERMANN, B.. Uncovering patterns of near-surface saturated hydraulic conductivity in an overland flow-controlled landscape. **Geoderma** 195-196: 1–11. 2013. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.11.002.

ZIMMERMANN, B., ELSENBEER, H. & DE MORAES, J.M.. The influence of land-use changes on soil hydraulic properties: Implications for runoff generation. **Forest Ecology and Management**, 222, 29–38. 2006.