



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**DANIELY FLORENCIA SILVA DE SOUZA**

**CONTROLES BIOFÍSICOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE  
FEIJÃO-CAUPI SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS NO NORDESTE  
PARAENSE, BRASIL**

**BELÉM  
2018**

**DANIELY FLORENCIA SILVA DE SOUZA**

**CONTROLES BIOFÍSICOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE  
FEIJÃO-CAUPI SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS NO NORDESTE  
PARAENSE, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia como requisito para obtenção de título de Mestre em Agronomia.

Área de concentração: Agrometeorologia

Linha de Pesquisa: Manejo e conservação de recursos ambientais

Orientador: Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza

**BELÉM  
2018**

**DANIELY FLORENCIA SILVA DE SOUZA**

**CONTROLES BIOFÍSICOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE  
FEIJÃO-CAUPI SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS NO NORDESTE  
PARAENSE, BRASIL**

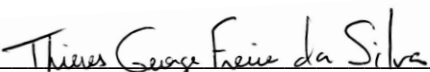
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal Rural da Amazônia como requisito para obtenção de título de Mestre em Agronomia.  
Área de concentração: Agrometeorologia

Data da Aprovação: 17 / 07 / 2018

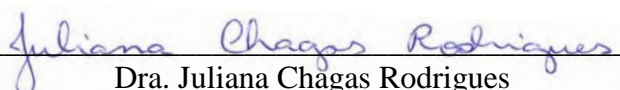
Banca Examinadora:

Orientador: 

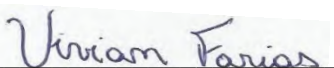
Dr. Paulo Jorge de Oliveira Ponte de Souza  
Universidade Federal Rural da Amazônia

Membro 1: 

Dr. Thieres George Freire da Silva  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Membro 2: 

Dra. Juliana Chagas Rodrigues  
Universidade de São Paulo-ESALQ

Membro 3: 

Dra. Vivian Dielly da Silva Farias  
Universidade Federal do Oeste do Pará

À Maria da Conceição Silva de Souza,  
minha mãe, pelos princípios, conselhos,  
carinho, amor, empenho e dedicação para que  
eu alcançasse mais esta vitória. Mulher e mãe  
que destinou sua vida em prol dos filhos e que  
tornou possível a realização de nossos sonhos.

**DEDICO.**

## SUMÁRIO

RESUMO .....	viii
ABSTRACT .....	ix
<b>1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>Referências .....</b>	<b>15</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Aspectos gerais da cultura do feijão-caupi.....</b>	<b>18</b>
2.1.1. Histórico da cultura .....	18
2.1.2. Botânica.....	19
2.1.3. Fenologia.....	21
2.1.4. Condições edafoclimáticas .....	22
<b>2.2. Controles biofísicos da Evapotranspiração .....</b>	<b>24</b>
2.2.1. Condutância aerodinâmica .....	26
2.2.2. Condutância estomática.....	27
2.2.3. Fator de desacoplamento .....	28
<b>Referências .....</b>	<b>29</b>
<b>3. CONTROLES BIOFÍSICOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE FEIJÃO-CAUPI SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS NO NORDESTE PARAENSE, BRASIL.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>34</b>
<b>3.3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
<b>3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>51</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>51</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1.** Localização da área experimental .....36
- Figura 3.2.** Estádios fenológicos do feijão-caupi .....39
- Figura 3.3.** Precipitação (Prp) e umidade do solo (Us) ao longo do ciclo do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) nos anos de 2013 (A), 2014 (B) e 2015 (C), sob as condições climáticas do município de Castanhal-Pa; o início do período reprodutivo ocorreu nos DAS 32, 33 e 31, respectivamente para os anos de 2013, 2014 e 2015 .....44
- Figura 3.4.** Variação média horária de elementos climáticos durante o período diurno em quatro estádios fenológicos representativos da fase reprodutiva da cultura do feijão-caupi irrigado (cv. BR3-Tracuateua), nos anos de 2013, 2014 e 2015, sob as condições climáticas do Nordeste paraense. Umidade relativa do ar (UR) e Temperatura do ar (Tar); Radiação solar global (Rg), Velocidade do vento ( $U_2$ ), e Déficit de pressão de vapor d'água (DPV) .....45
- Figura 3.5.** Variação média horária da condutância estomática ( $g_s$ ) e da condutância aerodinâmica ( $g_a$ ) durante o período diurno em quatro estádios fenológicos representativos da fase reprodutiva da cultura do feijão-caupi irrigado (cv. BR3-Tracuateua), nos anos de 2013, 2014 e 2015, sob as condições climáticas do Nordeste paraense. Tratamentos: T100 (x); T50 (o); T25 ( $\Delta$ ); T0 ( $\square$ ).....46
- Figura 3.6.** Variação média horária do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) durante o período diurno em quatro estádios fenológicos representativos da fase reprodutiva da cultura do feijão-caupi irrigado (cv. BR3-Tracuateua), nos anos de 2013, 2014 e 2015, sob as condições climáticas do Nordeste paraense. Tratamentos: T100 (x); T50 (o); T25 ( $\Delta$ ); T0 ( $\square$ ).....58

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 3.1.</b> Características químicas e físicas do solo da área experimental .....	37
<b>Tabela 3.2.</b> Dias após a semeadura definidos para a coleta de dados de condutância estomática .....	42
<b>Tabela 3.3.</b> Dados médios do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) e de variáveis relacionadas para 4 estádios fenológicos representativos da fase reprodutiva da cultura do feijão-caupi irrigado (cv. BR3- Tracuateua), nos anos de 2013, 2014 e 2015, sob as condições climáticas do Nordeste paraense .....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$\Omega$	fator de desacoplamento	adimensional
CAD	capacidade de água disponível	mm
$\Delta$	declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água versus a temperatura	kPa °C <sup>-1</sup>
CC	capacidade de campo	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
d	deslocamento do plano zero do perfil do vento	m
DAS	dias após a semeadura	-
DPV	déficit de pressão de vapor d'água	kPa
Ea	eficiência de aproveitamento de água	%
E <sub>ap</sub>	eficiência de aplicação	%
ET	evapotranspiração	mm dia <sup>-1</sup>
ETc	evapotranspiração da cultura	mm dia <sup>-1</sup>
ETo	evapotranspiração potencial	mm dia <sup>-1</sup>
g <sub>a</sub>	condutância aerodinâmica	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
g <sub>s</sub>	condutância estomática	mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
h	altura das plantas	m
k	constante de Von Kármán	-0,41
Kc	coeficiente de cultura	-
LB	lâmina bruta	mm
LL	lâmina líquida	mm
PMP	ponto de murcha permanente	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
R5	primeiro botão floral	-
R6	antese da primeira flor	-



R7	primeira vagem	-
R8	grão começa a preencher a cavidade da vagem	-
R9	maturação fisiológica	-
$r_a$	resistência aerodinâmica	$m\ s^{-1}$
Rg	radiação global incidente	$W\ m^{-2}$
T0	sem irrigação	-
T100	reposição de 100% da ETc	-
T25	reposição de 25% da ETc	-
T50	reposição de 50% da ETc	-
Tar	temperatura do ar	$^{\circ}C$
$U_2$	velocidade do vento a 2m	$m^2\ s^{-1}$
UR	umidade relativa do ar	%
$U_s$	umidade do solo	$m^3\ m^{-3}$
$U_z$	velocidade do vento a uma altura Z	$m\ s^{-1}$
V0	germinação	-
V1	emergência	-
V2	folhas primárias	-
V3	primeira folha trifoliolada	-
V4	terceira folha trifoliolada	-
$Z_{0h}$	parâmetro de rugosidade para calor sensível e vapor d'água	m
$Z_{0m}$	parâmetro de rugosidade para momentum	m
$Z_h$	altura de medição da umidade do ar	m
$Z_m$	altura de medição da velocidade do vento	m
$\gamma$	coeficiente psicrométrico	$kPa\ ^{\circ}C^{-1}$

## RESUMO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é uma das principais leguminosas cultivadas no Brasil, contudo, a cultura apresenta uma produtividade média baixa, sobretudo devido as condições relacionadas ao clima que representam um dos principais fatores limitantes a produtividade desta cultura. Apesar do feijão-caupi ser uma espécie relativamente tolerante à seca, o déficit hídrico pode ocasionar considerável redução na produtividade, caracterizando-se como uma das maiores barreiras para a consolidação da cultura no País. A troca de vapor d'água entre a cultura e a atmosfera é controlada pelas condições climáticas e as características da superfície. Por isso, objetivou-se através do presente estudo, analisar as variações do fator desacoplamento da atmosfera para o feijão-caupi irrigado durante os estádios fenológicos reprodutivos da cultura no nordeste paraense. O estudo foi conduzido no município de Castanhal, Nordeste do estado do Pará, em cultivo de feijão-caupi cv. BR3-Tracuateua, nos anos de 2013, 2014 e 2015 submetidos à quatro tratamentos de lâminas de irrigação (T100 – reposição de 100% da evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>); T50 – reposição de 50% da ET<sub>c</sub>; T25 – reposição de 25% da ET<sub>c</sub> e T0 – reposição de 0% da ET<sub>c</sub>). Os dados meteorológicos foram coletados por sensores instalados em uma torre micrometeorológica alocada no centro da área experimental. Foram monitoradas as seguintes variáveis meteorológicas: temperatura e umidade do ar, radiação solar incidente, pressão atmosférica, velocidade do vento, precipitação e umidade do solo. A interação biosfera-atmosfera nos processos de evapotranspiração vegetal que permite distinguir os fatores que influenciam a troca de vapor d'água com a atmosfera foi estimada por meio do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ). Os valores de  $\Omega$  foram sempre maiores que 0,5 para todos os tratamentos testados e nos três anos de estudo, evidenciando um desacoplamento de moderado a alto entre a cultura e a atmosfera, de modo que o processo de troca de vapor d'água foi controlado pelo suprimento de energia, ao invés do controle estomático. Porém, para o tratamento sem irrigação esse controle foi menos expressivo.

**Palavras - chave:** fator de desacoplamento, *Vigna unguiculata* (L.) Walp, condutância aerodinâmica, condutância estomática

## ABSTRACT

The cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) Is one of the main legumes grown in Brazil, however, the crop has a low average productivity, mainly due to the climatic conditions that represent one of the main limiting factors of the productivity of this culture. Although cowpea is a relatively drought tolerant species, water deficit can cause a considerable reduction in productivity, characterizing it as one of the major barriers to crop consolidation in Brazil. The exchange of water vapor between the crop and the atmosphere is controlled by the climatic conditions and surface characteristics. Therefore, the objective of this study was to analyze the variations of the decoupling factor of the atmosphere for the irrigated cowpea during the reproductive phenological stages of the crop in northeast of Para. The study was conducted in the municipality of Castanhal, Northeast of the state of Pará, in cowpea cv. BR3-Tracuate, in the years 2013, 2014 and 2015 submitted to four treatments of irrigation slides (T100 - replacement of 100% of crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>); T50 - 50% replacement of ET<sub>c</sub>; T25 - 25% of ET<sub>c</sub> and T0 - 0% replacement of ET<sub>c</sub>). The meteorological data were collected by sensors installed in a micrometeorological tower located in the center of the experimental area. The following meteorological variables were monitored: air temperature and humidity, incident solar radiation, atmospheric pressure, wind speed, precipitation and soil moisture. The biosphere-atmosphere interaction in the processes of vegetal evapotranspiration that allows to distinguish the factors that influence the exchange of water vapor with the atmosphere was estimated by the decoupling factor ( $\Omega$ ). The values of  $\Omega$  were always higher than 0.5 for all the treatments tested and in the three years of study, evidencing a moderate to high decoupling between the culture and the atmosphere, so that the water vapor exchange process was controlled by the energy supply, rather than stomatal control. However, for the treatment without irrigation this control was less expressive.

**Keywords:** decoupling factor, *Vigna unguiculata* (L.) Walp, aerodynamic conductance, stomatal conductance

## 1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) é uma das principais leguminosas cultivadas no Brasil, possuindo grande relevância na produção agrícola do País, sobretudo, para as regiões Norte e Nordeste (LIMA FILHO; COELHO FILHO; HEINEMANN, 2013). Nessas regiões, o feijão-caupi constitui-se como um dos principais componentes da dieta alimentar, especialmente para as populações de baixa renda; por ser uma excelente fonte de nutrientes (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a).

Essa leguminosa é principalmente cultivada para a produção de grãos. Estes podem ser consumidos de forma desidratada, em conserva ou *in natura*. Mas também pode ser utilizada, como feno se desidratada a folha, forragem verde e farinha (grão) na alimentação animal (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a). O desenvolvimento de cultivares de porte ereto, facilitou o manejo e despertou o interesse de grandes produtores devido à possibilidade de uso de maquinário no processo de produção. Isso também contribuiu para a expansão do cultivo em larga escala, notadamente nas regiões Centro-Oeste do País e Nordeste do estado do Pará (TEIXEIRA et al., 2010).

O Nordeste paraense, polo produtivo da cultura no estado, tem a região Bragantina como principal produtora. Nela vem sendo realizado alto investimento na obtenção de cultivares mais adaptadas às condições edafoclimáticas, por meio de avanço tecnológico nos sistemas de produção (FREIRE FILHO et al., 2009). Contudo, a cultura ainda apresenta uma produtividade média baixa, de apenas 506 kg ha<sup>-1</sup> no Brasil (CONAB, 2018). Parte dessa baixa produtividade está relacionada à diversos fatores, como o manejo incorreto de sementes, a baixa fertilidade dos solos e a adversidade climática, especialmente a deficiência hídrica (MENDES et al., 2007; SOUZA et al., 2017a).

Apesar de o feijão-caupi ser uma espécie relativamente tolerante ao déficit hídrico, consideráveis perdas na produtividade podem ocorrer em função da intensidade e do período de desenvolvimento da planta em que ocorre (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a, 2017b; BASTOS; ANDRADE JÚNIOR; CARDOSO, 2017; FERREIRA et al., 2010; PINTO; TÁVORA; GONÇALVES, 2005). O déficit hídrico representa um dos principais fatores limitantes a produtividade desta cultura impedindo o aumento e consolidação da sua produção no Brasil (CARDOSO; MELO; LIMA, 2005; FERREIRA et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2017).

Sendo assim, a prática da irrigação constitui-se uma das principais formas de mitigar essas perdas na produtividade (BASTOS; ANDRADE JÚNIOR; CARDOSO, 2017). Com o intuito de fazer o manejo adequado da irrigação e a utilizar racionalmente os recursos hídricos

disponíveis, é de fundamental importância a determinação da necessidade hídrica da cultura, que pode ser obtido por meio da quantificação das perdas de água via evapotranspiração.

A evapotranspiração representa a transferência de água, na forma de vapor, pela superfície de uma área vegetada para a atmosfera (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013), ocorrendo através do processo simultâneo da evaporação direta da água do solo e/ou da superfície úmida da vegetação e da transpiração das plantas (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013; REICHARDT; TIMM, 2017). Esse processo é governado pelas trocas de energia e limitado, principalmente pela energia disponível e pelo conteúdo de água no solo (FRAGA et al., 2015; TEIXEIRA, 2001).

Para que ocorra a mudança de estado físico da água é necessário um aporte de energia externo ao sistema (AGUIAR NETTO; BASTOS, 2013; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013) que é proveniente sobretudo da radiação solar global (AGUIAR NETTO; BASTOS, 2013; MARIN et al., 2008). Parte dessa energia é absorvida pela superfície e desencadeia uma série de processos físicos e fitofisiológicos que promovem o crescimento e desenvolvimento das plantas (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013). Quando a vegetação se encontra em condições hídricas favoráveis, grande parte da energia absorvida é utilizada na evapotranspiração na forma de calor latente, responsável pela mudança de estado físico da água. A energia restante desse processo é convertida em calor sensível e utilizada no aquecimento da superfície e da camada de ar próximo a ela (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013).

A camada de ar aquecida (menos densa) e também mais úmida se movimenta verticalmente levando o calor sensível e o vapor d'água para camadas mais altas da atmosfera, sendo imediatamente substituída por uma camada de ar mais fria e seca. Esse processo convectivo gera o turbilhonamento da atmosfera e acelera o processo evapotranspirativo (MARIN et al., 2008; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013). Porém, além dos processos físicos, os fenômenos biológicos e características inerentes às plantas também influenciam na evapotranspiração e, por vezes, limitam as leis físicas. A demanda atmosférica e as características provenientes da superfície vegetada, regulam aerodinâmica e fisiologicamente a evapotranspiração por meio da atividade estomática e da rugosidade do dossel (FRAGA et al., 2015; SILVA et al., 2012).

A capacidade da superfície vegetal em transferir água para a atmosfera é chamada de condutância (Kelliher et al., 1995) e pode ser desmembrada em condutância estomática e condutância aerodinâmica. A condutância estomática é a variável fisiológica que controla o

fluxo de vapor d'água da folha para atmosfera através do poro estomático e; é o mecanismo que melhor representa o controle da evapotranspiração no vegetal (PAULINO JUNIOR; VON RANDOW; VON RANDOW, 2017). A condutância aerodinâmica representa as condições físicas e a capacidade de conduzir fluxo de ar acima da superfície vegetativa, está relacionada com os processos atmosféricos turbulentos e é o parâmetro que representa a condutividade dessa atividade turbulenta na camada de ar próxima a superfície (PAULINO JUNIOR; VON RANDOW; VON RANDOW, 2017).

A relação entre as condutâncias estomática e aerodinâmica da equação de Penman-Montheith (1961), levou ao desenvolvimento do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) por McNaughton & Jarvis (1983) (FRAGA et al., 2015; SILVA et al., 2012). Esse fator é um indicativo da interação da superfície com a atmosfera nos processos de evapotranspiração vegetal. Ele permite distinguir os fatores que influenciam na troca de vapor d'água e estabelece se a evapotranspiração é principalmente controlada pelo déficit de pressão de vapor e a condutância estomática ou pelo saldo de radiação e a condutância aerodinâmica (SILVA et al., 2012). Quando igual ou próximo a 0, o controle biótico sobre a evapotranspiração é grande, e quando próximo a 1, as condições externas são determinantes no processo.

Plantas de feijão-caupi submetidas à deficiência hídrica, apresentam reduções na condutância estomática com aumento na resistência difusiva ao vapor de água, mediante o fechamento dos estômatos (SILVA et al., 2010). Em dias de alta luminosidade, elevada temperatura, baixa umidade relativa e elevado déficit de pressão do vapor do ar, as plantas de feijão-caupi sob deficiência hídrica apresentam intenso fechamento estomático (SANTOS, 2016). Na Amazônia, em cultivo de feijão-caupi irrigado, o fator de desacoplamento médio para o ciclo foi de 0,66, indicando que a cultura não desacoplou totalmente da atmosfera, mesmo recebendo incremento hídrico de 100% de reposição da ETc (FARIAS et al., 2017).

Algumas culturas já estudadas, submetidas a diferentes condições hídricas têm respostas variadas quanto ao controle biofísico da interação planta-atmosfera. Para a cana-de-açúcar em Juazeiro, na Bahia quando houve a suspensão da irrigação ocorreu a redução do  $\Omega$  de 0,73 para 0,69 (SILVA et al., 2012). Para o milho irrigado, em safras de diferentes épocas, em Piracicaba, São Paulo, a cultura esteve acoplada à atmosfera tanto na safra de outono como na safra de verão, porém, com uma tendência ao desacoplamento na safra de verão em virtude das elevadas temperaturas (SOUZA et al., 2017b).

No semiárido, para vegetação de Caatinga, em Petrolina, Pernambuco, quando ocorriam eventos de precipitação o  $\Omega$  era igual a 1 e em dias secos o  $\Omega$  era próximo a 0 (SOUZA

et al., 2015). Na Amazônia, em áreas de floresta e de pastagem, o  $\Omega$  variou de 0,5 a 0,8 na estação chuvosa e diminuiu para valores inferiores a 0,5 na estação seca, principalmente, na área de pastagem (PAULINO JUNIOR; VON RANDOW; VON RANDOW, 2017).

No entanto, os estudos sobre os controles biofísicos da evapotranspiração na cultura do feijão-caupi sob diferentes disponibilidades hídricas e na fase reprodutiva, são incipientes na região Amazônica. Fundamentado a isso, do ponto de vista científico, a hipótese deste estudo presume que a condutância estomática e o fator de desacoplamento diminuem com o aumento da deficiência hídrica imposta à cultura e a condutância aerodinâmica aumenta no período desde a floração até a maturação fisiológica do feijão-caupi.

### ***Objetivos***

#### *Objetivo geral*

Analisar as variações do fator de desacoplamento da atmosfera para o feijão-caupi submetido a diferentes disponibilidades hídricas e durante os estádios fenológicos reprodutivos da cultura no nordeste paraense.

#### *Objetivos específicos*

Analisar as variações da condutância estomática e da condutância aerodinâmica para o feijão-caupi no Nordeste paraense.

Analisar a influência das variáveis climáticas e das condutâncias no fator de desacoplamento para o feijão-caupi submetido a diferentes disponibilidades hídricas e durante os estádios fenológicos reprodutivos da cultura.

## Referências

- AGUIAR NETTO, A. de O.; BASTOS, E. A. **Princípios agronômicos da irrigação**. Brasília: Embrapa, 2013. 264 p.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de et al. **Cultivo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2017a.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de et al. **Feijão-caupi: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa, 2017b.
- BASTOS, E. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; CARDOSO, M. J. Manejo da irrigação. In: DOVALE, J. C.; BERTINI, C.; BORÉM, A. **Feijão-caupi: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2017. p. 224–243.
- CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B.; LIMA, M. G. de. Ecofisiologia e Manejo de Plantio. In: **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p. 211–228.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos Monitoramento agrícola- Safra 2017** Brasília: Conab, 2018. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>
- FARIAS, V. D. da S. et al. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in the eastern Amazon. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 190–200, 2017.
- FERREIRA, W. R. S. et al. **Influência da Variabilidade da Chuva na Produção de Feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) no Estado do Pará: Estudo Preliminar**. Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010. Disponível em: <[http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/238\\_95767.pdf](http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/238_95767.pdf)>. Acesso em: 27 mar. 2018
- FRAGA, C. I. DE M. et al. Condutância do dossel, condutância aerodinâmica e fator de desacoplamento em floresta de *Vochysia divergens phol* (Vochysiaceae) no pantanal brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 3, p. 275–284, set. 2015.
- FREIRE FILHO, F. R. et al. BRS Milênio e BRS Urubuquara: Cultivares de feijão-caupi para a região Bragantina do Pará. **Revista Ceres**, v. 56, n. 6, p. 749–752, 2009.
- LIMA FILHO, A. F.; COELHO FILHO, M. A.; HEINEMANN, A. B. Calibração e avaliação do modelo CROPGRO para a cultura do feijão caupi no Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1286–1293, 2013.



- MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; PILAU, F. G. **Clima e ambiente: introdução à climatologia para ciências ambientais**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2008. 127 p.
- MENDES, R. M. de S. et al. Relações fonte-dreno em feijão-de-corda submetido à deficiência hídrica. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 1, p. 95–103, 2007.
- OLIVEIRA, A. B. de et al. Exigências edafoclimáticas e ecofisiológicas. In: DOVALE, J. C.; BERTINI, C. H. C. M.; BORÉM, A. (Eds.). **Feijão-caupi: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2017. p. 52–69.
- PAULINO JUNIOR, N.; VON RANDOW, R. de C.; VON RANDOW, C. Analysis of biological and meteorological controls of evapotranspiration in pristine forests and a pasture site in Amazonia. **Revista Ambiente & Água**, v. 12, n. 2, p. 179–191, 2017.
- PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. 323 p.
- PINTO, J. L. N. de; TÁVORA, F. J. A. F.; GONÇALVES, J. A. Aspectos Fisiológicos. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. de A.; RIBEIRO, V. Q. (Eds.). **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p. 191–210.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. 2. ed. Editora Monole, 2017. 524 p.
- SANTOS, P. L. de S. **Respostas Fisiológicas do Feijão-caupi submetidos a restrição hídrica e aplicação de óxido de cálcio sobre as folhas**. Universidade Federal de Sergipe, 2016.
- SILVA, C. D. S. E et al. Curso diário das trocas gasosas em plantas de feijão-caupi submetidas a deficiência hídrica. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 4, p. 7–13, 2010.
- SILVA, T. G. F. da et al. Fator de desacoplamento em um canal irrigado no Submédio do Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 849–857. 2012.
- SOUZA, L. S. B. de et al. Balanço de energia e controle biofísico da evapotranspiração na Caatinga em condições de seca intensa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 8, p. 627–636. 2015.
- SOUZA, P. J. de O. P. de et al. Cowpea leaf area, biomass production and productivity under different water regimes in Castanhal, Pará, Brazil. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 3, p. 748–759,

2017a.

SOUZA, T. T. de et al. Regime de acoplamento planta-atmosfera em lavouras de milho cultivadas em duas épocas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 4, p. 1134–1142, 2017b.

TEIXEIRA, A. H. de C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 28–32, 2001.

TEIXEIRA, I. R. et al. Desempenho agrônômico e qualidade de sementes de cultivares de feijão-caupi na região do cerrado. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 300–307. 2010.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Aspectos gerais da cultura do feijão-caupi

#### 2.1.1. Histórico da cultura

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) teve origem no oeste da África, mais precisamente na região que corresponde à Nigéria, de onde foi disseminado por todo o mundo. Os colonizadores portugueses foram responsáveis pela introdução da espécie no Brasil, uma vez que nos séculos XV e XVI, durante o período da expansão marítima europeia, o tráfico negreiro associado à distribuição de alimentos entre Portugal e suas colônias, tornou eficaz o intercâmbio de inúmeras espécies vegetais (DEAN, 1991; FREIRE FILHO et al., 2005; LOPES, 2009).

Quando o feijão-caupi chega ao Brasil, por volta da segunda metade do século XVI, houve intensa disseminação, iniciando no litoral do que hoje se conhece como estado da Bahia e, posteriormente para o interior, seguindo os caminhos da colonização. Na região amazônica o feijão-caupi chega dois séculos mais tarde através de imigrantes nordestinos que vieram em busca de trabalho nessa região. O padre jesuíta João Daniel, que viveu no estado do Pará entre 1758 e 1776, relata em uma de suas crônicas que em meados do século XVII, já se cultivava o feijão-caupi no estado (FREIRE FILHO et al., 2011, 2017).

Com o passar dos anos e com a opção de cultivar outras espécies de feijões, seja por sua adaptabilidade ou pelo sabor, o feijão-caupi teve seu cultivo concentrado apenas nas regiões norte e nordeste, se tornando a leguminosa mais importante e amplamente cultivada nessas regiões (FREIRE FILHO, 1988). Há aproximadamente 10 anos, a produção de feijão-caupi está em franca expansão para outras regiões do País, principalmente para as áreas de cerrado (FREIRE FILHO et al., 2017).

Devido a dispersão do feijão-caupi para diferentes regiões do país, a existência de vários cultivares e variedades e, conseqüentemente diferentes tipos de grãos e de arquitetura de plantas, há uma certa imprecisão nas definições de nomes populares para esta leguminosa. Os nomes mais comumente utilizados na região Nordeste são: feijão-macássa, feijão-macassar, feijão de corda, feijão-fradinho, feijão-gurutuba e feijão-catador; na região Norte: feijão de praia, feijão da colônia, feijão manteiguinha e feijão de estrada; e na região Sul: feijão miúdo (FREIRE FILHO et al., 2017).

### 2.1.2. Botânica

O feijão-caupi pertence à classe das Dicotiledôneas, família Fabaceae e embora nas primeiras classificações tenha sido inserido em outros gêneros, como *Phaseolus*, atualmente pertence ao gênero *vigna*. Esse gênero possui cerca de 80 espécies, muito embora não exista uma completa concordância no que diz respeito ao número exato de espécies que o compõem (DOVALE et al., 2017; FREIRE FILHO, 1988; FREIRE FILHO et al., 2005).

A espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp., caracteriza-se por possuir plantas herbáceas anuais, que crescem até 80 cm de altura (DOVALE et al., 2017). A partir dessa espécie, estudos têm sido desenvolvidos com a intenção de obter novas cultivares melhoradas para as diversas regiões do País (FREIRE FILHO et al., 2011). Com isso, há alguns anos, várias cultivares vem sendo lançadas no mercado brasileiro, fazendo com que as características encontradas nas plantas de cada cultivar sejam as mais distintas.

O hábito de crescimento pode ser determinado (ápice do caule principal reprodutivo) ou indeterminado (ápice do caule principal vegetativo), o último pode ser subdividido em arbustivo, com ramificação ereta aberta, e trepador (DOVALE et al., 2017). Os tipos de porte em feijão-caupi podem ser ereto (ramo principal ereto e ramos secundários formando ângulos retos ou agudos com o principal), semi-ereto (ramo principal ereto e ramos secundários formando ângulos retos com o principal), semiprostrado (ramo principal reto e ramos secundários inferiores tocando o solo) e prostrado (ramo principal curvado e ramos secundários inferiores tocando o solo) (FREIRE FILHO et al., 2005).

Em condições tropicais, o ciclo do feijão-caupi pode ser classificado em seis grupos: Ciclo superprecoce ou extraprecoce (60 dias), ciclo precoce (61-70 dias), ciclo médio (71-90 dias), ciclo médio-precoce (71-80 dias), ciclo médio-tardio (81-90 dias), ciclo tardio (91 dias) (FREIRE FILHO; RIBEIRO; SANTOS, 2000).

Nota-se uma grande variabilidade quanto à morfologia em plantas de feijão-caupi com outros feijões, mas de modo geral é muito semelhante ao do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) e pode ser dividida em vegetativa e reprodutiva; a vegetativa corresponde à caracterização do sistema radicular, caule, folhas e ramos; e a reprodutiva, caracteriza a inflorescência, frutos e sementes (grãos) (DOVALE et al., 2017).

O sistema radicular do feijão-caupi é do tipo axial, bem desenvolvido e composto por uma raiz principal (pivotante) e a partir dela, muitas raízes laterais (adventícias) (ALBÁN, 2012; DOVALE et al., 2017). A raiz principal apresenta excelente desenvolvimento vertical e sua principal função é a sustentação da planta durante todo seu ciclo de vida; as raízes

secundárias são mais finas que a principal e crescem perpendicularmente a ela, podem crescer até 1,4 m e por isso as plantas de feijão-caupi podem absorver mais água e nutrientes que as plantas de feijão comum (ALBÁN, 2012; FONTANELI; SANTOS; BAIER, 2009).

O caule e ramos geralmente tem forma cilíndrica ou angulada e em sua maioria não pilosos, ocos e apresentam várias colorações, de acordo com a espécie. Os ramos se originam na parte basal do caule e a quantidade é variada. O padrão de crescimento do caule e dos ramos é o que definirá o porte da planta (ALBÁN, 2012; DOVALE et al., 2017; FONTANELI; SANTOS; BAIER, 2009).

As primeiras folhas (primárias ou embrionárias) são unifolioladas (simples) e opostas e, nascem no primeiro nó formado acima do nó de inserção dos cotilédones. As folhas verdadeiras são compostas por três folíolos, presas ao caule por um pecíolo e geralmente são alternadas. Dos três folíolos que compõem a folha, dois são opostos entre si e um é central (terminal), o ultimo apresenta pecíolo mais longo e é o que caracteriza a morfologia da folha. A partir disso, a forma das folhas pode ser linear, lanceolada, sublanceolada, globosa ou subglobosa. A orientação das folhas pode ser plana em variedades cultivadas e ereta em variedades silvestres. A área das folhas aumenta com a idade da planta e suas dimensões variam entre 4 e 11 cm de largura e entre 6 e 16 cm de comprimento (ALBÁN, 2012; DOVALE et al., 2017; FONTANELI; SANTOS; BAIER, 2009; POTTORFF et al., 2012).

As inflorescências são do tipo rácimo, com pedúnculo longo e podem ser simples ou compostas. Elas emergem da axila das folhas contendo entre seis e oito gemas florais e se desenvolvem a partir do terço médio das plantas e daí a floração avança para cima e para baixo. As flores são perfeitas e zigomorfas; compõem a inflorescência em pequenos grupos e, dependendo da variedade, podem ter as colorações branca, branca com manchas roxas, roxa ou amarela (ALBÁN, 2012; DOVALE et al., 2017). O cálice da flor é composto por cinco sépalas unidas (pentâmero e gamossépalo), que tem coloração que varia do verde ao roxo e; a corola possui cinco pétalas livres (pentâmera e dialipétala), sendo uma pétala maior localizada acima e no centro (estandarte), duas pétalas laterais (asas) e duas pétalas inferiores que são unidas (quilha) (DOVALE et al., 2017).

As vagens são os frutos do feijão-caupi e podem variar de acordo com a cultivar. As variações podem ser quanto a sua cor, forma, comprimento e número de sementes. No que se refere a cor, as vagens podem ser totalmente verdes ou, no ponto de colheita, amarelas, rosadas, roxas e rajadas. Devido sua forma reta ou pouco curva, as vagens podem ser retas cilíndricas, retas achatadas, curva cilíndrica e curva achatada. Atingem um tamanho que varia entre 10 e

25 cm de comprimento e 1,5 e 3,2 cm de diâmetro e podem conter de 6 a 21 grãos por vagem (ALBÁN, 2012; DOVALE et al., 2017).

A semente do feijão-caupi é formada pelo embrião, que dá origem às plântulas e pelo tegumento, que pode ser liso ou rugoso. As sementes dessa espécie podem exibir grande diversidade de cores, formas e tamanho. Quanto a forma, são: reniformes, globosas, ovoides e romboides. Quanto ao tamanho, podem variar de 10 a 30g por 100 sementes (DOVALE et al., 2017).

Comercialmente o grão do feijão-caupi é dividido em quatro classes, são elas: branco, preto, cores e misturado. As classes branco e cores possuem subclasses que foram criadas para detalhar ainda mais a classificação dos diferentes grãos comerciais da espécie. A classe branco está subdividida em: branca, brancão e fradinho; e a classe cores em: mulato, canapu, sempre-verde, vinagre, corujinha, azulão, manteiga, verde e rajada (FREIRE FILHO et al., 2005)

### 2.1.3. Fenologia

O conhecimento dos aspectos fenológicos do feijão-caupi é extremamente importante para a condução da cultura em um sistema de produção. A duração dos estádios fenológicos pode sofrer variação devido a cultivar utilizada e o clima do local. Entretanto, em qualquer condição de cultivo há duas fases bem definidas: vegetativa e reprodutiva (CAMPOS et al., 2000; DOVALE et al., 2017). A fase vegetativa é composta por cinco estádios (V0 a V4), assim como a reprodutiva (R5 a R9). Em um cultivo, para que seja considerado o início de cada estádio é necessário que 50% das plantas apresentem as mesmas características (DOVALE et al., 2017; FERNÁNDEZ; GEPTS; LOPEZ, 1982).

A fase vegetativa inicia com a ocorrência da sementeira. Em V0 (germinação), a semente deve ter umidade suficiente para o começo do processo de germinação, isto é, corresponde ao dia da primeira irrigação, ou da primeira chuva. O início do estádio V1 (emergência) se dá quando os cotilédones se encontram no mesmo nível do solo. Ao atingir V2 (folhas primárias), as plantas apresentam folhas unifolioladas totalmente abertas, com suas margens completamente separadas. O estádio V3 (primeira folha trifoliolada) inicia quando a planta apresenta a primeira folha trifoliolada com os folíolos completamente abertos e separados, ao passo que em V4 (terceira folha trifoliolada) isso deve ocorrer para a terceira folha trifoliolada. (CAMPOS et al., 2000; DOVALE et al., 2017; FERNÁNDEZ; GEPTS; LÓPEZ, 1986).

Na fase reprodutiva ocorrem os estádios de prefloração, floração, formação das vagens, enchimento de grãos e maturação fisiológica. Em plantas de hábito de crescimento indeterminado, o desenvolvimento de novas estruturas vegetativas continua mesmo depois de as plantas terem iniciado a fase reprodutiva, enquanto que, em plantas de hábito de crescimento determinado, ao começar a fase reprodutiva, o desenvolvimento de novas estruturas vegetativas é interrompido (FERNÁNDEZ; GEPTS; LÓPEZ, 1986).

O início do estágio R5 se dá com o surgimento do primeiro botão floral no ramo principal da planta; nas plantas de crescimento determinado a floração começa no último nó do caule e continua nos nós inferiores, enquanto que em plantas de crescimento indeterminado o contrário acontece. O estágio R6 é caracterizado pela antese da primeira flor, nesse estágio as plantas apresentam a primeira flor aberta. O estágio R7 inicia quando a planta apresenta a primeira vagem. O início de R8 acontece quando em 50% das plantas o grão começa a preencher a cavidade da vagem. Ao atingir 90% de maturação das vagens, a fase reprodutiva se encerra (R9) e as plantas concluem seu ciclo (CAMPOS et al., 2000; DOVALE et al., 2017; FERNÁNDEZ; GEPTS; LOPEZ, 1982).

#### 2.1.4. Condições edafoclimáticas

O feijão-caupi pode ser cultivado em diversas regiões, desde que estas apresentem condições edafoclimáticas favoráveis ao crescimento e desenvolvimento da cultura, especialmente florescimento e frutificação. Pois estes dependem da resposta ao ambiente (solo e clima).

A exploração comercial do feijão-caupi ocorre, principalmente nos solos das classes: Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Vermelho-Amarelo e Neossolo Flúvico, porém, pode se adaptar a outros solos com baixa fertilidade quando realizada a aplicação de fertilizantes, como os Latossolos e Neossolos Quartzarênicos (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a; MELO; CARDOSO, 2017).

As características físico-químicas do solo influenciam diretamente no crescimento das raízes, interferindo no desenvolvimento e produção da planta. O feijão-caupi, se desenvolve de maneira satisfatória em solos de textura franca (franco-arenosa a franco argilosa), com um certo teor de matéria orgânica, leves, soltos, arejados, profundos, planos ou com pouca declividade, bem drenados, de relativa fertilidade natural, sem problemas de salinidade e levemente ácidos (ALBÁN, 2012; MARTINS; MARTINS; BORGES, 2017; MELO; CARDOSO, 2017; MESQUITA; PINHO; BRAGA, 2017).

A drenagem é um dos fatores mais importantes na escolha do solo, pois a cultura necessita de elevada concentração de oxigênio nas raízes, baixa salinidade e o rígido controle da água disponível (ALBÁN, 2012; OLIVEIRA et al., 2017). As áreas que facilitam a mecanização são as mais indicadas para a instalação de grandes lavouras, pois facilitam o manejo, a colheita e o escoamento da produção (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a).

Quanto ao clima, o feijão-caupi é cultivado nas mais diversas regiões, principalmente em regiões de clima tropical úmido, entre as latitudes 30° N e 30° S (ALBÁN, 2012). Os elementos climáticos, como a precipitação e a temperatura do ar possibilitam o zoneamento de risco climático e a escolha da época adequada para a semeadura da cultura. Outros elementos climáticos, como o fotoperíodo, o vento e a radiação solar, também exercem influência direta ou indireta no crescimento e desenvolvimento dessa cultura (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a).

A semeadura do feijão-caupi deve ser feita no período chuvoso, com a finalidade de se aproveitar a disponibilidade de água para a cultura nesse período, enquanto que a colheita deve coincidir com o período seco, para que não proporcione condições para o crescimento e desenvolvimento de fungos nas vagens, o que pode afetar a qualidade dos grãos. Entretanto, se o cultivo for irrigado o plantio e a colheita podem ser realizados em qualquer época do ano (CARDOSO; MELO, 2017; MENEZES JÚNIOR et al., 2017). A necessidade hídrica da cultura varia de 300 a 450 mm no ciclo (OLIVEIRA et al., 2017). Portanto, o volume pluvial de uma região pode variar de 250 a 500 mm anual, porém as limitações em termos hídricos estão mais relacionadas à distribuição do que à quantidade total de chuvas (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a).

A maior demanda hídrica da cultura ocorre a partir da floração e se estende até antes da colheita, todavia a ocorrência de déficit antes da floração e durante a fase de enchimento de grãos podem causar a quebra de produtividade do feijão-caupi (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2017).

Embora o feijão-caupi consiga se desenvolver e produzir em um intervalo de temperatura do ar de 18 °C e 40 °C, obtém maior produtividade quando cultivado em ambientes com temperaturas entre 20 °C e 35 °C (ALBÁN, 2012).

O elemento climático de maior importância para a cultura é a temperatura, principalmente por sua influência no desenvolvimento vegetativo, na floração e na nodulação (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2017). Temperaturas do ar inferiores a 18 °C prolongam o desenvolvimento vegetativo, atrasam o início da floração e



consequentemente aumentam o ciclo da cultura. Enquanto que temperaturas do ar superiores a 37 °C provocam abortamento de flores, diminui o vingamento e desenvolvimento das vagens e o número de grãos por vagem, além de reduzir o número de plantas com nódulos e o número de nódulos por planta (ALBÁN, 2012; ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2017).

A umidade relativa do ar é outro elemento climático importante no cultivo, pois a umidade excessiva promove a proliferação de doenças e pode causar manchas nos grãos quando as colheitas coincidem com períodos de alta umidade ou chuvas (ALBÁN, 2012).

A radiação solar influencia diretamente no processo fotossintético da planta e na produção de carboidratos (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a). Quando a planta está sob condições favoráveis de solo e clima e as pragas e doenças deixam de ser fatores limitantes, a radiação solar é um dos principais fatores determinantes da máxima produtividade da cultura (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2017). Níveis satisfatórios de radiação solar, em termos de interceptação solar, contribuem para o melhor desenvolvimento e crescimento da planta, além de aumentar a quantidade de pigmentos foliares e contribuir para a fixação das vagens (ALBÁN, 2012; OLIVEIRA et al., 2017).

A velocidade do vento, associada à temperatura do ar é de suma importância no processo evapotranspiratório, pois aumenta o fluxo de vapor d'água da cultura para a atmosfera, através do transporte horizontal de energia de uma região mais seca para outra mais úmida (processo advectivo), auxiliando na remoção do vapor d'água do ar próximo a vegetação para outras regiões. A incidência de ventos constantes pode aumentar a demanda de água pela cultura, tornando-a mais suscetível a períodos curtos de estiagem, afetando o desenvolvimento e o desempenho da cultura (ANDRADE JÚNIOR et al., 2017a; OLIVEIRA et al., 2017). Ventos muito fortes e frequentes podem causar danos às plantas, como a ocorrência de ferimentos nas folhas e pecíolos, favorecendo a disseminação de doenças (OLIVEIRA et al., 2017).

## **2.2. Controles biofísicos da Evapotranspiração**

A necessidade hídrica de uma cultura tem relação direta com sua evapotranspiração. A evapotranspiração (ET) representa a transferência de água na forma de vapor, de uma superfície para a atmosfera, ocorrendo através de dois processos simultâneos: a evaporação (processo físico) e transpiração (processo biofísico) (MARIN; ASSAD; PILAU, 2008; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013; REICHARDT; TIMM, 2017). A evaporação

da água acontece tanto no solo quanto em superfícies livres, como a superfície das folhas, rios e lagos, e por sua vez, a transpiração representa a perda da água localizada dentro dos tecidos vegetais (REICHARDT; TIMM, 2004).

O processo de evapotranspiração envolve o fluxo de massa e de energia na camada atmosférica próxima a superfície vegetal e é limitado, sobretudo pela energia disponível ao sistema e pelo conteúdo de água disponível no solo (ALLEN et al., 1998; FRAGA et al., 2015; REICHARDT; TIMM, 2017; TEIXEIRA, 2001). Esse processo é influenciado, principalmente, por elementos climáticos, como: a radiação líquida, a temperatura e umidade do ar e o vento (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

A radiação líquida representa a principal fonte de energia necessária para dar início ao processo evapotranspiratório, dependendo diretamente da radiação solar incidente e do coeficiente de reflexão (albedo) da vegetação, assim, quanto mais escura a vegetação, mais ela absorve a radiação solar, além da nebulosidade e da presença de vapor d'água na atmosfera esse aporte de energia externo ao sistema, contribui para que ocorra a mudança de fase da água do estado líquido para o estado de vapor (AGUIAR NETTO; BASTOS, 2013; PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013).

Parte da energia que é absorvida pela superfície vegetada, desencadeia uma série de processos físicos e fitofisiológicos que promovem o crescimento e desenvolvimento das plantas que a compõem (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013). Quando a vegetação se encontra em condições hídricas favoráveis, a maior parte dessa energia é utilizada na evapotranspiração na forma de calor latente (responsável pela mudança de estado físico da água). A energia restante desse processo é convertida em calor sensível e utilizada no aquecimento da superfície e posteriormente dissipada, aquecendo também a camada de ar próximo a ela (PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013).

A camada de ar aquecida (menos densa) e também mais úmida se movimenta verticalmente levando o calor sensível e o vapor d'água para camadas mais altas da atmosfera, sendo imediatamente substituída por uma camada de ar mais fria e seca. Esse processo convectivo gera o turbilhonamento da atmosfera e acelera o processo evapotranspiratório (MARIN et al., 2008; PEREIRA; SEDIYAMA; VILLA NOVA, 2013). Assim sendo, a temperatura do ar atuando em conjunto com a umidade relativa do ar, influencia diretamente o déficit de pressão de vapor, de tal modo que, quanto maior a temperatura do ar e menor a umidade relativa do ar, maior será o déficit de pressão de vapor e, portanto, maior será a

capacidade do ar em reter vapor d'água, favorecendo a evapotranspiração (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

O vento também interfere na evapotranspiração através do transporte horizontal de energia de uma região mais seca para outra mais úmida, além disso, auxilia na remoção do vapor de água do ar próximo a vegetação para outras regiões. Portanto, o efeito combinado de todas essas variáveis define a demanda atmosférica por vapor de água (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

Em condições de ótima disponibilidade de água no solo, a perda de água por evapotranspiração, é função da cobertura vegetal e, principalmente, das condições meteorológicas. Assim, a radiação solar, a velocidade do vento, a temperatura e a umidade relativa do ar são os principais parâmetros que irão determinar a magnitude da evapotranspiração (MORA et al., 2009).

Porém, além dos processos físicos, os fenômenos biológicos e características inerentes às plantas também influenciam na evapotranspiração e, por vezes, podem limitar as leis físicas. A demanda atmosférica e as características provenientes da superfície vegetada, regulam aerodinâmica e fisiologicamente a evapotranspiração por meio da rugosidade do dossel e da atividade estomática (FRAGA et al., 2015; SILVA et al., 2012). Estes processos podem ser contabilizados por meio da condutância aerodinâmica e a condutância estomática.

A capacidade da superfície vegetal em transferir água para a atmosfera é chamada de condutância (Kelliher et al., 1995) e pode ser desmembrada em condutância estomática e condutância aerodinâmica.

### **2.2.1. Condutância aerodinâmica**

A condutância aerodinâmica ( $g_a$ ) se caracteriza como um processo de transferência turbulenta de vapor d'água de uma superfície vegetada para a atmosfera, que sofre efeito direto da velocidade do vento, densidade e estrutura do dossel (LIMA, 1996; PEREIRA, 2009).

Uma superfície com cobertura vegetal fechada forma uma zona de transição com a camada de ar circundante, efetuando troca de calor e de vapor d'água através do processo de evapotranspiração. O ar atmosférico, do mesmo modo, interage com maior ou menor dificuldade com a cobertura vegetal. Como em toda superfície rugosa, o escoamento do ar, dado pela velocidade do vento acima de uma cobertura vegetal, gera movimento turbulento em decorrência das forças de atrito que se opõem ao transporte de momentum e que afetam o fluxo vertical de vapor d'água (SANTOS; ANDRÉ, 1993).

A variação dos elementos climáticos na vertical é muito maior do que a variação na horizontal (PEREIRA, 2002). Os movimentos atmosféricos próximos à superfície terrestre são, geralmente, turbulentos, porém, eles não são capazes de se estender até o solo. Pois, uma fina camada de ar se adere com grande intensidade a poucos milímetros da superfície, denominada de camada limite laminar. Nessa camada o transporte vertical ocorre somente por processos moleculares e as taxas de transferências são proporcionais aos gradientes de temperatura do ar (fluxos de calor sensível), umidade específica (fluxo de calor latente de evaporação) e velocidade horizontal do vento (transferência horizontal de momento) (TOLEDO FILHO, 2001). Quanto maior for a turbulência, maior será o coeficiente de difusão de vapor d'água. Este, em conjunto com os gradientes de temperatura e umidade específica (massa de água por unidade de massa de ar) irão produzir a densidade de fluxo de calor sensível e latente na área (RENNÓ, 2003).

A camada limite da atmosfera surge devido à presença das superfícies e é nela que ocorrem a maioria das modificações em decorrência da diferença de rugosidade, aquecimento, resfriamento, dentre outros fenômenos. A turbulência atmosférica próxima a superfície vegetal é provocada por uma rápida e violenta variação da velocidade do vento imposta ao fluxo. A velocidade do vento sempre aumenta com a altura e reduz próximo a superfície, tendendo a zero em consequência da força de atrito gerada (TOLEDO FILHO, 2001).

A quantidade de movimento é absorvida, inicialmente, na camada de transição entre o a superfície da cultura e a atmosfera, geralmente dentro da comunidade. As trocas das propriedades ocorrem a partir de uma altura correspondente ao somatório do parâmetro de rugosidade e do deslocamento do plano zero, onde ocorrem as maiores trocas turbulentas. Em uma superfície cultivada, a irregularidade se estende a poucos metros acima do solo e a camada limite laminar não existe (TOLEDO FILHO, 2001).

Assim, a condutância aerodinâmica para cobertura vegetal de porte elevado é maior, quando comparada a cobertura de porte baixo, pois, do ponto de vista aerodinâmico, uma plantação de porte elevado possui um parâmetro de rugosidade maior, o que lhe confere maior superfície de contato, facilitando a difusão turbulenta (MONTEITH, 1965).

### **2.2.2. Condutância estomática**

A condutância estomática ( $g_s$ ) é um parâmetro fisiológico pelo qual as plantas controlam as trocas gasosas. Geralmente, a superfície das folhas é envolvida por uma membrana, semipermeável ao vapor d'água, possuindo estruturas minúsculas denominadas de estômatos. Estas estruturas são os órgãos da folha que permitem as trocas gasosas e são muito

sensíveis, sendo que a abertura e o fechamento dependem de fatores como a radiação solar, a temperatura, a umidade do solo, o potencial de água na folha e no solo, o déficit entre a pressão de vapor do ar e nos estômatos e o estado nutricional da folha (JARVIS; MCNAUGHTON, 1986; RADERSMA; RIDDER, 1996).

A  $g_s$  é controlada pelas células guarda que controlam a abertura estomatal através da sua turgidez, sendo assim, a condutância é proporcional ao diâmetro da abertura estomatal. Portanto, o controle estomático determina a demanda transpirativa a que as folhas estão potencialmente sujeitas e, portanto, determina a taxa de crescimento da planta (JARVIS; MCNAUGHTON, 1986; RADERSMA; RIDDER, 1996).

### **2.2.3. Fator de desacoplamento**

A relação entre as condutâncias estomática e aerodinâmica da equação de Penman-Montheith (1961), levou ao desenvolvimento do conceito do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) por McNaughton & Jarvis (1983) (FRAGA et al., 2015; SILVA et al., 2012). Esse fator é um indicativo da interação da superfície com a atmosfera nos processos de evapotranspiração do vegetal.

Este fator permite distinguir o grau de controle do processo de evapotranspiração entre a vegetação associada a condição atmosférica (umidade, temperatura do ar e condições de estabilidade atmosférica e vento) e o saldo de radiação (SOUZA FILHO, 2002). Estabelecendo-se a influência na troca de vapor d'água (evapotranspiração) é principalmente controlada pelo déficit de pressão de vapor e a condutância estomática (forte acoplamento) ou pelo saldo de radiação e a condutância aerodinâmica (fraco acoplamento) (SILVA et al., 2012).

Os valores de  $\Omega$  variam entre 0 e 1. Quando igual ou próximo a 0, o controle biótico sobre a evapotranspiração é grande, indicando que a evapotranspiração tem maior controle exercido pelas condições atmosféricas reinantes associadas ao controle fisiológico das plantas, ou seja, ao déficit de pressão de vapor e a condutância estomática. Enquanto que quando igual ou próximo a 1, as condições externas são determinantes no processo, indicando que a evapotranspiração é mais dependente do saldo de radiação e a condutância aerodinâmica.

## Referências

- AGUIAR NETTO, A. de O.; BASTOS, E. A. **Princípios agronômicos da irrigação**. 1. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 164 p.
- ALBÁN, M. **Manual de cultivo de frijol caupi**. 1. ed. Piura: Asociación de productores agropecuarios del distrito de Morropón, 2012.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations., 1998.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de et al. **Cultivo do feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2017.
- CAMPOS, F. et al. Ciclo fenológico em caupi (*Vigna unguiculata* L.Walp.): uma proposta de escala de desenvolvimento. **Rev. Cient. Rural**, v. 5, n. August, p. 110–116, 2000.
- CARDOSO, M. J.; MELO, F. de B. Manejo cultural. In: CARDOSO, M. J. et al. (Eds.). . **Feijão-caupi: o produtor pergunta, a embrapa responde**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 107–115.
- DEAN, W. A botânica e a política imperial: a introdução e a domesticação de plantas no Brasil. **Revista Estudos Históricos**, v. 4, n. 8, p. 216–228, 1991.
- DOVALE, J. C. et al. Botânica e Fenologia. In: DOVALE, J. C.; BERTINI, C. H. C. DE M.; BRÉM, A. (Eds.). . **Feijão-caupi: do plantio à colheita: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2017. p. 35–51.
- FERNÁNDEZ, F.; GEPTS, P.; LOPEZ, M. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol común: guía de estudio**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1982.
- FERNÁNDEZ, F.; GEPTS, P.; LÓPEZ, M. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.)**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1986.
- FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. DOS; BAIER, A. C. Morfologia de Leguminosas. In: FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. DOS; FONTANELI, R. S. **FORAGEIRAS PARA INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA NA REGIÃO SUL-BRASILEIRA**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. p. 239–246.
- FRAGA, C. I. de M. et al. Condutância do dossel, condutância aerodinâmica e fator de desacoplamento em floresta de *Vochysia divergens* phol (Vochysiaceae) no pantanal brasileiro.

**Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 3, p. 275–284. 2015.

FREIRE FILHO, F. R. Origem, evolução e domesticação do caupi. In: ARAÚJO, J. P. P. DE; WATT, E. E. (Eds.). **O caupi no Brasil**. 1. ed. Embrapa, 1988. p. 21.

FREIRE FILHO, F. R. et al. Melhoramento genético. In: FREIRE FILHO, F. R.; LIMA, J. A. DE A.; RIBEIRO, V. Q. **Feijão-caupi: avanços tecnológicos**. 1. ed. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2005. p. 29–75.

FREIRE FILHO, F. R. et al. **Feijão-Caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. 1. ed. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011.

FREIRE FILHO, F. R. et al. A cultura: aspectos socioeconômicos. In: DOVALE, J. C.; BERTINI, C.; BORÉM, A. **Feijão-caupi: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2017. p. 9–34.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; SANTOS, A. A. dos. Cultivares de caupi para região Meio-Norte do Brasil. In: CARDOSO, M. J. **A cultura do feijão caupi no Meio-Norte do Brasil**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2000. p. 67–88.

LOPES, L. M. de S. **A alimentação no Brasil colônia**. Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium, 2009.

MARIN, F. R.; ASSAD, E. D.; PILAU, F. G. **Clima e ambiente: introdução à climatologia para ciências ambientais**. Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2008. 127 p.

MARTINS, C. M.; MARTINS, S. C. S.; BORGES, W. L. Correção da acidez, adubação e fixação biológica. In: DOVALE, J. C.; BERTINI, C. H. C. M.; BORÉM, A. **Feijão-caupi: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2017. p. 89–112.

MELO, F. de B.; CARDOSO, M. J. Manejo de solo. In: CARDOSO, M. J. et al. **Feijão-caupi: o produtor pergunta, a embrapa responde**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 67–74.

MENEZES JÚNIOR, J. Â. N. de et al. Feijão-caupi safrinha. In: **Feijão-caupi: o produtor pergunta, a embrapa responde**. Brasília: Embrapa, 2017. p. 201–212.

MESQUITA, R. O.; PINHO, J. L. N. de; BRAGA, M. de M. Preparo do solo e plantio. In: DOVALE, J. C.; BERTINI, C. H. C. M.; BORÉM, A. **Feijão-caupi: do plantio à colheita**. Viçosa: Editora UFV, 2017.

- MONTEITH, J. L. **Evaporation and environment**. In: FOGG, G. F. **The state and movement of water in living organism**. Nova Iorque: Academic Press, 1965. p. 205-234.
- MORA, A. L. et al. **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009.
- OLIVEIRA, A. B. de et al. Exigências edafoclimáticas e ecofisiológicas. In: DOVALE, J. C.; BERTINI, C. H. C. M.; BORÉM, A. **Feijão-caupi: do plantio à colheita**. Viçosa: UFV, 2017. p. 52–69.
- PEREIRA, A. R. **Introdução à micrometeorologia**. Piracicaba: Departamento de Ciências Exatas da ESALQ, 2002. 72 p.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L.; SENTELHAS, P. **Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas**. 2002.
- PEREIRA, D. dos R. **Evapotranspiração em área de Mata Atlântica na região da Serra da Mantiqueira, MG**. 2009. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. 323 p.
- POTTORFF, M. et al. Leaf morphology in Cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp]: QTL analysis, physical mapping and identifying a candidate gene using synteny with model legume species. **BMC Genomics**, v. 13, n. 1, p. 1, 2012.
- RADERSMA, S; RIDDER, N. Computed evapotranspiration of annual and perennial crops at different temporal and spatial scales using published parameter values. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 31, p. 17-34, 1996.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: Conceitos, Processos e Aplicações**. 2. ed. Editora Monole, 2017. 524 p.
- RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. 158 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- SANTOS, R. Z. dos; ANDRÉ, R. G. B. Relações energéticas e aerodinâmicas em uma cultura de feijão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 1, n. 1, p. 11–18, 1993.



SILVA, T. G. F. da et al. Fator de desacoplamento em um canal irrigado no submédio do Vale do São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 849–858. 2012.

SOUZA FILHO, J. D. D. C. **Variação Sazonal dos componentes do balanço de radiação e energia sobre floresta de Caxiuanã**. Universidade Federal de Viçosa, 2002.

TEIXEIRA, A. H. de C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 28–32, 2001.

TOLEDO FILHO, M. da R. **Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-áçúcar em Alagoas**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

### **3. CONTROLES BIOFÍSICOS DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM CULTIVO DE FEIJÃO-CAUPI SOB DIFERENTES REGIMES HÍDRICOS NO NORDESTE PARAENSE, BRASIL**

**Resumo:** O objetivo desse trabalho foi analisar as variações do fator desacoplamento, das condutâncias aerodinâmica e estomática para o feijão-caupi submetido a diferentes disponibilidades hídricas e durante os estádios fenológicos reprodutivos da cultura no nordeste paraense. O estudo foi conduzido no município de Castanhal, nordeste do estado do Pará, em uma área cultivada com feijão-caupi, nos anos de 2013, 2014 e 2015 com quatro tratamentos de irrigação (T100, T50, T25 e T0). A interação entre a cultura e a atmosfera na troca de vapor d'água foi estimada através do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ). O  $\Omega$  esteve entre 0,5 e 1, exceto para o tratamento sem irrigação, indicando um desacoplamento de moderado a alto entre a cultura e a atmosfera, de modo que o processo de troca de vapor d'água foi controlado pelo suprimento de energia, ao invés do controle estomático.

**Palavras-chave:** fator de desacoplamento, *Vigna unguiculata* (L.) Walp, condutância aerodinâmica, condutância estomática

#### **Biophysical controls to evapotranspiration in cowpea cultivation under different water systems in the northeast of paraense**

**Abstract:** The objective of this work was to analyze the variations of the decoupling factor, the aerodynamic and stomatal conductance for the cowpea submitted to different water availability and during the reproductive phenological stages of the crop in northeastern Pará. The study was conducted in the municipality of Castanhal, northeast of the State of Pará, in an area planted with cowpea, in the years 2013, 2014 and 2015 with four irrigation treatments (T100, T50, T25 and T0). The interaction between the culture and the atmosphere in the water vapor exchange was estimated by the decoupling factor ( $\Omega$ ). The  $\Omega$  was between 0.5 and 1, except for the

treatment without irrigation, indicating a moderate to high decoupling between the culture and the atmosphere, so that the water vapor exchange process was controlled by the energy supply, rather than stomatal control.

**Key word:** decoupling factor, *Vigna unguiculata* (L.) Walp, aerodynamic conductance, stomatal conductance

### 3.2. INTRODUÇÃO

Apesar de o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) ser relativamente tolerante ao déficit hídrico, perdas de até 76% na produtividade podem acontecer quando este ocorre durante a fase reprodutiva da cultura (Lima et al., 2011). Com o intuito de fazer o manejo adequado da irrigação e mitigar essas perdas é de fundamental importância a determinação da necessidade hídrica da cultura, que pode ser obtido por meio da quantificação das perdas de água via evapotranspiração.

A demanda atmosférica e as características provenientes da superfície vegetada, regulam aerodinâmica e fisiologicamente a evapotranspiração por meio da rugosidade do dossel e da atividade estomática (Fraga et al., 2015; Silva et al., 2012). A condutância aerodinâmica está relacionada com os processos atmosféricos turbulentos e é o parâmetro que representa a condutividade dessa atividade turbulenta na camada de ar próxima a superfície. A condutância estomática é a variável fisiológica que controla o fluxo de vapor d'água da folha para atmosfera através do poro estomático e é o mecanismo que melhor representa o controle da evapotranspiração no vegetal (Paulino Junior et al., 2017).

Com base na associação dessas condutâncias aerodinâmica e estomática da equação de Penman-Montheith (Allen et al., 1998), McNaughton & Jarvis (1983) desenvolveram o conceito do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ), que é um indicativo da interação da superfície com a atmosfera, permitindo estabelecer se a evapotranspiração é principalmente controlada pelo

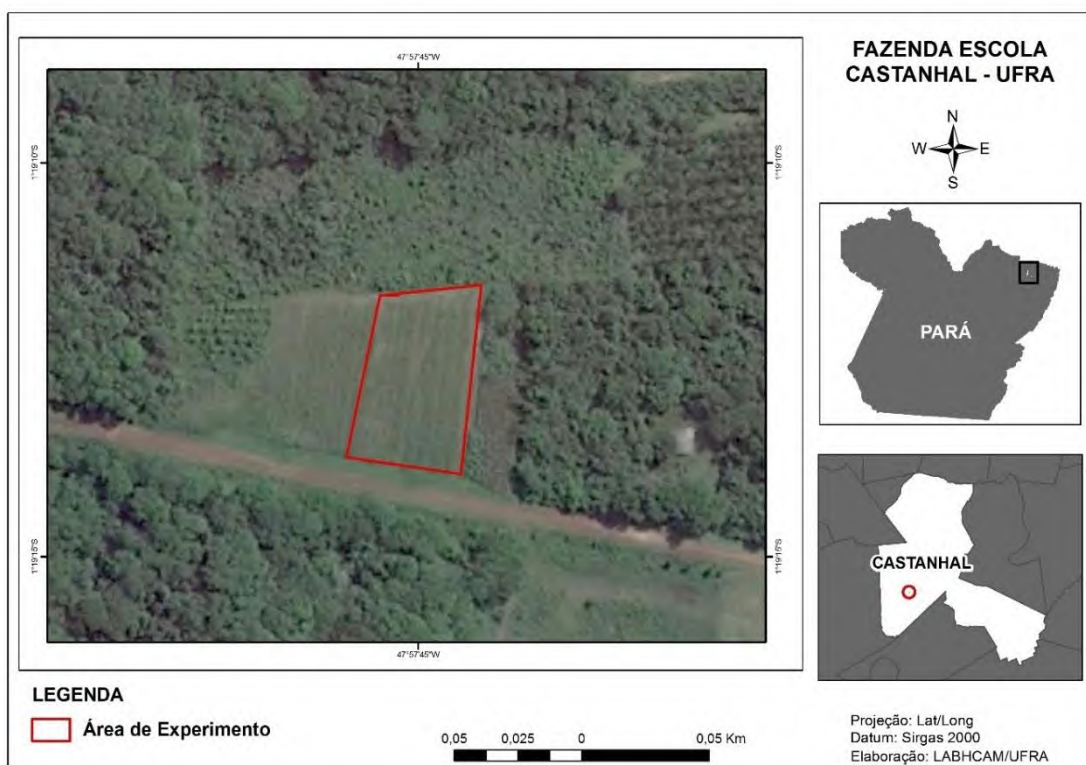
déficit de pressão de vapor e a condutância estomática ou pelo saldo de radiação (Silva et al., 2012; Fraga et al., 2015).

Diante disso, objetivou-se analisar as variações do fator desacoplamento, das condutâncias aerodinâmica e estomática para o feijão-caupi submetido a diferentes disponibilidades hídricas e durante os estádios fenológicos reprodutivos da cultura no nordeste paraense.

### 3.3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Fazenda Escola de Castanhal (FEC) pertencente à Universidade Federal Rural da Amazônia, localizada no município de Castanhal, nordeste do estado do Pará, Brasil ( $1^{\circ}19'24,48''$  S;  $47^{\circ}57'38,20''$  W) (Figura 3.1).

**Figura 3.1.** Localização da área experimental



O clima da região é Am (tropical de monções), segundo classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013), apresentando moderada estação seca com precipitação

pluvial média anual de 2.500 mm. O período mais seco do ano ocorre entre os meses de junho a novembro, enquanto que de dezembro a maio ocorre o período de maior pluviosidade. A temperatura média anual é de 27 °C; com máximas e mínimas de 35 e 18 °C, respectivamente. A umidade relativa média é de 82,5%; a insolação média anual é de 2.300 h; a velocidade média dos ventos é de 1,75 m s<sup>-1</sup> (RAMOS; SANTOS; FORTES, 2009; TENÓRIO et al., 1999).

O solo da área de estudo foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico Fase Pedregosa I (Concrecionário Laterítico) (TENÓRIO et al., 1999). Foram realizadas coletas de amostras de solo para a caracterização física (amostra indeformada) e química (amostra deformada), na profundidade de 0 a 20 cm que corresponde à profundidade efetiva do sistema radicular. As amostras foram encaminhadas e analisadas pelo Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental com sede na cidade de Belém. Os dados obtidos de densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, granulometria e os resultados químicos do solo para os anos de experimento estão presentes na Tabela 3.1. A composição textural do solo o caracteriza como um solo arenoso.

**Tabela 3.1.** Características químicas e físicas do solo da área experimental.

<b>Características</b>	<b>Profundidade (0-20 cm)</b>
pH em H <sub>2</sub> O	4,9
N (%)	0,05
P (mg/dm <sup>3</sup> )	2
K <sup>+</sup> (mg/dm <sup>3</sup> )	26
Na <sup>2+</sup> (mg/dm <sup>3</sup> )	9
Ca <sup>2+</sup> (cmol/dm <sup>3</sup> )	0,5
Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> (cmol/dm <sup>3</sup> )	0,8
Al <sup>3+</sup> (cmol/dm <sup>3</sup> )	0,8
Areia (g/kg)	835
Silte (g/kg)	125
Argila (g/kg)	40
Densidade do solo (g/cm <sup>3</sup> )	1,56
Capacidade de campo (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	0,20
Ponto de Murcha Permanente (m <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	0,11

**Fonte:** Laboratório de Solos da Embrapa Amazônia Oriental

O ensaio ocorreu entre outubro e dezembro de 2013 e de setembro a novembro em 2014 e 2015, em uma área de 1,5 ha nos três anos. A cultivar utilizada foi a BR3-Tracuateua, a

qual possui hábito de crescimento indeterminado, porte prostrado, ciclo de 60-70 dias; mais recomendada para as condições edafoclimáticas do nordeste paraense (FREIRE FILHO et al., 2009).

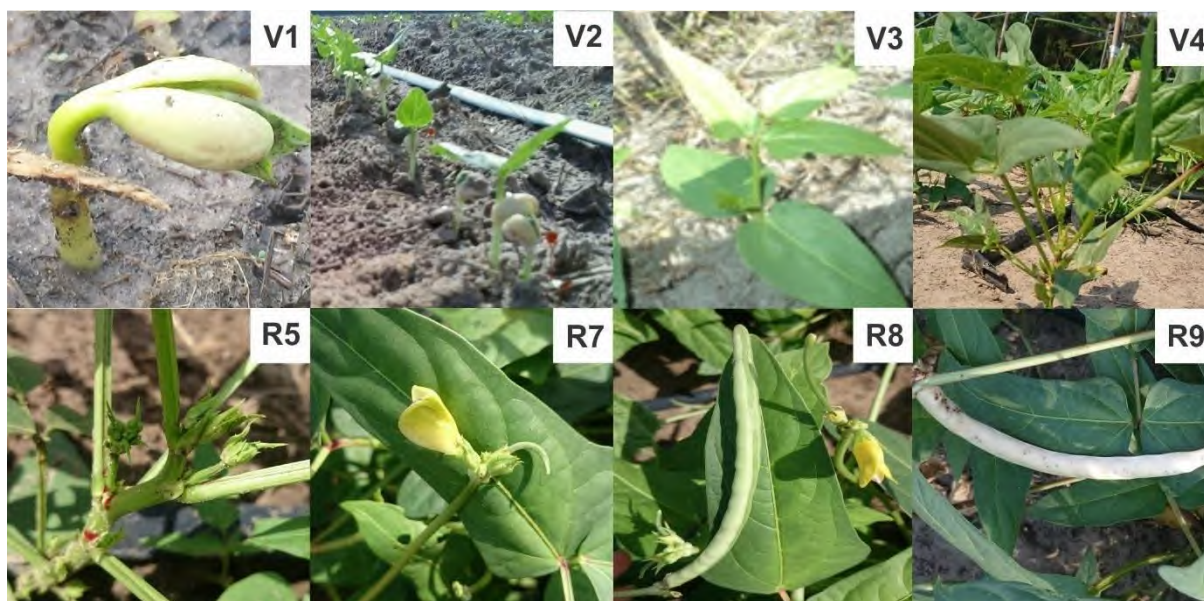
O preparo da área foi realizado de forma convencional. A semeadura foi realizada manualmente na área. O espaçamento utilizado foi 0,5 m entre linhas e 0,1 m entre plantas. O desbaste foi feito no décimo sexto dia após a semeadura afim de ajustar a densidade de plantas e manter apenas dez plantas por metro linear. A cultura recebeu todos os tratamentos culturais necessários para que o genótipo expressasse seu máximo potencial produtivo, incluindo controle de pragas e doenças conforme recomendação para a cultura.

A calagem e a adubação foram realizadas conforme os resultados das análises químicas do solo (Tabela 3.1), utilizou-se 350 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante químico (Uréia, super fosfato triplo e cloreto de potássio) da formulação 10-20-20, seguindo as recomendações de adubação da Embrapa Amazônia Oriental. A primeira adubação foi feita durante a semeadura e a segunda 30 dias após a germinação, sendo que na segunda aplicação foi utilizado apenas o cloreto de potássio (KCl), que foi fracionado em 50% para a primeira e 50% para a segunda adubação.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, composto por seis blocos e quatro tratamentos. As unidades experimentais consistiram de blocos separados por bordadura de 2 metros, que continham os quatro tratamentos.

Utilizou-se a escala fenológica proposta por Fernández, Gepts, López (1986), ajustada para o feijão-caupi por Farias et al. (2015) (Figura 3.2), considerando-se para este experimento os seguintes estádios: R5 (primeiro botão floral), R7 (primeira vagem tipo canivete), R8 (enchimento de grãos) e R9 (maturação fisiológica). O acompanhamento fenológico foi realizado diariamente desde a semeadura até a colheita em todos os anos.

**Figura 3.2.** Estádios fenológicos do feijão-caupi.



**Imagens:** Thaynara Ramos

Durante a fase vegetativa, o cultivo de feijão-caupi foi uniformemente irrigado em escala diária por meio de um sistema de gotejamento, com vazão média, medida no campo, de  $0,605 \text{ L h}^{-1}$  por gotejador, para uma pressão de 5 mca, de modo a repor a água perdida pela evapotranspiração da cultura. Após a instalação do sistema de irrigação, foram realizadas avaliações hidráulicas para a determinação do desempenho do mesmo. Quando o sistema completou quatro anos de operação no ano de 2015, a eficiência de aplicação ( $E_{ap}$ ) foi avaliada pelo critério de Bernardo et. al (2006) e apresentou  $E_{ap}$  acima de 80%, considerada “aceitável” pelo critério de avaliação.

A partir da fase reprodutiva da cultura foram iniciados quatro tratamentos (T100, T50, T25 e T0), visto que é a fase mais sensível ao déficit hídrico (PINTO; TÁVORA; GONÇALVES, 2005). O cultivo foi submetido a diferentes intensidades de restrição hídrica, as quais consistiram na reposição de diferentes percentuais da água perdida por evapotranspiração, T100 – reposição de 100% da evapotranspiração de cultura ( $ET_c$ ); T50 – reposição de 50% da  $ET_c$ ; T25 – reposição de 25% da  $ET_c$  e T0 – reposição de 0% da  $ET_c$  (sem irrigação). Devido ao estudo ter sido conduzido em campo, as plantas também receberam água

proveniente de eventuais chuvas que ocorreram durante os experimentos. Quando ocorria eventos de chuva que suplantassem a ET<sub>c</sub>, a irrigação era suspensa, afim de não elevar a umidade do solo (Us) acima da capacidade de campo.

O balanço hídrico sequencial foi realizado conforme Carvalho et al. (2011), afim de quantificar as deficiências impostas pelos tratamentos submetidos ao déficit hídrico. A profundidade efetiva do sistema radicular e a capacidade de água disponível (CAD) utilizados foram 250 mm e 52,88 mm, respectivamente (SOUZA et al., 2017a).

Para a obtenção das lâminas de irrigação, a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi estimada pelo método de Penman Monteith-FAO (ALLEN et al., 1998), em escala diária com dados coletados em uma estação automática do INMET localizada a 3 km da área. A evapotranspiração de cultura (ET<sub>c</sub>) foi definida pelo produto entre a ET<sub>o</sub> e o coeficiente de cultura (K<sub>c</sub>) de acordo com Bastos et al. (2008) para cada estágio fenológico. A ET<sub>c</sub> foi considerada como a lâmina líquida (LL) de irrigação. A lâmina bruta (LB) a ser aplicada, foi obtida pela relação entre a LL e a eficiência de aproveitamento de água (E<sub>a</sub>) do sistema, considerada como 85%.

Os dados meteorológicos foram coletados por sensores instalados em uma torre micrometeorológica de 3,0 m de altura instalada na área experimental. A torre apresentava bordadura superior a razão 1:100, na direção predominante dos ventos (de nordeste), para evitar que os efeitos advectivos interferissem nas medidas realizadas no cultivo (SOUZA et al., 2011).

Foram monitoradas as seguintes variáveis meteorológicas: temperatura e umidade do ar (HMP155A, Vaisala, Helsinki, Finlândia), radiação global incidente (CMP3, Kipp & Zonen, Delft, Países Baixos), pressão atmosférica (278, Setra, Boxborough, EUA), velocidade do vento (Marine 05106, Young, Traverse city, USA), precipitação (TB4, Campbell Scientific, Logan, USA) e umidade do solo (CS615, Campbell Scientific, Logan, USA). Os sensores foram conectados a um datalogger (CR1000, Campbell Scientific, Logan, USA) e a um multiplexador



(AM416, Campbell Scientific, Logan, USA), sendo realizadas leituras a cada 10 segundos e gravação das médias e totais a cada 10 minutos. Para este estudo foram consideradas as médias horárias no intervalo de 8 às 16h nos dias de coleta da condutância estomática.

Para determinação do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) da atmosfera de McNaughton & Jarvis (1983) foi utilizado o método descrito por Silva et al. (2012), a fim de avaliar a sensibilidade da evapotranspiração do feijão-caupi ao controle climático ou biológico para a região de estudo (Equação 1). Quando  $\Omega$  é igual ou próximo a 0 (zero), o controle é exercido pelo déficit de pressão de vapor e pela condutância estomática, ou seja, o fator biótico predomina sobre a evapotranspiração, e quando  $\Omega$  está próximo a 1 (um), as condições externas são determinantes no processo, sobretudo o saldo de radiação.

$$\Omega = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{g_a}{g_s}\right)} \quad (1)$$

em que  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de saturação do vapor versus a temperatura (kPa °C<sup>-1</sup>);  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico (kPa °C<sup>-1</sup>);  $g_a$  e  $g_s$  são as condutâncias aerodinâmicas (m s<sup>-1</sup>) e da superfície (m s<sup>-1</sup>), respectivamente.

A condutância estomática à difusão de vapor ( $g_s$ ) foi mensurada por meio de um sistema portátil de análise de gases por infravermelho (IRGA LI-6400, Li-Cor, Nebraska, EUA). Para o protocolo de coleta foram fixados os valores de fluxo de fótons (PPFD) em 1.500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e concentração de CO<sub>2</sub> em 400  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ; a temperatura e a umidade relativa do ar seguiram as condições ambientais.

As medidas foram realizadas a partir do início dos tratamentos, em dias pré-definidos correspondentes aos estádios fenológicos, R5, R7, R8 e R9 (Tabela 3.2), entre 8 e 16h, com intervalos de uma hora entre as medições. Foram selecionadas duas plantas por tratamento, nos

seis blocos. As coletas foram realizadas no folíolo central da terceira ou quarta folha, contadas a partir do ápice; as folhas estavam em bom estado fitossanitário e completamente expandidas.

**Tabela 3.2.** Dias após a semeadura definidos para a coleta de dados de condutância estomática.

Estádios Fenológicos	DAS		
	2013	2014	2015
R5	-	37	34
R7	41	43	39
R8	47	50	46
R9	58	57	58

DAS – Dias após a semeadura

A condutância aerodinâmica ( $g_a$ ) foi obtida através da inversão da equação 2 (ALLEN et al., 1998) e 3.

$$r_a = \frac{\ln\left[\frac{Z_m - d}{Z_{0m}}\right] \ln\left[\frac{Z_h - d}{Z_{0h}}\right]}{k^2 U_z} \quad (2)$$

em que  $r_a$  é a resistência aerodinâmica ( $m s^{-1}$ );  $Z_m$  é a altura de medição da velocidade do vento (m);  $d$  é deslocamento do plano zero do perfil do vento (m);  $Z_{0m}$  é parâmetro de rugosidade para momentum (m);  $k$  é constante de Von Kármán (0,41);  $U_z$  é a velocidade do vento a uma altura  $Z$  ( $m s^{-1}$ );  $Z_h$  é a altura de medição da umidade do ar (m);  $Z_{0h}$  é o parâmetro de rugosidade para calor sensível e vapor d'água (m).

O deslocamento do plano zero ( $d$ ) e o parâmetro de rugosidade para momentum ( $Z_{0m}$ ) foram estimados através da altura média das plantas ( $h$ ) por meio das equações 3 e 4 (BRUTSAERT, 1982).

$$d = \frac{2}{3} h \quad (3)$$

$$Z_{0m} = 0,123 * h \quad (4)$$

Por sua vez, o parâmetro de rugosidade que governa a transferência de calor sensível e vapor d'água ( $Z_{oh}$ ) foi obtido a partir das estimativas de  $Z_{om}$ , considerando-se a seguinte relação (ALLEN et al., 1998):

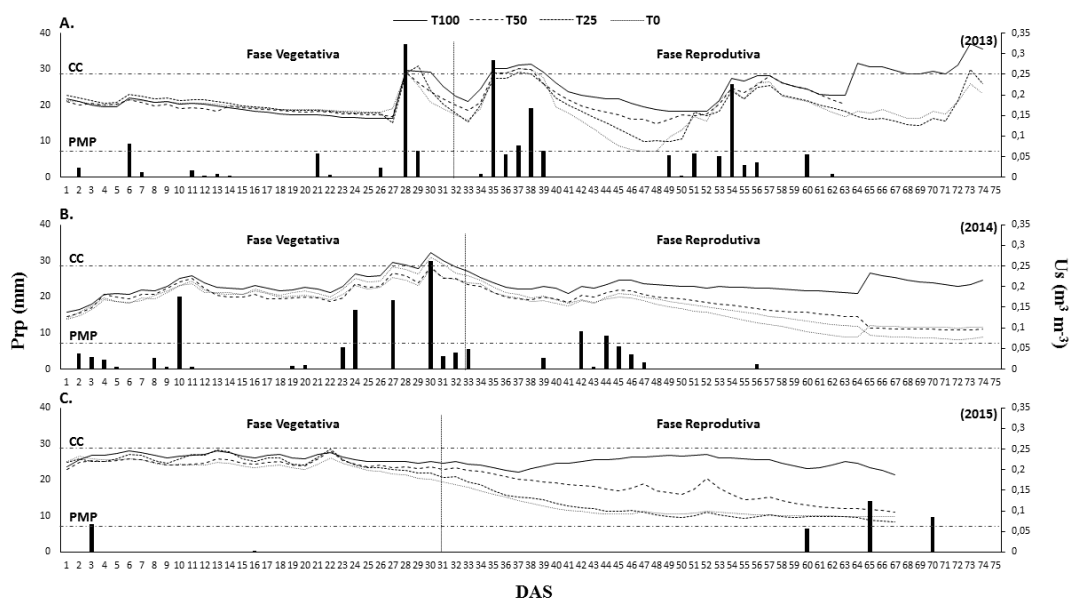
$$Z_{oh} = 0,1 * Z_{om} \quad (5)$$

A altura média das plantas foi determinada pela média da altura de plantas escolhidas de forma aleatória (2 por bloco e 12 por tratamento) nos mesmos dias em que foram realizadas as coletas de  $g_s$ . A altura foi medida desde o solo até a folha localizada no ponto mais alto da planta. Conforme as observações em campo, não houve diferença relevante na altura das plantas entre os tratamentos, provavelmente devido a todos os tratamentos, na fase inicial (vegetativa), terem sido irrigados igualmente afim de suprir a necessidade de germinação e estabelecimento da cultura.

Os dados das variáveis climáticas foram analisados através de estatística descritiva por meio das médias e desvio padrão e, os dados de  $U_s$ ,  $g_s$ , e  $\Omega$  submetidos a análise de variância (ANOVA) e ao teste Tukey com significância de 0,05.

### **3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

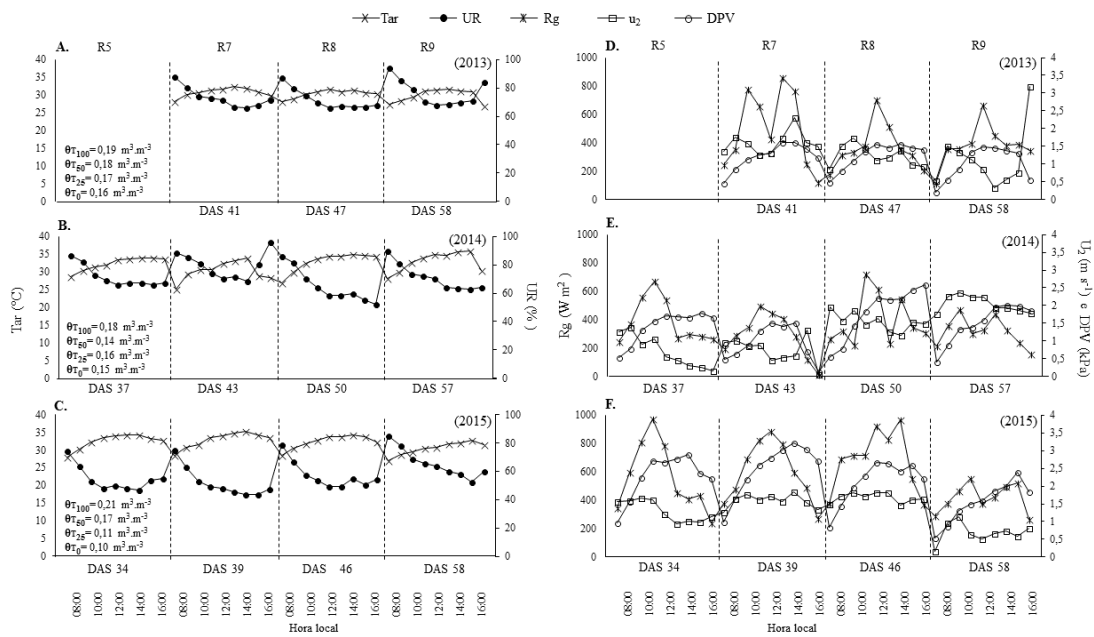
O total de chuvas observado durante os experimentos de 2013, 2014 e 2015 foram, respectivamente, 207,51, 158,49 e 30,73 mm. O cenário das condições hídricas do solo está apresentado na Figura 3.3. As poucas chuvas no ano de 2015 estão relacionadas à ocorrência do fenômeno atmosférico-oceânico El Niño na região (Grimm, 2015), que inibe a formação de nuvens, condição que desfavorece a ocorrência de chuvas no leste da Amazônia (Coelho et al., 2012).



**Figura 3.3.** Precipitação (Prp) e umidade do solo (Us) ao longo do ciclo do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) nos anos de 2013 (A), 2014 (B) e 2015 (C), sob as condições climáticas do município de Castanhal-Pa; o início do período reprodutivo ocorreu nos DAS 32, 33 e 31, respectivamente para os anos de 2013, 2014 e 2015

Apesar da diferença no volume de chuvas entre os anos de experimento, especialmente, no ano de 2015, a oferta de água por irrigação, manteve a umidade do solo entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) para todos os tratamentos durante toda a fase vegetativa (Figura 3.3).

Para o período diurno dos dias selecionados para o estudo, a temperatura do ar (Tar) média foi  $30,82 \pm 0,17$  °C (2013),  $30,54 \pm 1,01$  °C (2014) e  $33,00 \pm 0,38$  °C (2015); e a umidade relativa do ar (UR) média foi  $70,76 \pm 2,13\%$  (2013),  $68,93 \pm 8,54\%$  (2014) e  $53,66 \pm 6,74\%$  (2015) (Figura 2). A radiação solar global (Rg) média foi  $385,60 \pm 47,43$  W m<sup>-2</sup> (2013),  $310,15 \pm 18,59$  W m<sup>-2</sup> (2014) e  $524,23 \pm 134,63$  W m<sup>-2</sup> (2015). A menor amplitude de variação da Tar observada no período diurno em 2015 (Figura 3.4) esteve relacionada a ocorrência do fenômeno El Niño. Assim como os elevados valores de Rg, visto que a radiação global incidente é favorecida em função da baixa nebulosidade (Campos & Alcantara, 2016).



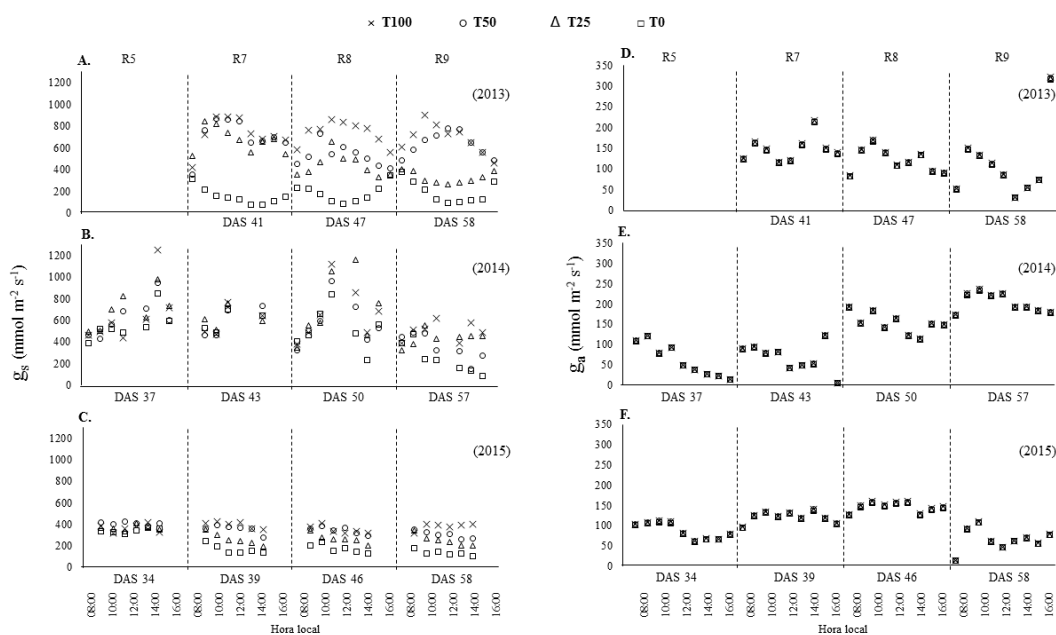
**Figura 3.4.** Variação média horária de elementos climáticos durante o período diurno em quatro estádios fenológicos representativos da fase reprodutiva da cultura do feijão-caupi irrigado (cv. BR3-Tracuateua), nos anos de 2013 (A e D), 2014 (B e E) e 2015 (C e F), sob as condições climáticas do Nordeste paraense. Umidade relativa do ar (UR) e Temperatura do ar (Tar); Radiação solar global (Rg), Velocidade do vento ( $U_2$ ), e Déficit de pressão de vapor d’água (DPV)

A velocidade do vento ( $U_2$ ) média foi  $1,19 \pm 0,36 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (2013),  $1,20 \pm 0,63 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (2014) e  $1,41 \pm 0,48 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (2015). No DAS 58 (2015), nota-se que há uma redução na velocidade do vento, quando comparado com os outros dias, possivelmente devido a diminuição da radiação solar, neste dia. O déficit de pressão de vapor d’água (DPV) médio foi  $1,31 \pm 0,08 \text{ kPa}$  (2013),  $1,62 \pm 0,52 \text{ kPa}$  (2014) e  $2,89 \pm 0,31 \text{ kPa}$  (2015). Os elevados valores de DPV no ano de 2015 demonstraram a alta demanda atmosférica por vapor d’água. A elevada capacidade da atmosfera em absorver vapor d’água faz com que o ar tenha uma tendência a ser mais seco, fato explicado pela reduzida precipitação observada nesse período.

Os valores de condutância estomática e aerodinâmica encontram-se na Figura 3.5. O padrão de variabilidade diurna da condutância estomática foi semelhante ao padrão das variáveis climáticas, sobretudo com a radiação solar, temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor evidenciando uma relação entre ambas (Oliveira et al., 2005). Lima et al. (2016), em estudo

com feijão-caupi sob condições ótimas de água no solo, mostra que a condutância estomática é modulada principalmente por essas três variáveis.

Esse comportamento também é influenciado pela umidade do solo (Oliveira; et al., 2005), e claramente essa interferência é evidenciada através da resposta entre os diferentes tratamentos (Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Variação média horária da condutância estomática ( $g_s$ ) e da condutância aerodinâmica ( $g_a$ ) durante o período diurno em quatro estádios fenológicos representativos da fase reprodutiva da cultura do feijão-caupi irrigado (cv. BR3-Tracuateua), nos anos de 2013 (A e D), 2014 (B e E) e 2015 (C e F), sob as condições climáticas do Nordeste paraense. Tratamentos: T100 (x); T50 (o); T25 ( $\Delta$ ); T0 ( $\square$ ).

Em escala horária para T100, T50 e T25, nota-se que o aumento da  $g_s$ , no início do período diurno, esteve associado à disponibilidade de energia, que favoreceu a troca de vapor d'água entre planta e atmosfera através da abertura dos estômatos. Também há o fechamento estomático e redução da  $g_s$  logo após o período de máxima radiação solar.

Ao longo do dia o aumento da Tar e DPV impulsionam a saída de vapor d'água da folha para a atmosfera, desta forma a  $g_s$  diminui na tentativa de reduzir a perda de água da planta. Ao entardecer, apesar da redução tanto da Tar como da DPV os estômatos tendem a se fechar em

resposta a redução da radiação (Mott, 2009), assim a  $g_s$  tende a um valor mínimo e constante no fim do período diurno (Pimenta, 2008).

Por volta do meio-dia solar ocorrem os maiores valores de  $g_s$ , isso também foi constatado no estudo de Oliveira et al. (2005) com a cultura do feijão para os tratamentos que recebiam reposição parcial da ETc. Percebe-se o aumento significativo da condutância estomática nos tratamentos irrigados (T100, T50 e T25) a partir das 10h, pois as plantas se encontram em condições hídricas favoráveis a ocorrência do processo de evapotranspiração. No T0 ocorre uma redução desses valores possivelmente em razão de um desequilíbrio entre a taxa de perda de vapor d'água e o suprimento hídrico das plantas, havendo diminuição do poro estomático e consequentemente da taxa de transpiração.

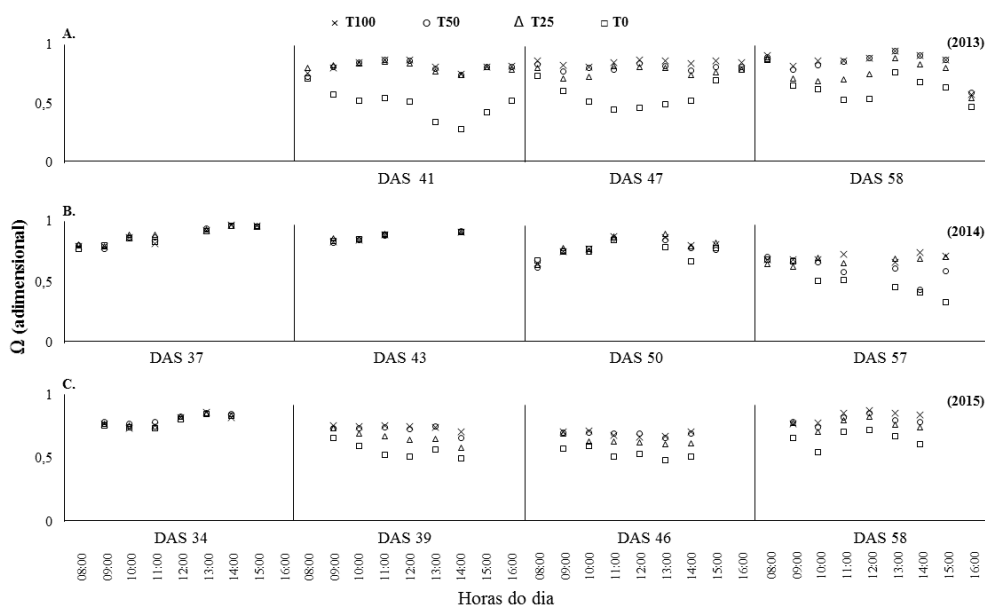
A condutância aerodinâmica apresentou variabilidade semelhante a verificada para a velocidade do vento ao longo do dia, indicando que as grandezas são diretamente proporcionais e que com o aumento da velocidade do vento a troca de vapor d'água entre a cultura e a atmosfera é favorecida, pois o processo de evapotranspiração é facilitado em função do aumento da condutância aerodinâmica (Souza Filho et al., 2005).

Vale salientar que a  $g_a$  variou também de um estágio de desenvolvimento para o outro, aumentando do estágio R5 até o R8. Por se tratar de uma cultivar de crescimento indeterminado, as plantas continuam seu crescimento ao longo do período reprodutivo, isso contribui para o aumento da altura das plantas, proporcionando maior rugosidade da superfície, o que lhe confere maior superfície de contato, facilitando a difusão turbulenta de vapor d'água (Monteith, 1965). Entretanto, no estágio R9 houve um decréscimo da  $g_a$  devido a redução da estrutura das plantas.

Em termos diários, observou-se uma tendência da condutância aerodinâmica apresentar valores elevados nas primeiras horas do dia, principalmente devido aos elevados valores de velocidade do vento nesse período. Isso contribuiu para que a camada limite se tornasse mais

final e, apesar do fechamento estomático no mesmo período, o DPV facilitou o processo de transferência de vapor d'água entre as folhas e a atmosfera.

A variação do fator de desacoplamento para os três anos de experimento está apresentada na Figura 3.6. As plantas submetidas ao tratamento T0 apresentaram tendência ao acoplamento com a atmosfera, enquanto que as plantas irrigadas (T100, T50 e T25) estiveram desacopladas durante quase todos os estádios de desenvolvimento, possivelmente por estarem recebendo incremento hídrico. Porém, o tratamento T25 quando exposto a um prolongado período de irrigação deficitária apresentou variação semelhante ao tratamento T0.



**Figura 3.6.** Variação média horária do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) durante o período diurno em quatro estádios fenológicos representativos da fase reprodutiva da cultura do feijão-caupi irrigado (cv. BR3-Tracueteua), nos anos de 2013, 2014 e 2015, sob as condições climáticas do Nordeste paraense. Tratamentos: T100 (x); T50 (o); T25 ( $\Delta$ ); T0 ( $\square$ ).

Os valores médios do fator de desacoplamento, da condutância estomática e da umidade do solo estão apresentados na Tabela 2. Consta-se que os tratamentos condicionados a estresse hídrico (T50, T25, T0) apresentam valores médios de  $\Omega$ ,  $g_s$  e  $U_s$  mais baixos, sobretudo no ano de 2015.



**Tabela 3.3.** Dados médios do fator de desacoplamento ( $\Omega$ ) e de variáveis relacionadas para 4 estádios fenológicos representativos da fase reprodutiva da cultura do feijão-caupi irrigado (cv. BR3- Tracuateua), nos anos de 2013, 2014 e 2015, sob as condições climáticas do Nordeste paraense.

		$\Omega$ (adimensional)			$g_s$ (mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )			$U_s$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		
		2013	2014	2015	2013	2014	2015	2013	2014	2015
<b>R5</b>	T100		0,89*	0,80*		641,39*	366,44*		0,18 bB	0,20 aA
	T50		0,90*	0,83*		639,17*	416,44*		0,16 dB	0,19 bA
	T25		0,91*	0,81*		721,56*	369,87*		0,18 aA	0,15 cB
	T0		0,89*	0,80*		560,56*	352,79*		0,17 cA	0,14 dB
<b>R7</b>	T100	0,80 aB	0,89 aA	0,75 aC	739,01 aA	648,43 aA	627,50 aA	0,19 aB	0,19 aB	0,21 aA
	T50	0,89 aB	0,89 aA	0,72 abC	714,44 aA	662,83 aA	316,62 bB	0,18 bA	0,14 dC	0,17 bB
	T25	0,82 aB	0,90 aA	0,66 bC	680,01 aA	635,56 aA	266,37 bcB	0,17 cB	0,17 bA	0,12 cC
	T0	0,50 bB	0,89 aA	0,57 cB	160,96 bB	620,83 aA	175,93 cB	0,16 dA	0,15 cB	0,11 dC
<b>R8</b>	T100	0,86 aA	0,81 aA	0,70 aB	743,49 aA	727,22 aA	352,31 aB	0,15 aC	0,17 aB	0,23 aA
	T50	0,82 abC	0,79 aA	0,70 aB	536,70 bA	624,72 aA	343,87 aB	0,14 aB	0,13 cC	0,17 bA
	T25	0,78 bA	0,81 aA	0,64 aB	445,02 bB	755,83 aA	270,38 aC	0,06 bC	0,15 bA	0,10 cB
	T0	0,59 cB	0,78 aA	0,54 bB	193,13 cB	570,67 aA	175,04 aB	0,06 bC	0,15 bA	0,10 cB
<b>R9</b>	T100	0,86*	0,71*	0,83*	696,21 aA	520,06 aB	386,24 aC	0,23 aA	0,16 aC	0,21 aB
	T50	0,85*	0,61*	0,80*	640,41 aA	346,87 bB	309,37 abB	0,21 bA	0,09 dC	0,12 bB
	T25	0,77*	0,68*	0,77*	334,86 bB	445,72 abA	260,33 bB	0,20 cA	0,11 cB	0,08 dC
	T0	0,65*	0,50*	0,65*	201,85 cA	235,30 cA	141,90 cA	0,19 dA	0,12 bB	0,09 cC

$\Omega$  - fator de desacoplamento (adimensional);  $g_s$  - Condutância estomática (mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);  $U_s$  - Umidade do solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>).

Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Letras minúsculas referem-se à comparação entre tratamentos e letras maiúsculas a comparação entre anos.

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

\*As médias que não estão seguidas por letras, não foram submetidas ao teste de comparação de médias por que o F de interação não foi significativo.

O  $\Omega$  nos estádios R5 e R9 não apresentou diferença entre os tratamentos. Em R5, possivelmente porque ainda estavam sobre interferência da não diferenciação dos tratamentos na fase vegetativa, tanto que a  $g_s$  nesse estádio também não apresenta diferença estatística. Nesse estádio os tratamentos deficitários (T50, T25 e T0) submeteram o feijão caupi a deficiências hídricas acumuladas muito baixas, respectivamente de 0,24; 0,53 e 0,92 mm em 2014 e de 0,16; 0,36 e 0,64 mm em 2015. Em R9, provavelmente devido ao estádio de maturação fisiológica ser atingido antes pelas plantas dos tratamentos irrigados (T100, T50 e T25).

Para o  $\Omega$  não houve diferença estatística entre os tratamentos em 2014 nos estádios R7 e R8 e se constatou diferença significativa a partir do estádio R7 em 2013 e R8 em 2015. Entre os anos, não houve diferença estatística para 2013 e 2014 no estádio R8.

As médias de  $U_s$  mostram que quando há baixa disponibilidade hídrica para a planta, a evapotranspiração da cultura tende a ser controlada pela planta. As plantas do tratamento T100, em condições favoráveis de disponibilidade hídrica ( $U_s \approx 0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), puderam manter amplamente a abertura estomática durante o dia, favorecendo as trocas gasosas, de tal modo que o controle da evapotranspiração é exclusivamente aerodinâmico e dependente da disponibilidade energética.

O tratamento T25, mesmo recebendo 25 % de reposição da  $ET_c$ , vaiou a  $g_s$  de 721,56  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (R5) para 445,72  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (R9) em 2014 e de 369,87  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (R5) para 260,33  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (R9) em 2015 em consequência da diminuição da  $U_s$  de 0,18  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  (R5) para 0,11  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  (R9) em 2014 e de 0,15  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  (R5) para 0,08  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  (R9) em 2015 ocasionando uma redução nos valores de  $\Omega$  de 0,91 (R5) para 0,68 (R9) em 2014 e de 0,81 (R5) para 0,77 (R9) em 2015, portanto tendendo ao acoplamento da cultura com a atmosfera.

Entretanto em 2013, para este mesmo tratamento (25%), a  $g_s$  diminuiu de 680,01  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (R7) para 334,86  $\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (R9), assim como o  $\Omega$  de 0,82 (R7) para 0,77 (R9), apesar do aumento na  $U_s$  de 0,17  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  (R5) para 0,20  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$  (R9). Ressalta-se, porém, que o aumento na umidade do solo se deu por ocasião de eventos de chuva entre os DAS 48 e 59, totalizando 123,63 mm de entrada no solo, o que acabou eliminando temporariamente as diferenças entre os tratamentos.

Até o período anterior à ocorrência das chuvas, os tratamentos deficitários (T50, T25 e T0) submeteram o feijão caupi a deficiências hídricas acumuladas de 3,56; 7,55 e 12,67 mm, respectivamente, neste ano de 2013, o que pode ter sido o motivo das reduções observadas tanto na condutância como no fator de desacoplamento no período posterior. Resultados de estudos sobre reidratação do feijão-caupi após períodos de déficit hídrico, tem mostrado que a cultura apresenta recuperação de todas as variáveis fisiológicas, mesmo submetida a estresse moderado ou severo (Nogueira et al., 2015).

Verifica-se que as plantas reduzem a  $g_s$  afim de minimizar a perda de água e, portanto, o controle da evapotranspiração passa a ser estomático e em função do DPV. O mesmo aconteceu para o tratamento não irrigado (T0), em que as plantas reduziram a  $g_s$  em consequência do mecanismo de controle de abertura e fechamento estomático para minimizar as perdas de vapor d'água por evapotranspiração.

As médias do  $\Omega$  demonstraram que para os tratamentos com incremento hídrico (T100, T50 e T25) houve maior controle da evapotranspiração por fator energético, enquanto que para o tratamento T0 há uma tendência ao controle estomático. No entanto, nota-se que no tratamento não irrigado os valores de  $\Omega$  foram próximos ou ligeiramente superiores a 0,5, indicando que a cultura se encontra desacoplada da atmosfera mesmo que em menor grau, quando se compara com os demais tratamentos.

### **3.4. CONCLUSÕES**

1. A condutância estomática variou em função da radiação global incidente, temperatura do ar, déficit de pressão do vapor d'água e do conteúdo de água no solo. A condutância aerodinâmica variou em função da velocidade do vento e da altura das plantas.
2. A variação do fator de desacoplamento ao longo do dia se dá em decorrência da variação da condutância estomática em função da disponibilidade de radiação solar.
3. A cultura do feijão-caupi apresentou valores de  $\Omega$  que indicaram desacoplamento entre a cultura e a atmosfera em todos os tratamentos testados, porém, este desacoplamento foi menos expressivo para o tratamento sem irrigação.

## **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da pesquisa (processo nº 483402/2012-5) e a bolsa de produtividade do quinto autor (processo nº 311145/2013-2).

## **LITERATURA CITADA**

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. 1998.

Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; de Moraes, G.; Leonardo, J.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711–728, 2013.

Bastos, E. A.; Ferreira, V. M.; da Silva, C. R.; de Andrade Júnior, A. S. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do Feijão-caupi no Vale do Gurugúia, Piauí. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 13, p. 182–190, 2008.

Brutsaert, W. *Evaporation into the atmosphere*. Reidel: Dordrecht, 1982. 299 p.

Campos, M. S.; Alcantara, L. D. S. Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 31, p. 570–579, 2016.

Carvalho, H. P.; Dourado Neto, D.; Teodoro, R. E. F.; Melo, B. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. *Bioscience Journal*, v. 27, p. 221–229, 2011.

Coelho, C. A.; Cavalcanti, I. A.; Costa, S. M.; Freitas, S. R.; Ito, E. R., Luz, G.; Pezza, A. B. Climate diagnostics of three major drought events in the Amazon and illustrations of their seasonal precipitation predictions. *Meteorological Applications*, v. 19, p. 237–255, 2012.

Farias, V. D. D. S.; Lima, M. J. A. D.; Nunes, H. G. G. C.; Sousa, D. D. P.; Souza, P. J. D. O. P. Water demand, crop coefficient and uncoupling factor of cowpea in de eastern Amazon. *Revista Caatinga*, v. 30, p. 190–200, 2017.

Fernández, F.; Gepts, P.; López, M. Etapas de desarrollo de la planta de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1986.

Fraga, C. I. D. M.; Sanches, L.; Junior, O. B. P.; Curado, L. F. A.; Gaio, D. C. Condutância do dossel, condutância aerodinâmica e fator de desacoplamento em floresta de *Vochysia divergens* phol (*Vochysiaceae*) no pantanal brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, p. 275–284, 2015.

Freire Filho, R.; Cravo, M. da S.; Ribeiro, V. Q.; de Rocha, M. M.; de Castelo, E. O; Brandão, E. dos S.; Melo, M. Í. S. de. BRS Milênio e BRS urubuquara: cultivares de feijão-caupi para a região bragantina do Pará. *Revista Ceres*, v. 56, p. 749–752, 2009.

Grimm, A. M. El Niño, novamente! *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, p. 351–357, 2015.

Lima, J. R. D. S.; Antonino, A. C. D; Lira, C. A. B. de O; Souza, E. S. de; Silva, I. D. F. da. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, p. 65-74. 2011.

Lima, M. J.; Farias, V. D.; Costa, D. L.; Sampaio, L. S.; Souza, P. J. Efeito combinado das variáveis meteorológicas sobre a condutância estomática do feijão-caupi. *Horticultura Brasileira*, v. 34, p. 547–553, 2016.

McNaughton, K. G.; Jarvis, P. G. Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: Kozlowski, T. T. *Water deficits and plant growth*. Academic Press, 1983. v.7, p.1-47.

Monteith, J. L. Evaporation and environment. In: Fogg, G. F. *The state and movement of water in living organism*. Academic Press, 1965. p. 205-234.

Mott, Keith A. Opinion: stomatal responses to light and CO<sub>2</sub> depend on the mesophyll. *Plant, Cell & Environment*, v. 32, p. 1479-1486, 2009.

Nogueira, N. W.; de Freitas, R. M. O.; Luiz, J.; Dombroski, D.; Procópio, I. J. S.; de Cássia Araújo, R. Ecofisiologia de plantas de feijão-caupi sob efeito de estresse hídrico e reidratação nos sistemas de plantio direto e convencional. *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 2015.

Oliveira, A. D. de; Fernandes, E. J.; Rodrigues, T. De J. D. Condutância estomática como indicador de estresse hídrico em feijão. *Engenharia Agrícola*, v. 25, p. 86–95, 2005.

Paulino Junior, N.; Von Randow R. DE C.; Von Randow, C. Analysis of biological and meteorological controls of evapotranspiration in pristine forests and a pasture site in Amazonia. *Revista Ambiente & Água*, v. 12, p. 179–191, 2017.

Pinto, J. L. N. DE; Távora, F. J. A. F.; Gonçalves, J. A. Aspectos Fisiológicos. In: Freire Filho, F. R.; Lima, J. A. de A.; Ribeiro, V. Q. Feijão-caupi: avanços tecnológicos. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2005. p. 191–210.

Pimenta, J. A. Relações Hídricas. In: Kerbaui, G.B. Fisiologia Vegetal. Guanabara Koogan, 2008. p. 1-32.

Ramos, A. M.; Santos, L. A. R. dos; Fortes, L. T. G. Normais climatológicas do Brasil 1961-1990. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2009.

Silva, T. G. D. da; Zolnier, Z.; de Moura, M. S.; do Carmo, J. F.; Ribeiro, A. Fator de desacoplamento em um canal irrigado no submédio do Vale do São Francisco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, p. 849–857, 2012.

Souza Filho, J. D. C.; Ribeiro, A.; Costa, M. H.; Cohen, J. C. P. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. *Acta Amazônica*, v.35, p.223-229, 2005.

Souza P. J. de O. P. de; Ribeiro, A.; da Rocha, E. J. P.; Botelho, M. D. N.; Sousa, A. M. L. de;

Souza, E. B. de; Farias, J. R. B. Impacts of soyabean expansion on the Amazon energy balance: a case study. *Experimental Agriculture*, v. 47, p. 553–567, 2011.

Souza, P. J. de O. P. de; Farias, V. D. de S.; Lima, M. J. A. de; RAMOS, T. F.; Sousa, A. Cowpea Leaf area, biomass production and productivity under different water regimes in Castanhal, Pará, Brazil. *Revista Caatinga*, v. 30, p. 748–759, 2017.

Tenório, A. R. D. M. Mapeamento dos solos da estação de piscicultura de Castanhal, PA. FCAP - Faculdade de Ciências Agrárias do Pará. Informe técnico, 1999.