



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA**

JOÁS DE SOUZA GOMES

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DE PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO SUBMETIDO A
ESTRESSE POR DÉFICIT HÍDRICO**

**AREIA
2021**

JOÁS DE SOUZA GOMES

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DE PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO SUBMETIDO A
ESTRESSE POR DÉFICIT HÍDRICO**

Trabalho de graduação apresentado à
Coordenação do Curso de Agronomia, do
Centro de Ciências Agrárias, da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Mário Luiz Farias
Cavalcanti.

AREIA

2021

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G633a Joás de Souza Gomes.

Análises fisiológicas e de produção do feijoeiro
submetido a estresse por déficit hídrico / Joás de
Souza Gomes. - Areia:UFPB/CCA, 2021.
65 f. : il.

Orientação: Mário Luiz Farias Cavalcanti.
TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Agronomia. 2. Feijão-caupi. 3. Vigna unguiculata.
4. Fisiologia vegetal. I. Cavalcanti, Mário Luiz
Farias. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 631/635(02)

JOÁS DE SOUZA GOMES

**ASPECTOS FISIOLÓGICOS E DE PRODUÇÃO DO FEIJOEIRO SUBMETIDO
A ESTRESSE POR DÉFICIT HÍDRICO**

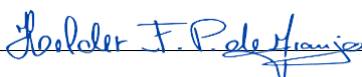
Trabalho de graduação apresentado à
Coordenação do Curso de Agronomia, do
Centro de Ciências Agrárias, da
Universidade Federal da Paraíba, em
cumprimento às exigências para obtenção do
título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovado em 16/07/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Mário Luiz Faria Cavalcanti (Orientador)
Departamento de Biociências/CCA/UFPB



Prof. Dr. Helder Farias Pereira de Araújo
Departamento de Biociências/CCA/UFPB



Prof. Dr. João Everthon da Silva Ribeiro
Departamento de Tecnologia em Gestão do Agronegócio/CESITA/UEMA

Dedico este estudo a minha esposa e aos meus filhos, como prova de que jamais podemos desistir de nossos sonhos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela incomensurável beleza que encontro nas coisas da Natureza.

A minha amada esposa, Tamy Tomé, pelo amor, companheirismo e paciência demonstrados no decorrer desta pesquisa e em todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, minha avó e minhas tias, pela compreensão por minha ausência nas reuniões familiares.

Aos professores do Curso de Agronomia, da UFPB, que contribuíram ao longo desses semestres, por meio das disciplinas e debates, para o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos funcionários da UFPB, pela presteza e atendimento quando nos foi necessário.

Aos colegas de curso, pelos momentos de amizade e apoio.

Gratidão a todos!

“Querendo combater a seca, nunca ganharemos. A convivência com o semiárido procura entender a natureza cada vez mais e organizar a vida e a produção conforme os parâmetros encontrados”.

Haroldo Schistek (Agrônomo, Idealizador do Instituto Regional da Pequena Agropecuária Apropriada – IRPAA)

RESUMO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) é de origem africana e foi introduzido no Brasil, pelos colonizadores portugueses, na segunda metade do século XVI. É cultivado em mais da metade dos estados brasileiros, em regime de três safras. É muito importante para a segurança alimentar, devido à presença de proteínas e carboidratos, além de sua produção gerar emprego e renda em regiões mais secas do país. É uma planta resistente ao estresse causado por déficit hídrico, fator que beneficia a sua produção de terceira safra, quando as chuvas já cessaram. O objetivo deste estudo foi analisar a influência do estresse por déficit hídrico na fisiologia e produção da cultura do feijão-caupi. Para isto, foram selecionadas quatro cultivares do feijão-caupi, cultivadas no estado da Paraíba, sendo elas, Corujinha, Macaíba Branca, Roxinho e Sempre Verde. Buscou-se conhecer a necessidade mínima de irrigação e sua influência nas variáveis fisiológicas, como valores de fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração, carbono interno, eficiência no uso de água e eficiência instantânea da carboxilação e nas variáveis de produção, como número de vagens maduras, número de sementes, número de sementes por vagens maduras e peso de 100 sementes. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. O déficit hídrico causou redução nas trocas gasosas avaliadas a partir da taxa fotossintética líquida, condutância estomática, da concentração de CO₂ interno, transpiração, déficit de pressão de vapor, eficiência instantânea do uso da água e carboxilação, em todo o desenvolvimento fenológico e em todos os genótipos. Foi observada menor altura das plantas, importante redução na fixação das flores, na produção de vagens e enchimento dos grãos. Na fase de crescimento inicial, observou-se tolerância ao déficit hídrico, porém ficou visível o afastamento da média por parte do fenótipo Roxinho, se comparado aos outros fenótipos, caracterizando um retardo de seu desenvolvimento fisiológico em relação aos demais fenótipos. Por outro lado, o fenótipo Sempre Verde se apresentou com maior tolerância ao estresse hídrico, resultando em maior produtividade.

Palavras-chave: feijão-caupi; *vigna unguiculata*; fisiologia vegetal.

ABSTRACT

Cowpea beans (*Vigna unguiculata*) is of African origin and introduced in Brazil by Portuguese colonists in the second half of the 16th century. It is cultivated in more than half of the Brazilian states, in a regime of three harvests. It is very important for food security, due to the presence of proteins and carbohydrates, in addition to its production generating employment and income in drier regions of the country. It's a plant resistant to the stress caused by water deficit, a factor that benefits its third crop production, when the rains have already stopped. The aim of this study was to analyze the influence of water stress on the physiology and production of the cowpea crop. For this, four cultivars of cowpea beans, cultivated in the state of Paraíba, were selected, namely, Corujinha, Macaíba Branca, Roxinho and Sempre Verde. We sought to know the minimum need for irrigation and its influence on physiological variables such as net photosynthesis values, stomatal conductance, transpiration, internal carbon, water use efficiency and instantaneous carboxylation efficiency and on production variables such as number of pods ripe seeds, number of seeds, number of seeds per mature pods and weight of 100 seeds. The experimental design completely randomized. The water deficit caused a reduction in gas exchange evaluated from the net photosynthetic rate, stomatal conductance, internal CO₂ concentration, transpiration, vapor pressure deficit, instantaneous water use efficiency and carboxylation, throughout phenological development and in all the genotypes. Lower plant height observed, with a significant reduction in flower fixation, pod production and grain filling. In the initial growth phase, tolerance to water deficit observed, but the deviation from the mean by the Roxinho phenotype was visible, when compared to the other phenotypes, characterizing a delay in its physiological development in relation to the other phenotypes. On the other hand, the Evergreen phenotype showed greater tolerance to water stress, resulting in higher productivity.

Keywords: cowpea beans; *vigna unguiculata*; plant physiology.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise de variância (ANOVA) para número de vagens maduras (NVM).....	41
Tabela 2 – Teste de Tukey do fator cultivares para número de vagens maduras (NVM).....	41
Tabela 3 – Médias da interação cultivar x água disponível para número de vagens maduras (NVM).....	42
Tabela 4 – Análise de variância (ANOVA) para número de sementes (NS).....	43
Tabela 5 – Teste de Tukey do fator cultivares para número de sementes (NS).....	43
Tabela 6 – Médias da interação cultivar x água disponível para número de sementes (NS).....	44
Tabela 7 – Análise de variância (ANOVA) para número de sementes por vagens maduras (NSVM).....	44
Tabela 8 – Teste de Tukey do fator cultivares para número de sementes por vagens maduras (NSVM).....	45
Tabela 9 – Regressão polinomial para NVM, em função da água disponível (AD).....	45
Tabela 10 – Análise de variância (ANOVA) para peso de 100 sementes (P100).....	46
Tabela 11 – Teste de Tukey do fator cultivares para peso de 100 sementes (P100).....	46
Tabela 12 – Regressão polinomial para peso de 100 sementes (P100), em função da Água Disponível.....	47
Tabela 13 – Análise de variância (ANOVA) para taxa de fotossíntese líquida (A).....	47
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA) para condutância estomática (Gs).....	48
Tabela 15 – Teste de Tukey do fator cultivares para condutância estomática (Gs).....	48
Tabela 16 – Médias da interação Cultivar x Água Disponível para condutância estomática (Gs).....	49
Tabela 17 – Análise de variância (ANOVA) para concentração de CO ₂ interno (Ci).....	49
Tabela 18 – Teste de Tukey do Fator Cultivares para concentração de CO ₂ interno (Ci).....	50
Tabela 19 – Médias da interação cultivar x água disponível para concentração de CO ₂ interno (Ci).....	51
Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA) para transpiração (E).....	51
Tabela 21 – Teste de Tukey do fator cultivares para transpiração (E).....	52
Tabela 22 – Regressão polinomial para transpiração (E) em função da água disponível.....	52
Tabela 23 – Análise de variância (ANOVA) para eficiência instantânea do uso da água (A/E).....	53
Tabela 24 – Teste de Tukey do fator cultivares para eficiência instantânea do uso da água (A/E).....	53
Tabela 25 – Médias da interação cultivar x água disponível para eficiência instantânea do uso da Água (A/E).....	54
Tabela 26 – Análise de variância (ANOVA) para eficiência da carboxilação (A/Ci).....	54
Tabela 27 – Regressão polinomial para eficiência da carboxilação (A/Ci), em função da água disponível.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Algumas espécies de feijão-caupi cultivadas no Brasil.....	16
Figura 2 – Mapas da produção agrícola – safras de feijão-caupi, 2019/2020.....	18
Figura 3 – Resultados da análise do solo relacionado ao experimento.....	39
Figura 4 – Vasos com solo e cultivares de feijão-caupi.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Taxa de fotossíntese líquida
ABA	Ácido abscísico
ANOVA	Análise de variância
ATP	Trifosfato de adenosina
CAD	Capacidade de armazenamento de água disponível às plantas
CV	Coeficiente de variação
COVID-19	<i>Coronavirus Disease</i> , surgida em 2019
dms	Diferença mínima significativa
E	Transpiração foliar
ETc	Evapotranspiração da cultura
F	Estatística do Teste “F”
FAD	Fração de água disponível às plantas
FV	Fonte de variação
GL	Graus de liberdade
Gs	Condutância estomática
IRGA Modelo LICOR XT 6400	<i>Infra Red Gas Analyzer</i>
Mpa	Megapascal
ns	Não significativo, quando analisado por meio do Teste “F”
NS	Número de sementes
NSV	Número de sementes por vagem
NVM	Número de vagens maduras
Ph	Potencial hidrogeniônico
QM	Quadrado médio
R/PA	Relação raiz/parte aérea
SQ	Soma do quadrado
Teste “F”	Teste que compara vários coeficientes de modelos lineares ao mesmo tempo

LISTA DE SÍMBOLOS

A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Valores da fotossíntese líquida
A/Ci	Eficiência da carboxilação
AD	Água disponível
A/E	Eficiência instantânea do uso da água
Al ⁺⁺⁺	Íon de alumínio
bar	Unidade de pressão atmosférica
C	Carbono
C1	Cultivar Corujinha
C2	Cultivar Macaíba Branca
C3	Cultivar Roxinho
C4	Cultivar Sempre Verde
Ci	Concentração de CO ₂ interno
Ci ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	Valores de carbono interno
cm	Centímetro
C x AD	Interação cultivar x água disponível
E	Transpiração foliar
E ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Valores de transpiração
EUA A/E ($(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$)	Valores da eficiência no uso da água
EiC A/Ci ($(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1})$ ($\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$)	Valores da eficiência instantânea da carboxilação
F1	Cultivar
F2	Água disponível
Gs	Condutância estomática
Gs ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Valores de condutância estomática
H ₂ O	Água
H ⁺	Íon de hidrogênio ou hidrônio
K ⁺	Íon de potássio
Kg	Quilograma
L1	40% de água disponível (AD)
L2	60% de água disponível (AD)
L3	80% de água disponível (AD)
L4	100% de água disponível (AD)

Mg^{+2}	Íon de magnésio
$\pm$	Mais ou menos
$-\Delta\Psi$	Menor variação do potencial hídrico
Planta C4	Planta que minimiza a fotorrespiração, separando as etapas da fixação inicial de CO_2 e o ciclo de Calvin, no espaço, em células diferentes
Planta CAM	Planta com metabolismo ácido das crassuláceas, que minimizam a fotorrespiração e armazenagem de água, separando estas etapas entre noite e dia (tempo)
P100	Peso de 100 sementes maduras
%	Porcentagem
Ψ_w	Potencial hídrico
Ψ_s	Componente osmótica do Ψ_w
Ψ_p	Pressão do Ψ_w
r	Coeficiente de correlação
R^2	Coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	A CULTURA DO FEIJÃO-CAUPI.....	16
2.2	O DÉFICIT HÍDRICO E O DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS.....	20
2.3	ESTABELECIMENTO DO ESTRESSE HÍDRICO NA PLANTA.....	22
2.4	ESTRATÉGIAS DE RESISTÊNCIA À SECA.....	23
2.5	FISIOLOGIA DO ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS.....	24
2.5.1	Efeitos e reações ocasionadas pelo estresse hídrico em plantas.....	24
2.5.1.1	<i>Desenvolvimento da área foliar e senescência das plantas</i>	<i>24</i>
2.5.1.2	<i>Redução da expansão da área foliar.....</i>	<i>26</i>
2.5.1.3	<i>Aumento da camada cerosa na cutícula foliar.....</i>	<i>26</i>
2.5.1.4	<i>Fechamento dos estômatos.....</i>	<i>27</i>
2.5.2	Fotossíntese e acumulação de carboidratos nas plantas	29
2.5.2.1	<i>Limitação da fotossíntese.....</i>	<i>30</i>
2.5.2.2	<i>Alteração na dissipação de energia nas folhas.....</i>	<i>31</i>
2.5.3	O déficit hídrico e o sistema radicular das plantas.....	32
2.5.4	O ajustamento osmótico das células.....	33
2.5.5	Alteração do padrão de crescimento da planta.....	35
2.5.5.1	<i>Aumento da resistência ao fluxo de água.....</i>	<i>36</i>
3	MATERIAL E MÉTODOS	38
3.1	VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS.....	40
3.2	VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
5	CONCLUSÕES.....	56
	PERSPECTIVAS DE ESTUDOS FUTUROS.....	57
	REFERÊNCIAS.....	58

1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) é de origem africana e foi introduzido no Brasil quando da colonização portuguesa, junto ao tráfico de escravos, na segunda metade do século XVI, através da Bahia. Por constituir um alimento proteico e energético, com importância fundamental na segurança alimentar e nutricional de grande parte da população brasileira, é uma cultura muito importante, não só para o Brasil, que é o quarto maior produtor mundial, mas para inúmeros países, especialmente no continente africano. O aumento da produção e a ampliação do mercado impulsionaram grandes avanços em seu cultivo no recente contexto nacional brasileiro, embora seja perceptível uma carência no que se refere à disponibilização do conhecimento constituído sobre a cultura e à transferência de tecnologia (FREIRE FILHO, *et.al.*, 2017).

A região Nordeste se destaca como a maior produtora e consumidora de feijão-caupi no Brasil, apesar de ser Mato Grosso a de maior produtividade por área plantada, devido ao uso de tecnologias adequadas. Enquanto isso, alguns estados do Nordeste não conseguem o mesmo feito, devido ao fato de não empregarem tecnologias modernas e aos baixos índices pluviométricos, que levam ao déficit hídrico nas plantações (SILVA, ROCHA e MENEZES JÚNIOR, 2016).

A ocorrência de déficit hídrico em plantas cultivadas afeta o crescimento e o desenvolvimento das culturas em todo o mundo. Desde os antigos povos sumérios, o homem tem procurado uma alternativa mais efetiva do aproveitamento da água para superar os efeitos do déficit hídrico das plantas. O déficit hídrico é uma situação comum à produção de muitas culturas, podendo apresentar um impacto negativo substancial no crescimento e desenvolvimento das plantas (KOTECK, 2011).

Assim, existe um conflito entre a conservação da água pela planta e a taxa de assimilação de CO₂ para produção de carboidratos. A necessidade em se resolver este conflito leva a planta a desenvolver mecanismos morfofisiológicos que a conduz a economizar água para uso em períodos posteriores (TAIZ e ZEIGER, 2013).

A deficiência hídrica provoca alterações no comportamento vegetal, cuja irreversibilidade vai depender do genótipo, da duração, da severidade e do estágio de desenvolvimento da planta. Em relação as respostas das plantas ao déficit hídrico, é de fundamental importância quantificar a capacidade de armazenamento de água no solo e analisar a influência dos mecanismos de adaptação delas à redução da disponibilidade de água no solo (VITORINO e MARTINS, 2012).

A quantidade de água armazenada no solo disponível para as plantas varia com a textura e as características físicas do solo, levando a planta a apresentar diferentes respostas em seus mecanismos de resistência morfofisiológicos. A frequência e a intensidade do déficit hídrico constituem os fatores mais importantes para a limitação da produção agrícola mundial (MOREIRA, *et al.*, 2016).

Sem se considerar os efeitos extremos, esta limitação é responsável por 60 a 70% da variabilidade final da produção, razão pela qual no planejamento da agricultura irrigada é de fundamental importância o conhecimento das condições meteorológicas durante o período de desenvolvimento das plantas, principalmente quanto aos períodos de baixa precipitação e elevada demanda na evapotranspiração. Na agricultura de sequeiro, entretanto, a prioridade é associar a época de plantio ao período mais adequado de disponibilidade de água para as plantas, principalmente em regiões de baixas latitudes (PADRÓN, *et al.*, 2015; HAGUENAUER, 2016).

É perceptível uma carência de conteúdo disponibilizado, no que se refere à oferta de conhecimento construído sobre a cultura e à transferência de tecnologia a respeito do cultivo de feijão-caupi e diante disso considera-se relevante, tanto para a academia, quanto para a sociedade, buscar o que tem sido publicado a respeito do tema, bem como conduzir pesquisa experimental que corrobore ou não essas informações, tendo como objetivo geral analisar a influência do estresse por déficit hídrico na fisiologia e produção da cultura do feijão-caupi.

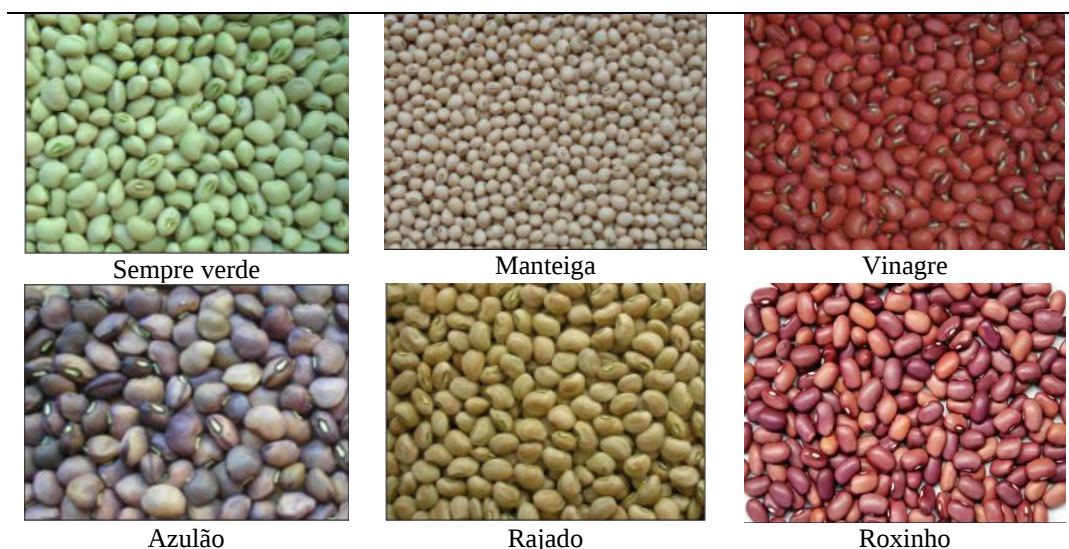
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DO FEIJÃO-CAUPI

O feijão-caupi é uma planta que pertence à família *Leguminosae*, gênero *Vigna*, espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp., subespécie *unguiculata* Verde e é conhecido popularmente por várias denominações, como feijão-decorda, feijão-de-praia, feijão-da-estrada, feijão-de-rama, feijão-fradinho ou feijão macassar, macaça ou macáçar, conforme a região onde é cultivado (Figura 1). É importante para a dieta das populações que o cultivam, por ser fonte de carboidratos e proteínas e poder ser consumido de diversas formas, em pratos salgados e doces (NEVES, *et al.*, 2011).

Figura 1 – Algumas espécies de feijão-caupi cultivadas no Brasil





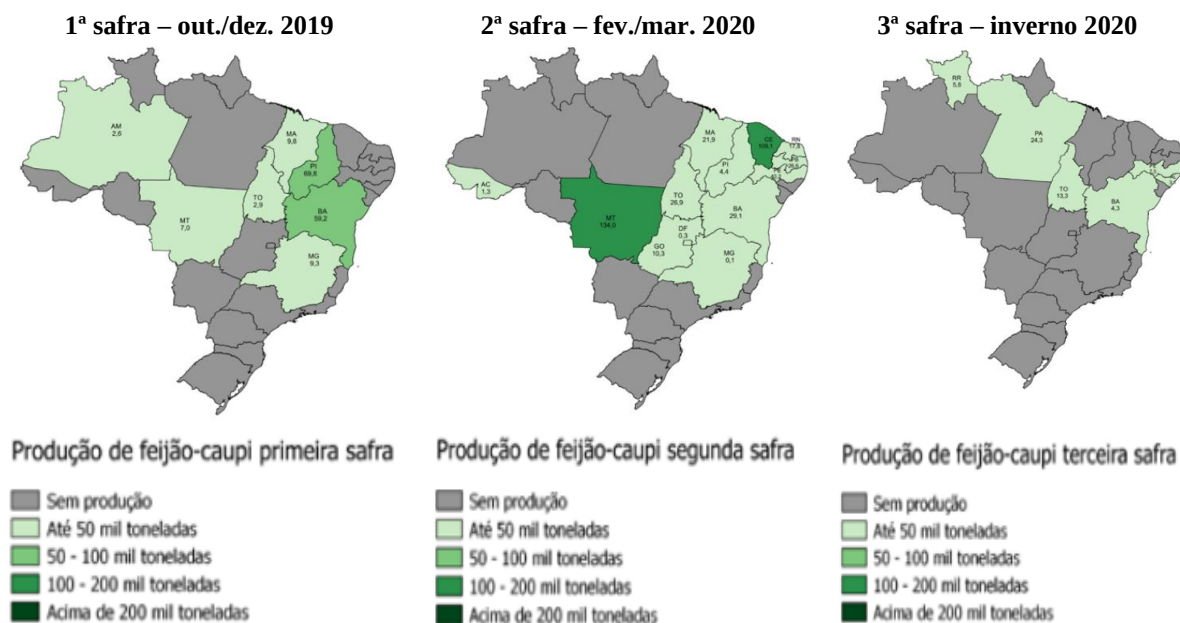
Fonte: FREIRE FILHO, *et al.* (2011, p. 32)

A planta é de origem africana, tendo sido introduzida no Brasil pelos colonizadores portugueses, a partir da cidade de Salvador (Bahia), na segunda metade do século XVI. No final desse século já havia diversas variedades do feijão-caupi sendo cultivadas na região, de onde se disseminou para o restante do país, com predominância na Região Nordeste e Região Norte. É consumido tanto seco e cozido, quanto verde e cozido, também apresentando uma espécie, chamada feijão-de-metro (cv. gr. *Sesquipedalis*), cujas vagens são consumidas cruas, em saladas (FREIRE FILHO e COSTA, 2020).

Historicamente, a preferência tem sido a produção de feijão-caupi para ser consumido seco, mas essa tendência tem se modificado, visto que o consumo de vagens e grãos verdes está em crescimento. As vagens devem ser colhidas quando tiverem entre 60% e 70% de umidade. As regiões Norte e Nordeste são responsáveis por cerca de 90% da área cultivada no país, sendo que nesta última o feijão-caupi geralmente é cultivado em consórcio com o milho, por seu metabolismo de fixação de carbono, porte alto e crescimento inicial rápido (PENHA FILHO, *et al.*, 2017).

Nesse regime de consórcio com o milho, ambas as plantas necessitam que a densidade no campo seja bem planejada. No caso do feijão-caupi, densidade elevada de plantas prejudica o número de ramos laterais, de vagens por planta e de grãos por planta, além de interceptar a radiação solar. O rendimento da produção brasileira é considerado baixo, devido às deficiências tecnológicas, estando em torno de 366 kg ha⁻¹ (BEZERRA, *et al.*, 2020).

A produção de feijão-caupi no Brasil é feita em três safras: de outubro a dezembro, de fevereiro a março e safra de inverno. Entre 2019 e 2020 o rendimento dessas safras pode ser observado nos mapas da Figura 2.

Figura 2 – Mapas da produção agrícola – safras de feijão-caupi, 2019/2020

Fonte: CONAB (2020, p. 46)

Na primeira safra o plantio do feijão-caupi é essencialmente familiar, pois os grandes produtores dão preferência para a soja. Com menos tecnologia, apesar da grande área, a produção é menor. Destacaram-se os estados da Bahia e Piauí. Na segunda safra o concorrente é principalmente o milho, mas o estado de Goiás tem aumentado a sua produção. Os estados de Mato Grosso e Ceará mantêm-se na liderança. A produção de terceira safra é bastante homogênea entre os estados produtores (CONAB, 2020).

A produção da primeira safra costuma ser prejudicada por excesso de chuvas e temperaturas elevadas, trazendo doenças e abortamento de flores e vagens. Já na segunda safra é justamente a falta de chuvas na fase de floração e enchimento das vagens que prejudica a produção, apesar da incidência de pragas ser menor. A terceira safra, com temperaturas mais amenas, mais a umidade do solo, conseguida com irrigação, traz resultados às vezes superiores a 3.000 kg/ha⁻¹, além de ser uma boa época para a produção de sementes saudáveis. Esses resultados, no entanto, dependem de irrigação e de colocar o fertilizante a pelo menos 15 cm de profundidade, para aprofundar o sistema radicular das plantas (PORTES, 2012).

Em 2020, em razão de dificuldades climáticas, principalmente clima seco nos estados do Paraná e São Paulo, a oferta da terceira safra foi menor. Por outro lado, a pandemia de Covid-19 aumentou a demanda por cestas básicas, com elevação do consumo e controle da quantidade ofertada no mercado interno. Os preços se elevaram e, em consequência, o consumo baixou. Os preços se mantiveram aquecidos até o início da primeira safra, em outubro de 2020 (RUAS, 2020).

O ano de 2021, o segundo da pandemia, começou com varejistas e consumidores comprando menos feijão, de qualquer tipo. A produção estimada de feijão-caupi (segunda safra) foi de 164,9 mil toneladas, principalmente nos estados da Bahia e Piauí. Contudo, foi 10,2% inferior ao ano agrícola 2019/2020. As chuvas cessaram mais cedo, impactando no potencial do cultivo. Como a cultura da soja teve problemas nesse período, a produção de feijão-caupi foi favorecida em alguns estados, como Mato Grosso, com aumento de 28,8% na área plantada. A relação entre oferta e demanda manteve-se em bons patamares ao final da segunda safra. A terceira safra tinha estimativa de 596,6 mil hectares plantados (CONAB, 2021).

No mundo, 42 países cultivam feijão-caupi, sendo o maior produtor a Nigéria, com 39% da produção mundial que, entre 2016 e 2018, foi de sete milhões de toneladas. O Brasil ocupa a terceira posição. Os países asiáticos são grandes importadores de feijão-caupi, o que incentivou agricultores brasileiros a cultivarem suas variedades, aumentando as exportações brasileiras de feijão em 6,8% em 2020, com relação a 2019 (SALVADOR, 2021; SNA, 2021).

A Índia é o principal mercado consumidor de feijão-caupi produzido no Brasil, seguida pela China, Egito, Turquia, Paquistão, Emirados Árabes e Bangladesh. A manutenção e aumento dessas exportações de feijão-caupi depende da profissionalização cada vez maior do setor produtivo, com uso de sementes biofortificadas e registradas, rastreabilidade e contratos na bolsa de valores. De qualquer forma, existe preferência pelo produto brasileiro, em razão da homogeneidade de colheita, proporcionada pela mecanização e padrão de qualidade em grandes volumes. Também é preciso continuar pesquisando sobre o estresse causado nas culturas pelo déficit hídrico (MALISZEWSKI, 2020).

Sob condições ótimas a produtividade das culturas pode exceder consideravelmente os rendimentos atuais. As grandes variações em produtividade podem ser devido a três grupos de fatores principalmente: diferenças de potencial produtivo das variedades cultivadas; tecnologia de produção empregada e exposição a fatores ambientais que ocasionam estresses às plantas. Este último tem sido atualmente um dos principais focos de pesquisa, sobretudo, em relação ao estresse hídrico. O organismo sob estresse atravessa uma sucessão de fases características, que serão descritas a seguir (BIANCHI, GERMINO e SILVA, 2016).

2.2 O DÉFICIT HÍDRICO E O DESENVOLVIMENTO DAS PLANTAS

Solos argilosos com textura mais fina retêm água em maior quantidade que os solos de textura arenosa, devido à maior área superficial e a poros menores entre partículas. A medida que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorverem água, porque aumenta a força de retenção e diminui a disponibilidade de água no solo às plantas (KLEIN e KLEIN, 2014).

A redução do conteúdo de água no solo, causa significativa variação na distribuição e desenvolvimento radicular, podendo mudar o período de disponibilidade e a quantidade de água disponível para as plantas. Desta forma, nem toda a água que o solo armazena é disponível às plantas (FRIZZONE, 2017).

O suprimento de água para uma cultura resulta de interações que se estabelecem ao longo do sistema solo-planta-atmosfera. As influências recíprocas entre esses componentes básicos tornam o sistema dinâmico e fortemente interligado, de tal forma que a condição hídrica da cultura dependerá sempre da combinação desses três segmentos (PEIXOTO, 2020).

Entretanto, quanto maior for a demanda evaporativa da atmosfera mais elevada será a necessidade de fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera. O movimento da água do solo para a atmosfera através da planta depende das características físicas do solo. Em um extremo, encontram-se os solos arenosos, que possuem menor área superficial e apresentam grandes espaços porosos ou canais entre as partículas; em outro extremo, solos argilosos, com partículas e poros menores, que dificultam a drenagem e retêm a água mais firmemente (ENÉAS FILHO, MIRANDA e SILVEIRA, 2015).

Essas características interferem na capacidade de retenção da água no solo e, assim, com exceção aos solos do cerrado, a capacidade de retenção de água é maior em solos de textura argilosa e com alto teor de matéria orgânica e menor em solos de textura arenosa (TAIZ e ZEIGER, 2013).

O suprimento de água às plantas é determinado pela habilidade da cultura em utilizar a água armazenada no solo, enquanto a demanda da atmosfera, por outro lado, está relacionada à combinação dos fatores meteorológicos interagindo com o dossel vegetativo da cultura. A resposta das plantas ao potencial de água no solo tem sido estudada por muitos pesquisadores; entretanto, o potencial de água no solo não indica, de maneira geral, as condições de déficit ou excesso de água na profundidade do solo explorado pelo sistema radicular das plantas (MOREIRA, *et al.*, 2016).

Desta forma, alguns pesquisadores fazem restrição ao uso do potencial de água no solo para caracterizar a intensidade de ocorrência de déficit hídrico. A resposta fisiológica das plantas ao déficit hídrico deve ser avaliada em função da água disponível no solo. Esta proposta

foi aprofundada na segunda metade dos anos 1980, ao se propor o estudo de resposta da planta à fração de água evapotranspirada (CLEMENTE, 2017).

A fração de água evapotranspirada corresponde quantidade de água transpirada pela planta, mais a água evaporada diretamente da superfície do solo ou da superfície da planta, que alcança 10% da diferença entre o desenvolvimento da planta bem irrigada e aquela que está em déficit hídrico. A fração de água evapotranspirada tem sido utilizada para determinar uma imparcial e consistente resposta das plantas ao déficit hídrico ao longo do período de secamento do solo. Para a formação de grãos o limite crítico da fração de água evapotranspirada deve estar entre 0,25 a 0,35 (KELLING, 2014).

A água evapotranspirável ou água disponível no solo é definida pela diferença entre o conteúdo de água no solo, explorado pelo sistema radicular das plantas, entre o limite superior e o limite inferior de água disponível no solo (CLEMENTE, 2017).

O limite superior de água disponível às plantas é definido como o determinado conteúdo de água no solo determinado 24 a 48 horas após a ocorrência da drenagem, a partir do umedecimento completo ou saturação do solo por irrigação ou precipitação. O limite inferior de água disponível às plantas é definido como o valor do conteúdo de água do solo depois que as plantas, desenvolvidas normalmente, estejam completamente senescentes com consequente extração de toda a água disponível no perfil do solo (FRIZZONE, 2017).

A capacidade de armazenamento de água disponível às plantas (CAD) é determinada pela diferença de conteúdo volumétrico de água entre o limite superior e inferior de disponibilidade, considerando-se cada camada do perfil do solo explorado pelo sistema radicular das plantas. Desta forma, a água do solo disponível às plantas é definida para uma combinação particular solo-cultura (SILVA, 2014).

As características químicas, físicas e biológicas do solo têm influência direta na quantidade de água no solo disponível às plantas; assim, se houve qualquer restrição física, química ou biológica, em alguma camada do perfil do solo, que altere o desenvolvimento do sistema radicular, a disponibilidade será afetada porque essa água armazenada não pode ser extraída pelas plantas (KOTECK, 2011).

Por outro lado, na determinação tradicional somente as características físicas do solo são utilizadas na avaliação do armazenamento subterrâneo de água, considerando-se que somente o potencial existente influencie o desenvolvimento radicular e absorção, isto é, a quantidade de água armazenada no perfil do solo é conservadoramente a mesma, independente da cultura ou da existência de restrições ao desenvolvimento das plantas. A fração de água disponível às plantas (FAD), razão entre a quantidade atual (conteúdo de água volumétrico das

camadas do solo explorado pelo sistema radicular em um dia específico) e a quantidade potencial de água no solo, tem sido utilizada como um indicativo da ocorrência de déficit hídrico (FRANÇOIS, 2012).

A vantagem da FAD sobre outros indicadores de déficit hídrico é que ela depende primariamente da taxa de uso da água e das propriedades do solo, as quais podem ser determinadas com relativa facilidade nas culturas a campo. A taxa relativa de transpiração ou expansão foliar está correlacionada à FAD, sendo que valores menores que 0,25 podem reduzir a área foliar, como ocorre com o sorgo e o algodão, com redução na transpiração acumulada, para reservar água em situações de seca (LAGO, 2011).

2.3 ESTABELECIMENTO DO ESTRESSE HÍDRICO NA PLANTA

As plantas herbáceas são constituídas de 85-90% de água, com um potencial hídrico relativamente alto ($\Psi_w > -15$ bar). O potencial hídrico da atmosfera é normalmente várias centenas de bars inferior ao da planta. Isto gera um gradiente de potencial hídrico entre a planta e atmosfera ($-\Delta\Psi$) que conduz a perda de água da planta por transpiração. A intensidade da transpiração depende da umidade do solo, temperatura, umidade atmosférica e das características da planta (CONTI JÚNIOR, 2019).

A depender da intensidade com que se processa a transpiração, as perdas de água podem ser bastante superiores à capacidade de recuperação do estado hídrico, ou seja, de absorção de água pelas raízes. Nestas condições, o potencial hídrico na planta cai rapidamente; um déficit de água surge e conduz ao estresse hídrico. Em dias quentes, todavia, é natural que nas horas mais quentes do dia o Ψ_w foliar diminua bastante em relação ao do solo; mas, durante a noite, na ausência de transpiração (a maioria das plantas encontram-se com os estômatos fechados), havendo água disponível no solo, a planta continua a absorver água até que o gradiente de potencial entre a água do solo e da planta desapareça, restabelecendo, assim, sua turgescência (COSTA, 2014).

Em condições tais onde a umidade do solo evapotranspirada não é repostada, é possível se observar o desenvolvimento dos sintomas de estresse hídrico nas plantas. Além da redução do Ψ_w , outros sintomas característicos podem ser constatados como resultado de reações passivas, como murchamento, inibição da fotossíntese e, ativas, como a acumulação de osmolitos, o fechamento estomático e outros. Isto ocorre por que à medida que o solo vai secando, as recuperações noturnas do Ψ_w foliar vão atingindo valores cada vez menores. Com o

agravamento do déficit hídrico no solo, nem mesmo dispondo de toda a noite, a planta consegue reidratar-se suficientemente (ENÉAS FILHO, MIRANDA e SILVEIRA, 2015).

2.4 ESTRATÉGIAS DE RESISTÊNCIA À SECA

Os mecanismos de resistência podem ser divididos em vários tipos. Primeiro podem se distinguir entre ‘adiamento da dissecação’, ou seja, a habilidade para manter a hidratação dos tecidos, e ‘tolerância à dissecação’, ou a astúcia para manter a integridade das estruturas e o funcionamento de processos vitais enquanto desidratada; estes mecanismos são às vezes chamados de tolerância à seca a potenciais de água altos e baixos, respectivamente (SUGUIYAMA, 2013).

A literatura mais antiga frequentemente usa o termo ‘evitação de seca’ em lugar de ‘tolerância à dissecação’; este último termo é mais adequado porque seca é uma condição meteorológica que é tolerada pelas plantas que a sobrevivem, e não evitadas. Uma terceira categoria, “escape à seca”, inclui plantas que completam o ciclo de vida, da germinação à produção de novas sementes, dentro de um período de algumas semanas, depois de uma forte chuva; elas sobrevivem ao período seco em forma de sementes extremamente tolerantes à dessecação. Assim, apenas esta última categoria evita a seca (BIANCHI, GERMINO e SILVA, 2016).

Entre as plantas sensíveis à dissecação podem-se distinguir as que economizam e as que não economizam água. As ‘poupadoras’ fecham os estômatos, aprofundam o sistema radicular, diminuem o tamanho das células, aumentam o espessamento da camada cerosa da cutícula foliar, ou seja, usam mais eficientemente a água, armazenando uma parcela para ser posteriormente usada em condições hídricas adversas para completar seu ciclo de vida. As ‘gastadoras’ consomem excessivamente a água (PEIXOTO, 2020).

A estratégia de resistência à seca varia com as condições edafoclimáticas. A produtividade das plantas sob déficit hídrico depende do total de água disponível e da eficiência de uso de água da planta. Uma planta capaz de absorver mais água ou que a usa mais eficientemente resistirá melhor a seca. Algumas plantas possuem adaptações, como as plantas C4 e CAM, que as permitem explorar ambientes mais áridos. Quando o déficit hídrico se desenvolve lentamente de modo que permita o desencadeamento de processos adaptativos, o estresse hídrico tem vários efeitos sobre o crescimento, um dos quais a limitação da expansão das folhas (PEIXOTO, 2020).

Embora a área foliar seja importante porque a fotossíntese é normalmente proporcional a ela, a rápida expansão das folhas pode afetar adversamente a disponibilidade de água. Se a precipitação só acontece durante o inverno e, com a chegada do verão à disponibilidade de água decresce rapidamente, isto pode ocasionar a rápida expansão da área foliar, ocasionando depleção de água mais cedo e, conseqüentemente, uma reduzida umidade residual no solo para a planta completar seu ciclo de vida. Nesta situação, só plantas que armazenam água para usar posteriormente na estação seca para reprodução ou aquelas que completam seu ciclo de vida antes do início da seca (escape à seca), produzirão sementes para a próxima geração (BIANCHI, GERMINO e SILVA, 2016).

A situação é diferente se as chuvas de verão são significantes, todavia, irregulares. Neste caso, uma planta com área foliar plena, ou as capazes de rapidamente expandir sua área foliar, passam a tirar proveito dos verões úmidos ocasionais. Uma estratégia de aclimação nestas condições é a capacidade de crescimento vegetativo e florescimento em períodos longos. Estas plantas possuem hábito de crescimento indeterminado, em contraste com as que desenvolvem um determinado número de folhas e possuem um período de florescência curto (LEITE, 2019).

2.5 FISIOLOGIA DO ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS

2.5.1 Efeitos e reações ocasionadas pelo estresse hídrico em plantas

2.5.1.1 *Desenvolvimento da área foliar e senescência das plantas*

A área foliar é um importante fator da produção e determina o uso da água pelas plantas e seu potencial de produtividade é severamente inibido quando exposta a déficit hídrico. A área foliar de gramíneas e em plantas de milho foi significativamente menor quando as plantas foram submetidas a déficit hídrico (CLEMENTE, 2017).

Sob condições de déficit hídrico, o equilíbrio entre a produção de assimilados e a demanda para o desenvolvimento dos órgãos reprodutivos é severamente afetado pela redução na área foliar fotossinteticamente ativa. Durante o desenvolvimento das plantas, a atividade fotossintética por área foliar aumenta com a idade da folha, até a sua expansão máxima, decrescendo após, até a sua senescência. A senescência é um efeito comum para a cultura próximo à fase de maturação; no entanto, pode ocorrer também em situação de déficit hídrico severo. A senescência é um mecanismo de fundamental influência na produção final das culturas, pois reduz a área fotossinteticamente ativa da planta (PES e ARENHARDT, 2015).

A redução no incremento do índice de área foliar está associada, usualmente, ao desenvolvimento foliar das plantas, em situações de déficit hídrico, podendo estar relacionada com a pequena redução no tamanho das folhas individuais ou com a menor produção de folhas; porém, plantas com déficit hídrico podem alterar a interceptação da radiação solar, através de modificações na exposição e duração da área foliar (FERRARI, PAZ e SILVA, 2015).

O índice de área foliar está relacionado à transpiração e varia com a época de ocorrência do déficit hídrico. A mudança no índice de área foliar em condições de déficit hídrico depende da mudança individual da área foliar que ocorre em cada folha. O período compreendido entre a emergência e a antese, o índice de área foliar, diminuiu significativamente em função da menor expansão e do número de folhas, além de antecipar a senescência (LAGO, 2011).

Em muitas espécies, como o milho ou girassol, o número de folhas já é determinado geneticamente; entretanto, se ocorrer déficit hídrico antes do florescimento das plantas, o número de folhas do milho será reduzido. O déficit hídrico aumenta a senescência das folhas e isso ocorre porque o solo seco não pode fornecer nitrogênio suficiente para suprir as necessidades de crescimento da cultura e o nitrogênio do interior da planta é retranslocado das folhas mais velhas para os pontos de crescimento; entretanto, a intensidade da senescência depende da quantidade de nitrogênio no solo, das reservas de nitrogênio na planta e da demanda de nitrogênio dos pontos de crescimento (SILVA, *et al.*, 2020).

Este ciclo pode acontecer duas ou mais vezes numa mesma estação. A abscisão foliar durante condições de déficit hídrico é resultado, em grande parte, do aumento na síntese do hormônio etileno pela planta. Este ajuste de área foliar é uma importante resposta, porque melhora a aptidão da planta em sobreviver sob estresse hídrico (PES e ARENHARDT, 2015).

A senescência, comparada com a elongação das folhas, tem sido apresentada como um processo menos sensível ao déficit hídrico durante o crescimento vegetativo. Mas durante o período de enchimento dos grãos, o déficit hídrico pode induzir a senescência, que aumenta caso a planta possua um elevado número de grãos por unidade de área foliar. O déficit hídrico também influencia diretamente no número de dias decorrido entre a emergência e a senescência de uma folha e no período de enchimento dos grãos, a não ser quando se desenvolve gradualmente (NHANOMBE, 2019).

Em condições de déficit hídrico no solo, reduz-se a expansão das folhas, a senescência acelera, diminui o índice de área foliar e aumenta a abscisão das folhas. O aumento da senescência no dossel vegetativo tem sido identificado como uma limitação potencial na produtividade da cultura (OLIVEIRA, *et al.*, 2017).

2.5.1.2 Redução da expansão da área foliar

Algumas das respostas rápidas ocorrem através de eventos biofísicos em lugar de mudanças em reações químicas que são o resultado da desidratação. Como o conteúdo de água da planta diminui, as células encolhem e suas paredes relaxam. Esta diminuição do volume celular resulta em baixa pressão hidrostática ou turgor. Com o agravamento do estresse, progride a perda de água e, por conseguinte, o protoplasma das células contrai, tornando os solutos mais concentrados. A membrana protoplasmática fica mais grossa e delgada, porque cobre agora uma menor área (TAIZ, *et al.*, 2021).

A perda de turgor é o primeiro efeito biofísico do estresse hídrico, por isso as atividades dependentes do turgor são as mais sensíveis a este fator de estresse. A expansão ou alongamento celular é um processo dependente do turgor, portanto, é extremamente sensível ao déficit hídrico. A inibição do alongamento celular ocasionada pelo estresse hídrico leva a uma redução da velocidade de expansão foliar. Isto, de certa forma, aumenta a eficiência de uso de água pela planta, porque diminui a perda de água por transpiração, de modo que a umidade no solo pode ser usada por um período mais longo. Além de efeito do estresse hídrico, a redução da expansão foliar, também pode ser considerada como uma primeira resposta da planta contra a seca (TAIZ, *et al.*, 2021).

2.5.1.3 Aumento da camada cerosa na cutícula foliar

Uma resposta comum ao estresse hídrico é a produção de uma cutícula mais grossa que reduz a perda de água da planta pela epiderme foliar (transpiração cuticular). Uma cutícula mais grossa também diminui a permeabilidade para o CO₂, todavia, a fotossíntese não é afetada, em virtude disto, porque as células epidérmicas subcuticulares não realizam fotossíntese (SOUZA, 2017).

A alta resistência cuticular é um importante meio de resistência morfológica das plantas ao estresse hídrico. A transpiração cuticular responde por 5 a 10% da transpiração total da folha, assim, este mecanismo só é significativo se o estresse hídrico for extremamente severo, ou quando a cutícula tenha sofrido injúria, por exemplo, através de atrito com areia trazida pelo vento (LIMA, *et al.*, 2013).

2.5.1.4 Fechamento dos estômatos

Quando o começo do estresse hídrico é rápido ou a planta alcançou sua área foliar total antes do início do estresse, outros mecanismos protegem a planta da dessecação imediata. Sob tais circunstâncias, o fechamento dos estômatos reduz a perda de água nas plantas por transpiração; portanto, o fechamento estomático pode ser considerado uma segunda linha de defesa contra a seca. As mudanças na absorção e perda d'água nas células-guarda governam respectivamente a abertura e o fechamento estomático (TAIZ e ZEIGER, 2013).

As células-guarda expostas à atmosfera podem perder água diretamente por evaporação e assim perdem o turgor, ocasionando o fechamento hidropassivo dos estômatos. Um segundo mecanismo é chamado hidroativo; este fecha os estômatos quando a folha inteira ou as raízes apresentam sinais de desidratação e depende de processos metabólicos nas células guarda. Este mecanismo induz uma fuga de solutos das células-guarda, resultando em perda d'água e diminuição do turgor, fazendo os estômatos fecharem (BIANCHI, GERMINO e SILVA, 2016).

A perda de solutos nas células-guarda é ativada quando o *status* energético da água no resto da folha é baixo. Existem muitas evidências de que o ácido abscísico (ABA) assume um importante papel neste processo. O ácido abscísico é sintetizado continuamente a uma baixa taxa em células do mesófilo e tende a se acumular principalmente nos cloroplastos. Quando as células do mesófilo se tornam ligeiramente desidratadas duas coisas acontecem (PEIXOTO, 2020).

Primeiro, algum ABA armazenado no cloroplasto é liberado para o apoplasto, de modo que o fluxo da transpiração o conduz às células guarda. Segundo, a taxa de síntese líquida de ABA é incrementada; esta síntese de ABA aumenta depois de iniciado o fechamento estomático e contribui para aumentar, ou prolongar, o efeito do fechamento inicial ocasionado pelo ABA inicialmente liberado pelos cloroplastos. A redistribuição de ABA na folha depende de gradientes de pH, das propriedades ácido-fraco da molécula de ABA, e da permeabilidade seletiva das membranas da célula (PEIXOTO, 2020).

Em uma folha fotossintetizando sem estresse, o pH do estroma é mais alto que o do citoplasma; este gradiente de pH conduz a uma grande acumulação de ABA nos cloroplastos, porque o ABA precisa se combinar com H^+ ($H^+ + ABA^-$) para poder atravessar a membrana do cloroplasto rumo ao citoplasma. Um efeito da desidratação é abaixar o pH do estroma; isto permite a liberação do ABA para o citoplasma. Acoplado a este processo, ocorre aumento no pH do apoplasto, devido ao déficit hídrico; isto ocasiona um novo gradiente de pH, favorecendo a passagem do ABA do citoplasma para o apoplasto (BELO, 2011).

A resposta dos estômatos à desidratação foliar pode variar amplamente entre espécies e, mesmo dentro de uma espécie. Os estômatos de algumas espécies que adiam a desidratação, como o feijão caupi (*Vigna unguiculata*) e a mandioca (*Manihot esculenta*), são extraordinariamente sensíveis à redução da disponibilidade de água; a condutância estomática e, por conseguinte, a transpiração, diminuem tanto a ponto de o potencial hídrico na folha permanecer quase constante durante seca moderada. Em algodão (*Gossypium hirsutum*), fatores como o suprimento de nitrogênio afetam a acumulação e/ou a redistribuição de ABA, prejudicando significativamente o poder de resposta dos estômatos ao déficit hídrico (GUIMARÃES, 2020 e YEATES, 2014).

Mensagens do sistema radicular podem afetar a resposta dos estômatos ao estresse hídrico. Há dois tipos de evidências neste sentido. Primeiro, a condutância estomática é frequentemente muito mais relacionada com o *status* de água no solo que na folha e, a única parte de planta que pode ser diretamente afetada pelo *status* energético da água do solo é, via de regra, o sistema radicular (REIS, 2018).

Na realidade, até mesmo a desidratação de apenas uma parte do sistema radicular pode causar fechamento estomático, embora a outra porção de raízes, em condições adequadas de umidade, ainda possa suprir a demanda de água da copa. Quando plantas de milho (*Zea mays*) foram postas a crescer com suas raízes compartimentadas em dois distintos recipientes, sofrendo restrição de água em apenas um deles, os estômatos fecharam parcialmente e foi constatado um potencial hídrico foliar alto. Isto evidencia que os estômatos podem responder a condições percebidas em nível radicular (SILVA, 2019).

O segundo tipo de evidência dos mensageiros das raízes, é que estas são capazes de produzir ácido de abscísico, o qual é exportado para as folhas através da seiva bruta no xilema. Quando plantas de trapoeraba (*Commelina communis*) foram colocadas para crescer, com seu sistema radicular dividido em dois recipientes, sofrendo restrição de água em um deles, a concentração de ABA nas raízes acondicionadas no recipiente seco, aumentou consideravelmente. Os estômatos fecharam como resposta ao tratamento, apesar de nenhuma mudança ter ocorrido no Ψ_w foliar; uma comprovação de que os estômatos não fecham apenas por movimento hidropassivo. O conteúdo de ABA nas células-guarda, medido em amostras de epiderme retiradas das folhas, apresentou uma estreita relação com o grau de fechamento estomático. O ABA das raízes foi, presumivelmente, transportado às folhas pelo fluxo de transpiração (SILVA, 2011).

Estes resultados levam a crer que os estômatos respondem a duas fontes de ABA durante o secamento do solo: (1) de imediato ocorre um sistema de advertência proporcionado pelo

ABA liberado pelas raízes, indicando que algumas raízes estão sofrendo déficit hídrico; e (2) há translocação de ABA dos cloroplastos de células da folha para as células guardas, como resultado da dessecação a nível foliar (BIANCHI, GERMINO e SILVA, 2016).

2.5.2 Fotossíntese e acumulação de carboidratos nas plantas

A fotossíntese é o processo através do qual as plantas transformam a energia solar em energia química. As plantas são transformadoras primárias de energia solar e a sua eficiência é fator determinante na produtividade agrícola. Um entendimento melhor dos fatores que afetam a fotossíntese durante o déficit hídrico pode ajudar no entendimento dos mecanismos de resistência utilizados pela planta. A redução na atividade fotossintética pela redução na assimilação do CO₂ e a senescência das folhas são também indicadores do efeito do déficit hídrico de uma cultura (MELO FILHO e SILVA, 2013).

Os efeitos causados pelo déficit hídrico nos tecidos mais jovens da planta são maiores que nos tecidos adultos; porém, quando se interrompe o déficit o desenvolvimento é recuperado somente nas folhas mais jovens. O déficit hídrico reduz o índice de troca de CO₂ e a sua condução para a folha, além de reduzir a concentração desse elemento nos espaços intercelulares. Após a interrupção do déficit hídrico, esses parâmetros tendem a voltar ao normal, porém não em sua plenitude, pois a velocidade de recuperação é reduzida (MELO FILHO e SILVA, 2013).

A recuperação completa da fotossíntese é lenta quando a planta chega próximo ao ponto de murcha permanente, variando com a espécie vegetal, com o tipo de solo e com o método de aplicação da água de irrigação. A formação do dossel e sua resposta sobre a fotossíntese e a produtividade das plantas estão relacionadas principalmente à quantidade de energia interceptada e absorvida (ENÉAS FILHO, MIRANDA e SILVEIRA, 2015).

Trabalhando com plantas de trigo submetidas déficit hídrico no início do florescimento e antese, foi observada elevada taxa fotossintética. A fotossíntese desempenha importante papel na produção de uma cultura, pois o rendimento de grãos é potencialmente influenciado pela duração da taxa de acumulação de carboidratos (SANTOS, *et al.*, 2012).

O déficit hídrico pode afetar a utilização de carboidratos, por alterar, basicamente, a eficiência com que os fotoassimilados são convertidos para o desenvolvimento de partes novas na planta. O déficit hídrico ocasiona mudanças na partição dos carboidratos no interior da planta, condicionando as plantas desenvolverem mecanismos de adaptação e resistência. Quando a ocorrência do déficit hídrico é rápida, os mecanismos morfofisiológicos são

severamente afetados e a planta necessita adaptar-se à nova situação, de forma rápida (SANCHES, 2012).

Desta forma, plantas conduzidas em condições de irrigação normalmente apresentam menos resistência a situações de déficit hídrico no solo; já em plantas submetidas ao déficit hídrico gradual ou a deficiência de água no solo no início do seu ciclo, mais facilmente ocorre a adaptação das plantas. A tolerância da planta ao déficit hídrico parece ser um importante mecanismo de resistência, para a manutenção do processo produtivo em condições de baixa disponibilidade de água às plantas (MELO, 2014).

Durante um déficit hídrico, os diversos ajustamentos fisiológicos da planta determinam as respostas adaptativas de ordem anatômica e morfológica, porém essas respostas sofrem variações de acordo com a espécie, a cultivar, o estado de desenvolvimento das plantas e duração com a intensidade do déficit hídrico. Segundo o mesmo autor, as plantas têm capacidade de resistir a períodos de déficit hídrico, procurando utilizar mecanismos que reduzam a perda de água (FERRARI, PAZ e SILVA, 2015).

2.5.2.1 Limitação da fotossíntese

A taxa de fotossíntese das folhas (expressa por unidade de área da folha) raramente é tão sensível ao estresse hídrico moderado como o é a expansão foliar. A razão é que a fotossíntese é muito menos sensível ao turgor do que a expansão foliar. Por outro lado, evidências sugerem que a concentração de Mg^{+2} em cloroplastos influencia a fotossíntese durante o estresse hídrico, por seu papel no transporte de elétrons, que resulta em produção de Trifosfato de adenosina (ATP). Em cloroplastos isolados, a fotossíntese é muito sensível à crescente concentração de Mg^{+2} , e um processo semelhante poderia acontecer durante a redução do volume celular frequentemente ocorrida em condições de déficit hídrico (BROETTO, GOMES e JOCA, 2017).

O estresse hídrico, normalmente afeta a condutância estomática e, portanto, a atividade fotossintética. O fechamento dos estômatos no estágio inicial do estresse pode aumentar a eficiência de uso de água (mais) porque o fechamento estomático inibe mais a transpiração, que diminui a concentração intercelular de CO_2 , apesar de o CO_2 ser obtido por unidade de água transpirada; ademais, a desidratação de células do mesófilo inibe a fotossíntese. Quando o estresse é intensificado, porém, a eficiência de uso de água normalmente diminui, e a inibição de metabolismo das células do mesófilo é mais forte (JACINTO JÚNIOR, *et al.*, 2019).

É possível se avaliar o efeito relativo do estresse sobre a condutância estomática e a fotossíntese submetendo-se folhas estressadas a concentrações elevadas de CO₂ no ar circundante. As limitações do fechamento estomático sobre a fotossíntese podem ser superadas por altas concentrações externas de CO₂, mas qualquer efeito direto do estresse hídrico sobre o metabolismo das células do mesófilo não será eliminado pelo fornecimento adicional de CO₂ (JACINTO JÚNIOR, *et al.*, 2019).

A respiração, em relação a fotossíntese, apresenta-se um pouco menos sensível ao estresse hídrico. Se o déficit hídrico se inicia de forma lenta e moderada, verifica-se um declínio em ambos os processos, embora a respiração caia mais lentamente. No entanto, quando o suprimento de água é suspenso de maneira brusca e total, ocasionando um estresse hídrico severo, ocorre inicialmente uma queda na taxa de respiração e um posterior aumento que precede uma nova queda. Este fenômeno resulta do aumento de substratos solúveis, causado pela hidrólise do amido, favorecendo o aumento da respiração (MESSCHMIDT, 2013).

2.5.2.2 Alteração na dissipação de energia nas folhas

A perda de água por transpiração abaixa sobremaneira a temperatura foliar, tendo em vista o alto calor específico da água. Em climas quentes e secos, as folhas de plantas irrigadas podem também manter um gradiente de temperatura com a atmosfera. Em tais climas, é possível identificar se as plantas precisam de água, simplesmente tocando as folhas, porque uma folha transpirando plenamente é distintamente fresca ao toque. Quando o estresse hídrico restringe a transpiração, a folha aquece como consequência da obstrução à dissipação de calor para a atmosfera, a menos que outro processo compense esta falta (RODRIGUES, 2018).

Por causa destas interações, o estresse hídrico e o estresse ocasionado pelo calor excessivo são intimamente relacionados. A manutenção da temperatura foliar substancialmente inferior à do ar, requer evaporação de grande quantidade de água. Assim, adaptações que reduzam a temperatura foliar por outros meios que não a transpiração, é bastante efetiva na conservação da água. Quando a transpiração é lenta e a temperatura foliar se eleva além da do ar, alguma energia extra da folha é dissipada como perda de calor sensível, diminuindo a eficiência do metabolismo energético da planta (ENÉAS FILHO, MIRANDA e SILVEIRA, 2015).

Muitas plantas de climas áridos possuem folhas pequenas, as quais minimizam a resistência da camada limite da folha à transferência de calor para a atmosfera. Por causa da baixa resistência da referida camada, as folhas pequenas tendem a permanecer com temperatura

próxima a do ar, mesmo quando transpiração é fortemente reduzida. Em contraste, folhas grandes têm uma maior resistência de camada de limite e, portanto, dissipam menos energia térmica (por unidade área foliar) por transferência direta (GONÇALVES, 2020).

Esta limitação pode ser compensada por movimentos da folha, que provêm proteção adicional contra o aquecimento durante o estresse hídrico. Outros fatores que podem alterar a interceptação da radiação solar incluem murchamento, que muda o ângulo da folha em relação ao sol, e o enrolamento do limbo foliar, que reduz a área de exposição ao sol. A absorção da radiação eletromagnética em forma de calor também pode ser diminuída através de pelos na superfície foliar ou por camadas de cera refletiva na superfície externa da cutícula. As folhas de algumas plantas têm uma aparência branco-cinza porque a grande densidade de pelos presentes em sua superfície refletem as ondas eletromagnéticas de diversos comprimentos, daí a cor clara (LOPES SOBRINHO, *et al.*, 2018).

Portanto, os pêlos mantêm as folhas refrigeradas, mediante reflexão da radiação eletromagnética; o problema é que também são refletidas as ondas da região do visível, as quais são utilizadas na fotossíntese (mais precisamente da região do vermelho e do azul) e, assim, diminuem a atividade fotossintética. Por causa disto, a tentativa de introduzir geneticamente pêlos em folhas de culturas comerciais, para melhorar a eficiência de uso de água, foi geralmente malsucedida (LOPES SOBRINHO, *et al.*, 2018).

2.5.3 O déficit hídrico e o sistema radicular das plantas

O volume de solo explorado e o contato íntimo entre a superfície das raízes e o solo são essenciais para a absorção efetiva da água pelas raízes. O contato é maximizado pela emissão dos pelos radiculares, com consequente aumento na área superficial e na capacidade de absorção de água. Além disso, o déficit hídrico estimula a expansão do sistema radicular para zonas mais profundas e úmidas do perfil do solo (OLIVEIRA, *et al.*, 2017).

Em condições de déficit hídrico há maior expansão das raízes, devido ao secamento da superfície do solo. Durante o desenvolvimento das plantas, a densidade e o comprimento de raízes aumentam até o início da floração das plantas, decrescendo posteriormente, com diminuição na eficiência de absorção de água (OLIVEIRA, *et al.*, 2017).

O maior desenvolvimento das raízes ocorre nas camadas de solo, cuja disponibilidade de água foi maior. A expansão das raízes no campo foi mais afetada pelo déficit hídrico que a expansão das folhas e as raízes pequenas foram mais sensíveis ao déficit hídrico que as raízes médias e grandes. O desenvolvimento do sistema radicular nas camadas mais profundas do

perfil possibilita, às plantas, explorar melhor a umidade e a fertilidade do solo, dependendo das características morfológicas e genótípicas da planta. O efeito do excesso de Al^{+++} na zona das raízes frequentemente impede seu desenvolvimento nas zonas mais profundas do solo, o que pode aumentar o efeito indireto do déficit hídrico (SILVA, 2019).

Embora apresentando suficiente quantidade de água no solo para o pleno desenvolvimento das plantas podem ocorrer severos sintomas do efeito do déficit hídrico em plantas de trigo, devido à elevada concentração de Al^{+++} no solo. Há evidências de sinais químicos das raízes que agem diretamente no comportamento dinâmico dos estômatos em condições de déficit hídrico no solo (PES e ARENHARDT, 2015).

Um ligeiro ressecamento do solo, mesmo que não afete as relações hídricas da parte aérea, causa um aumento na concentração de ácido abscísico (ABA) no xilema, provavelmente produzido na coifa das raízes, levando ao fechamento estomático e à diminuição da expansão celular. O déficit hídrico promove uma rápida redistribuição e acumulação do ABA nos tecidos da planta; assim, ocorre um aumento na concentração do ABA no apoplasto das células-guarda, reduzindo a condutância estomatal. O ABA pode influenciar as respostas da planta ao déficit hídrico por regular as características morfofisiológicas das plantas (MUIANGA, 2013).

Experimentos em plantas de milho cultivadas em campo e em laboratório, demonstraram que a acumulação de ABA originados nas raízes foi responsável pela restrição do desenvolvimento das folhas e pela manutenção do desenvolvimento do sistema radicular. O ABA pode desempenhar importante papel através de sinais químicos para comunicação das raízes com o dossel vegetativo, em resposta ao secamento do solo (FERRARI, PAZ e SILVA, 2015).

2.5.4 O ajustamento osmótico das células

Quando o solo seca, seu potencial mátrico fica mais negativo. As plantas podem continuar a absorver água do solo contanto que o potencial de água de suas células radiculares esteja mais baixo que o do solo. O ajustamento osmótico, ou a acumulação de solutos nas células é o processo pelo qual a planta diminui o seu potencial hídrico sem redução de turgor. De forma simplificada, o potencial hídrico (Ψ_w) na planta pode ser descrito pela equação: $\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p$, onde 's' é a componente osmótica e 'p' a de pressão (ENÉAS FILHO, MIRANDA e SILVEIRA, 2015).

As mudanças no potencial hídrico nos tecidos é resultado, em grande parte, de variações da componente osmótica. É importante não se confundir ajustamento osmótico com o aumento

relativo da concentração de solutos em função da desidratação celular. O ajuste osmótico é um aumento líquido no conteúdo de solutos da célula e independe da mudança do volume celular; esta resulta da perda de água. A redução do Ψ_s é tipicamente limitada entre 0,2 e 0,8 MPa, excetuando-se em plantas adaptadas às condições extremas de seca (NASCIMENTO *et al.*, 2011).

O ajuste se caracteriza pelo aumento na concentração de uma variedade de solutos como açúcares, ácidos orgânicos e íons, especialmente o K^+ . O aumento da concentração de íons no citoplasma inibe severamente a ação de várias enzimas. A acumulação de íons durante o ajustamento parece acontecer principalmente dentro do vacúolo celular, onde os íons não ocasionam prejuízos às atividades enzimáticas do citoplasma (COELHO, 2012).

Para manter o equilíbrio de potencial hídrico entre o suco vacuolar e o citoplasma, solutos orgânicos tendem a se acumular no citoplasma. Estes solutos são compatíveis com as enzimas e organelas ali presentes, portanto, não interferem nas funções enzimáticas. A prolina é um dos solutos compatíveis geralmente acumulados; outro exemplo é um álcool derivado de açúcar, o sorbitol. A síntese de solutos compatíveis também é de extrema importância no ajuste de plantas ao estresse salino (CORRÊA, *et al.*, 2017).

Ao longo de vários dias, contudo, outras mudanças, como a alteração da intensidade e do padrão de crescimento, assim como, na fotossíntese, também acontecem. Por isto, não está claro se o ajustamento osmótico é uma resposta independente e direta ao estresse hídrico ou se é resultado de outro fator, como a redução da taxa de crescimento. No entanto, folhas em que as células são capazes realizar o descrito ajuste, podem manter o turgor em potenciais de água no solo muito mais baixos, do que as que não se ajustam osmoticamente. A manutenção do turgor habilita a continuação do alongamento celular; ademais, facilita uma maior condutância estomática em níveis baixos potenciais de água, para proporcionar a captação de CO_2 para a fotossíntese (BIANCHI, GERMINO e SILVA, 2016).

Neste sentido, o ajustamento osmótico é uma espécie de aclimação para aumentar a tolerância à desidratação. A maioria da água extraída do solo é proveniente dos macroporos de onde é facilmente removida pelas raízes. A medida em que o solo vai secando, esta água vai sendo usada, restando armazenada apenas uma pequena fração que é fortemente retida nos microporos (VITAL, 2019).

O ajustamento osmótico permite à planta extrair uma maior quantidade desta água fortemente retida nos microporos, todavia, o aumento da água disponível pode ser pequeno. Assim, o custo do ajustamento osmótico para folha é compensado por um pequeno aumento na disponibilidade de água para a planta. Em qualquer dia após a última irrigação, as folhas de

beterraba mantiveram potencial hídrico mais baixo que as do feijão-caupi, todavia, a fotossíntese e transpiração durante o período de estresse eram apenas ligeiramente maiores na beterraba (RODRIGUES, 2018).

A diferença principal entre as duas plantas era o potencial hídrico foliar. Estes resultados levam a crer que o ajuste osmótico promove uma maior tolerância à desidratação, mas não tem um efeito tão significativo sobre a produtividade. O ajustamento osmótico também ocorre em células radiculares; todavia, a magnitude absoluta do ajuste é menor nas raízes que em folhas. Estas mudanças geralmente só aumentam ligeiramente a extração de água do solo seco (RODRIGUES, 2018).

Porém, o ajuste osmótico nas células do meristema radicular aumenta o turgor, permitindo a raiz manter o crescimento e aprofundar no solo em busca de água. O ajustamento osmótico é um valioso mecanismo de aclimação? Os solutos simplesmente se acumulam em um lugar nos tecidos por causa de inibição do crescimento devido ao estresse? Estas perguntas são difíceis de responder. Tentativas para incrementar o ajustamento osmótico em folhas, quer geneticamente (manipulando e selecionando materiais) ou fisiologicamente (induzindo o ajuste com déficits de água controlados), resultaram em plantas que crescem mais lentamente. Assim, o uso do ajustamento osmótico para melhorar o desempenho agrícola ainda deve ser melhor compreendido (MORALES, 2012).

2.5.5 Alteração do padrão de crescimento da planta

O déficit hídrico moderado também afeta o desenvolvimento do sistema radicular. A relação Raiz/parte-aérea (R/PA) parece ser governada por um equilíbrio funcional entre a absorção de água pelas raízes e a intensidade da taxa fotossintética da copa. Quando a absorção de água é reduzida, a expansão foliar é imediatamente afetada, todavia, a atividade fotossintética não é logo tão inibida. A inibição da expansão foliar reduz o consumo de carbono e energia da parte aérea, e uma maior proporção de fotoassimilados é alocada para o crescimento adicional do sistema radicular (BELO, 2011).

A parte apical das raízes, situadas na porção seca do solo, via de regra, as camadas mais superficiais, perdem turgor e são suberizadas, ao mesmo tempo em que ocorre uma proliferação de raízes novas nas camadas mais profundas e úmidas do solo. Assim, é comum constatar sistema radicular raso quando todas as camadas do solo são úmidas, e profundos em condições de seca (BELO, 2011).

Este ajuste pode ser considerado um terceiro mecanismo de defesa contra seca. A diferença nos padrões de crescimento da planta pode ser fisiologicamente explicada pela menor sensibilidade das raízes ao ABA em relação a parte aérea. Além disso, o ABA indiretamente favorece o crescimento das raízes em condições de estresse hídrico, devido a ele induzir a acumulação de prolina nas raízes. A acumulação de prolina ajuda a manutenção do turgor na região apical das raízes em crescimento (ajustamento osmótico), habilitando tais raízes crescerem mesmo em baixos potenciais de água no solo (BELO, 2011).

Curiosamente, o incremento na absorção de água, como resultado do crescimento radicular, é menos pronunciado em plantas reprodutivas, que nas vegetativas. Isto ocorre porque as frutas normalmente predominam como alternativa de dreno para os assimilados, em detrimento das raízes; assim os assimilados são dirigidos preferencialmente às frutas. Esta competição por assimilados, se constitui em uma explicação para a maior sensibilidade das plantas ao estresse hídrico durante a fase reprodutiva (ENÉAS FILHO, MIRANDA e SILVEIRA, 2015).

2.5.5.1 Aumento da resistência ao fluxo de água

Quando um solo seca, sua resistência ao fluxo de água nitidamente aumenta; particularmente se a tensão da água se aproximar do ponto murcha permanente. Este, de uma forma geral, é observado quando a água do solo alcança potencial próximo $-1,5\text{MPa}$. No ponto de murcha permanente, o suprimento de água para as raízes é extremamente lento para permitir reidratação dos tecidos das plantas, normalmente alcançado a noite. Porém, o solo não é a única fonte de resistência ao fluxo (FRIZZONE, 2017).

Na realidade, tem sido constatado, sob vários níveis de déficit hídrico, uma resistência ainda maior dentro da própria planta. Vários fatores podem contribuir para o aumento da resistência ao fluxo de água na planta durante o evento de depleção de água no solo. À medida que as células perdem água, elas encolhem. Quando isto ocorre nas células radiculares, pode promover um descolamento da superfície das raízes das partículas do solo, e os delicados pelos absorventes podem ser danificados (ARAÚJO JÚNIOR, *et al.*, 2019).

Ademais, como o prolongamento das raízes se torna cada vez mais lento à medida que o solo seca, a camada exterior do córtex da raiz (a hipoderme) frequentemente recebe uma camada extra de suberina – um lipídio impermeável à água – contribuindo para aumentar a resistência ao fluxo de água (PEIXOTO, 2020).

Outro fator importante que aumenta resistência ao fluxo é a cavitação, ou seja, a quebra de colunas d'água que frequentemente ocorre sob estresse hídrico severo. Com a transpiração as folhas perdem água; isto gera uma tensão que puxa a coluna d'água presente no interior do xilema. As forças adesivas, necessárias para suportar as grandes tensões, apenas são efetivas em colunas muito estreitas, nas quais a água adere às paredes (PEIXOTO, 2020).

A cavitação inicia-se a partir de potenciais de água moderados (-1 a -2 MPa) na maioria das plantas. Primeiro ocorre nos vasos de maior diâmetro. Assim, em árvores de tronco poroso como carvalho (*Quercus*), os vasos maiores (condutos de baixa resistência ao fluxo) são colocados em função no início da primavera, quando não há restrição de água (BRESINSKY, *et al.*, 2012).

Estes vasos deixam de funcionar durante o verão, quando então os vasos de menores diâmetros, produzidos durante o período de estresse hídrico, passam a conduzir o fluxo da transpiração. Esta troca tem consequências duradouras; até mesmo se a planta for novamente umedecida, o caminho original de baixa resistência permanece não funcional, reduzindo a eficiência de fluxo de água (BRESINSKY, *et al.*, 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa se desenvolveu sob as condições da Casas-de-vegetação pertencentes ao Departamento de Biociências, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Campus II, em Areia – PB (6°57'54.90"S Longitude; 35°42'52.80" O).

O microclima da região é caracterizado por verões longos e quentes, com céu quase encoberto, invernos curtos, abafados e com precipitações. Os ventos são fortes o ano todo, sendo que a temperatura varia de 18°C a 31°C e médias raramente inferiores a 17°C ou superiores a 33°C. A estação seca vai de agosto a janeiro, sendo outubro o mês com menor probabilidade de precipitações. A variação sazonal de precipitações mensais é bastante elevada, com máximo de cerca de 180 mm nos meses de abril e junho. Essa é a época da terceira safra do feijão-caupi em todo o Brasil (DIEBEL, NORDA e KRETCHMER, 2013).

Trata-se de pesquisa experimental, desenvolvida a partir da combinação entre quatro cultivares de feijão-caupi e quatro lâminas de irrigação, ao longo de todo o ciclo de cultura, com delineamento em forma de blocos casualizados. Os efeitos “cultivares” e “déficit hídrico” foram avaliados em esquema fatorial 4 x 4, por meio de análise de variância com teste “F”, com três repetições, perfazendo 16 tratamentos e 48 parcelas.

Para o fator “déficit hídrico” realizou-se análise de regressão polinomial, por ser um fator quantitativo, visando explicar, através de modelos matemáticos, o seu efeito em cada variável estudada. Para o fator “cultivares”, por ser qualitativo, foi aplicado o teste de Tukey, para comparação das médias, ao nível de 5% de probabilidade.

Os tratamentos foram resultado da combinação entre quatro cultivares de feijão-caupi (C1 = Corujinha, C2 = Macaíba Branca, C3 = Roxinho, C4 = Sempre Verde) e quatro lâminas de irrigação (L1 = 40%, L2 = 60%, L3 = 80% e L4 = 100% da Evapotranspiração da cultura - ETc) ao longo de todo o ciclo da cultura.

Neste estudo foram utilizados vasos plásticos com 30 cm de diâmetro e 25 cm de altura, com capacidade para 12 litros. Os recipientes foram perfurados na base, para facilitar a coleta da água de drenagem, foram preenchidos primeiro com uma camada de 0,5 kg de brita e depois com 0,5 kg de areia, visando facilitar a drenagem, evitando-se perda de solo. Utilizou-se, como substrato para o enchimento dos vasos um material de solo franco, não salino.

O solo foi analisado em termos de características físicas e químicas, bem como de fertilidade, sendo que os resultados são apresentados na Figura 3.

Figura 3 – Resultados da análise do solo relacionado ao experimento

Química e Fertilidade											
pH	P	S - SO ₄ ⁻²	K ⁺	Na ⁺	H ⁺ + Al ⁺³	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SB	CTC	M. O.
H ₂ O (1:2,5)	-----	mg/dm ³	-----	-----	cmol _c /dm ³			-----	-----	-----	-- g/kg --
6,1	25,54	-	58,61	0,03	1,55	0,05	2,15	0,60	2,93	4,48	9,96
P, K, Na: Extrator Mehlich 1					SB: Soma de Bases Trocáveis.						
H + Al: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 M, pH 7,0					CTC: Capacidade de Troca Catiônica						
Al, Ca, Mg: Extrator KCl 1 M					M.O.: Matéria Orgânica – Walkley-Black						
Física											
Areia 2 - 0,05 mm	Silte 0,05 - 0,002 mm	Argila < 0,002 mm	Argila dispersa	Grau de floculação	Densidade do solo	Densidade de partícula	Porosidade total	Umidade 0,01 0,03 1,50 MPa			CLASSE TEXTURAL
-----	g/kg	-----	- g/kg -	- g/kg -	- g/cm ³ -	- g/cm ³ -	- m ³ /m ³ -	-----	g/kg	-----	
864	37	99	-	-	-	-	-	-	-	-	
											Areia Franca

Fonte: LEITE (2019)

Esse foi o tipo de solo colocado em vasos, para o cultivo das cultivares de feijão-caupi relacionadas ao experimento (Figura 4). No orifício perfurado na base de cada vaso colocou-se uma mangueira com 20 cm de comprimento e 1,2 cm de diâmetro interno, fixada por meio de adesivo massa epóxi, visando à condução da água de drenagem para um recipiente plástico tipo garrafa *pet* com capacidade de 2,0 litros, de cor verde (visando dificultar a proliferação de algas em seu interior).

Figura 4 – Vasos com solo e cultivares de feijão-caupi

Fonte: O Autor

Três parcelas foram adicionadas (uma por bloco) e distribuídas ao longo do experimento para que fosse possível o cálculo de volume evapotranspirado. Diariamente, no mesmo horário, foi feita a irrigação dessas parcelas, de modo a se obter o mínimo possível de dreno. De posse do valor médio diário evapotranspirado, foi feita a irrigação das demais parcelas em estudo, considerando os referidos tratamentos (L1 = 40, L2 = 60, L3 = 80 e L4 = 100% da ETc).

3.1 VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS

As avaliações fisiológicas foram realizadas ao final de cada fase fenológica, considerando o desenvolvimento das cultivares no decorrer dos experimentos. A determinação das trocas gasosas foi feita conforme constam nos trabalhos de Ferraz, *et al.* (2012) e Silva, *et al.* (2015).

Utilizou-se, para isso, o Analisador Portátil de Gás por Infravermelho (*Infra Red Gas Analyzer* – IRGA, Modelo LICOR XT 6400), onde foram mensurados os valores de fotossíntese líquida (A) ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (gs) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e carbono interno (Ci) ($\mu\text{mol mol}^{-1}$). De posse destes dados, foram calculadas a eficiência no uso de água (EUA) (A/E) ($(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$) e a eficiência instantânea da carboxilação (EiC) (A/C_i) ($(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\mu\text{mol mol}^{-1})^{-1}$).

As medições foram feitas pela manhã, com temperatura de aproximadamente 28°C e as irrigações foram realizadas à tarde, com temperaturas de até 40°C, ambas sob luz natural. Ao meio dia a temperatura na Casa de Vegetação pode chegar a até 45°C.

3.2 VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO

O levantamento de dados de produção ocorreu a partir de 20 de novembro de 2019, onde foram coletados dados referentes à produtividade, como número de vagens maduras, número de sementes e número de sementes por vagens maduras, estendendo-se até 27/12/2019. Também foi calculado o peso de 100 sementes por cada planta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise de número de vagens maduras (NVM) (Tabela 1), o teste “F” apresentou significância a nível de 1% de probabilidade, indicando a influência da variável cultivar e a interação cultivar x água disponível.

Tabela 1. Análise de variância (ANOVA) para número de vagens maduras (NVM)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	204.91667	68.30556	19.8707	**
Água Disponível (F2)	3	212.25000	70.75000	20.5818	--
Int. F1 x F2	9	104.75000	11.63889	3.3859	**
Resíduo	32	110.00000	3.43750		
Total	47	631.91667			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

Percebe-se, por meio dos dados da Tabela 1, que a interação cultivar x água disponível, foi significativa a nível de 1%, mostrando que as cultivares sofrem de forma diferenciada os efeitos do déficit hídrico a que foram submetidas.

O déficit hídrico pode impactar na produtividade, ou seja, no NVM. No entanto, a baixa quantidade de grãos nas vagens de determinadas cultivares não significa que tenham peso menor, principalmente quando produzidas sob técnicas orgânicas. Assim, as características do solo, a época da safra e o manejo da produção são também fatores importantes a serem considerados quando se busca a produtividade do feijão-caupi (CARVALHO, 2012).

Conforme a análise da Tabela 2, percebe-se que houveram diferenças significativas entre as cultivares para o número de vagens, em que a cultivar Roxinho apresentou os menores valores.

Tabela 2. Teste de Tukey do fator cultivares para número de vagens maduras (NVM)

Tratamentos	Médias	
Corujinha	5.08333	a
Macaíba Branca	5.91667	a
Roxinho	0.75000	b
Sempre Verde	5.41667	a

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

Juntamente com as cultivares Santo Inácio e Tracuateus-192, a cultivar Roxinho não tolera o déficit hídrico, ainda que moderado, enquanto cultivares como Corujinha, Macaíba Branca e Sempre Verde, são mais tolerantes, mantendo a produtividade, mesmo nessas condições adversas (NASCIMENTO, *et al*, 2011).

Por meio da análise da Tabela 3, percebe-se que com 80% e 100% de água disponível, apenas a cultivar Roxinho apresentou um decréscimo no número de vagens maduras (NVM), o que pode caracterizar um retardo do desenvolvimento fisiológico dessa cultivar, quando comparado às outras ou sua incapacidade em manter as vagens até sua maturação.

Tabela 3. Médias da interação cultivar x água disponível para número de vagens maduras (NVM)

Cultivar	Água Disponível							
	40% de AD		60% de AD		80% de AD		100% de AD	
Corujinha	1.6667	a	2.0000	a	7.000	a	9.6667	a
Macaíba Branca	1.0000	a	5.3333	a	9.3333	a	8.0000	a
Roxinho	0.0000	a	1.6667	a	1.0000	b	0.3333	b
Sempre Verde	2.3333	a	4.6667	a	7.6667	a	7.0000	a

Diferença Mínima Significativa (dms) para colunas = 4.0971. CV = 43%. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Estes resultados são concordantes com resultados de estudo realizado na área experimental da Universidade Federal de Mato Grosso, Campus de Sinop, com cultivares de feijão-caupi plantadas em vasos, mostrando que os efeitos de déficit hídrico ocorrido na fase vegetativa do feijão-caupi provocaram reduções nos componentes de crescimento, porém, na fase reprodutiva, ou seja, na prefloração e no enchimento de grãos, seus efeitos foram mais acentuados. Na fase de germinação o solo está descoberto e suscetível a variações na quantidade de água, mas a produtividade reduz-se ao longo do desenvolvimento das plantas, independente dos intervalos de déficit hídrico, mas estreitamente relacionada à qualidade fisiológica das sementes das cultivares e da região onde são cultivadas (PEREIRA, *et al.*, 2019).

Na análise de números de sementes (NS) (Tabela 4), o teste “F” apresentou significância ao nível de 1% de probabilidade, indicando a influência da variável cultivar e interação entre a cultivar e água disponível.

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) para número de sementes (NS)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	27824.91667	9274.97222	19.6790	***
Água Disponível (F2)	3	36843.75000	12281.25000	26.0576	--
Int. F1 x F2	9	16471.25000	1830.13889	3.8831	***
Resíduo	32	15082.00000	471.31250		
Total	47	96221.91667			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

Percebe-se ainda, de acordo com a Tabela 4, que a interação cultivar x água disponível, foi significativa a nível de 1%, mostrando que as cultivares apresentam reações diferentes em relação à quantidade de água disponível no solo e, em última análise, ao déficit hídrico.

O Número de Sementes (NS) aumenta de acordo com o incremento da lâmina de água na irrigação, com redução no rendimento, na medida em que ocorre déficit hídrico. Essa redução pode chegar a 35% na etapa de crescimento vegetativo e pode variar de 32% a 72% na fase de frutificação. A diminuição ou aumento da lâmina de irrigação influencia linearmente na produtividade (FRANÇOIS, 2012).

Conforme a análise da Tabela 5, percebe-se que as cultivares Corujinha, Macaíba Branca e Sempre Verde não apresentaram diferença estatística entre elas, quando analisadas por meio do Teste de Tukey. Já a cultivar Roxinho, apresentou uma diferença estatística provocada pela sua baixa produção de sementes, uma vez que já tinha apresentado uma pequena quantidade de vagens, quando comparada com as demais.

Tabela 5. Teste de Tukey do fator cultivares para número de sementes (NS)

Tratamentos	Médias	
Corujinha	59.83333	a
Macaíba Branca	74.50000	a
Roxinho	11.66667	b
Sempre Verde	63.16667	a

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

O menor número de vagens por planta, como ocorreu com a cultivar Roxinho, diante do déficit hídrico, tem influência na produtividade, ou seja, no número de sementes (NS). Essa cultivar mostra-se mais sensível a esse fator ambiental, como é o caso da redução da oferta de água para a irrigação (GUIMARÃES, 2020).

A Tabela 6 mostra que com 80% e 100% de água disponível, apenas a cultivar Roxinho apresentou um decréscimo no NS, o que pode caracterizar um retardo do desenvolvimento fisiológico dessa cultivar quando comparada às outras.

Tabela 6. Médias da interação cultivar x água disponível para número de sementes (NS)

Cultivar	Água Disponível							
	40% de AD		60% de AD		80% de AD		100% de AD	
Corujinha	13.6667	a	22.0000	a	81.6667	a	122.0000	a
Macaíba Branca	10.6667	a	67.0000	a	107.0000	a	113.3333	a
Roxinho	0.0000	a	23.6667	a	18.0000	b	5.0000	b
Sempre Verde	25.0000	a	52.0000	a	85.6667	a	90.0000	a

Diferença Mínima Significativa (dms) para colunas = 47.9743. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

A ocorrência de estresse hídrico durante a fase vegetativa inicial pode ter provocado a redução no crescimento e na superfície fotossintética, culminando no menor número de flores, de vagens por planta e de grãos por vagens (SANTOS, 2016).

Na análise de número de sementes por vagem (NSV), Tabela 7, observa-se que houve significância a nível de 1% de probabilidade, porém não apresentou significância na interação cultivar x água Disponível.

Tabela 7. Análise de variância (ANOVA) para número de sementes por vagens maduras (NSVM)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	336.80062	112.26688	4.7447	**
Água Disponível (F2)	3	254.39563	84.79854	3.5838	--
Int. F1 x F2	9	236.08521	26.23169	1.1086	ns
Resíduo	32	757.17333	23.66167		
Total	47	1584.45479			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

Percebe-se ainda, na Tabela 7, que a interação cultivar x água disponível não foi significativa, no sentido de influenciar no número de vagens maduras.

Nesse caso, os efeitos genéticos foram superiores aos efeitos ambientais, relacionados ao déficit hídrico, o que indica provável ganho genético nas próximas gerações das cultivares de feijão-caupi (MEIRA, *et al.*, 2017).

De acordo com a análise da Tabela 8, percebe-se que em relação ao número de sementes por vagens maduras (NSVM), a cultivar Roxinho apresentou diferença estatística em relação a Macaíba Branca e Sempre Verde, quando analisada por meio do Teste de Tukey.

Tabela 8. Teste de Tukey do fator cultivares para número de sementes por vagens maduras (NSVM)

Tratamentos	Médias	
Corujinha	8.35833	ab
Macaíba Branca	10.65833	a
Roxinho	4.73333	b
Sempre Verde	11.60833	a

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

Esse resultado contrasta com estudo realizado no estado do Acre, onde a cultivar Roxinho apresentou comprimento de até 20cm na vagem madura, o que, conseqüentemente, aumentou o NSVM. Isso ocorreu em função de precocidade na floração, considerada uma estratégia do feijoeiro para se antecipar ao inverno amazônico, quando as áreas de plantio são inundadas e também para escapar do déficit hídrico em áreas semiáridas (OLIVEIRA, *et al.*, 2015).

Pela Tabela 9, verifica-se que houve significância a 1% de probabilidade, quando aplicada regressão linear pela equação $NVM = 2.02916667 + 0.09729167 \times AD$, com coeficiente de correlação (r) = 0.94498832 e coeficiente de determinação (R^2) = 0.89300292. Assim, conclui-se que quanto maior a lâmina de água aplicada, maior será o número de sementes por vagem madura.

Tabela 9. Regressão polinomial para NVM, em função da água disponível (AD)

Reg. Linear	1	227.17604	227.17604	9.6010	**
Reg. Quadra	1	24.51021	24.51021	1.0359	ns
Reg. Cúbica	1	2.70938	2.70938	0.1145	ns
Total	3	254.39563	GL-resíduo = 32		

O número de vagens por planta diminuiu com o aumento do estresse hídrico, principalmente para a cultivar Roxinho. Assim, a redução da disponibilidade de água parece ser o principal fator de redução da produção de grãos de feijão-caupi (FERREIRA, 2017).

Na análise do peso de 100 sementes maduras (P100) (Tabela 10), o teste “F” não apresentou significância na interação cultivar x água disponível, mostrando não sofrer influência da variável cultivar. Porém, apresentou significância a 1% de probabilidade com relação à referida cultivar.

Tabela 10. Análise de variância (ANOVA) para peso de 100 sementes (P100)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	1588.47296	529.49099	5.8579	***
Água Disponível (F2)	3	528.68029	176.22676	1.9496	--
Int. F1 x F2	9	1099.52254	122.16917	1.3516	ns
Resíduo	32	2892.46440	90.38951		
Total	47	6109.14018			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

Percebe-se ainda, de acordo com a Tabela 10, que a interação cultivar x água disponível não foi significativa.

O que parece interferir no peso das sementes das vagens de feijão-caupi é a densidade das plantas no solo e não a quantidade de água disponível. Essa condição foi observada em experimental da Embrapa Meio-Norte e a redução no peso das sementes ainda é maior quando se trata de produção de sequeiro (SILVA JÚNIOR, 2018).

Conforme análise da Tabela 11, percebe-se que as cultivares Corujinha, Macaíba Branca e Sempre Verde não apresentaram diferença estatística entre elas, quando analisadas por meio do Teste de Tukey.

Tabela 11. Teste de Tukey do fator cultivares para peso de 100 sementes (P100)

Tratamentos	Médias	
Corujinha	21.14833	a
Macaíba Branca	17.90500	ab
Roxinho	8.63333	b
Sempre Verde	23.89583	a

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

Enquanto isso, a cultivar Roxinho apresentou uma diferença significativa em relação às cultivares Corujinha e Sempre Verde.

Como foi mencionado, não parece ser o regime de irrigação que afeta o peso de 100 sementes, mas o tipo de cultivar. No caso, a baixa produtividade da cultivar Roxinho resulta do seu próprio genótipo (GUIMARÃES, 2020).

Na Tabela 12, não se constatou significância probabilística em nenhuma das três aplicações de regressão, confirmando indiferença na contagem de P100, em função do volume de água disponível.

Tabela 12. Regressão polinomial para peso de 100 sementes (P100), em função da água disponível

Reg. Linear	1	326.45670	326.45670	3.6117	ns
Reg. Quadra	1	201.35117	201.35117	2.2276	ns
Reg. Cúbica	1	0.87242	0.87242	0.0097	ns
Total	3	528.68029	GL-resíduo = 32		

O estresse hídrico do solo pode causar a diminuição da brotação, translocação e enchimento de grãos das cultivares de feijão-caupi. A sensibilidade é maior nas fases de floração e produção, com impacto mais limitado nas fases de maturação e vegetativa, desde que a planta consiga se recuperar da insuficiência anterior de água, mostrando que o fator importante é o genótipo (MOURA, 2019).

Na análise da taxa de fotossíntese líquida (A) (Tabela 13), o teste “F” não apresentou significância probabilística, não revelando interferência quanto à cultivar e nem interação cultivar x água Disponível.

Tabela 13. Análise de variância (ANOVA) para taxa de fotossíntese líquida (A)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	31.14444	10.38148	1.4460	ns
Água Disponível (F2)	3	103.69049	34.56350	4.8142	--
Int. F1 x F2	9	71.38289	7.93143	1.1047	ns
Resíduo	32	229.74329	7.17948		
Total	47	435.96112			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

A ocorrência de estresse hídrico durante a fase vegetativa inicial provoca redução do crescimento e da superfície fotossintética (SANTOS, 2016). Este fato seria avaliado na segunda parte deste estudo, não realizada em razão da pandemia de COVID-19.

Na análise da condutância estomática (Gs) (Tabela 14), o teste “F” apresentou significância ao nível de 1% de probabilidade, indicando influência da variável cultivar. Na interação cultivar x água disponível apresentou significância a 5% de probabilidade.

Tabela 14. Análise de variância (ANOVA) para condutância estomática (Gs)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	10.27051	3.42350	12.6261	**
Água Disponível (F2)	3	1.68906	0.56302	2.0765	--
Int. F1 x F2	9	5.95296	0.66144	2.4394	*
Resíduo	32	8.67664	0.27115		
Total	47	26.58918			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

Percebe-se ainda, através da Tabela 14, que a interação, cultivar x água disponível, foi significativo a nível de 5%, mostrando que a quantidade de água influencia na condutância estomática.

A condutância estomática do feijão-caupi é prejudicada sob situação de déficit hídrico, quando as cultivares reduzem o fluxo estomático, de forma a resistirem à seca, inibindo também a área foliar. Contudo, precisam evitar rapidamente a perda de água e manterem taxas fotossintéticas razoáveis, para não chegarem à murcha total e morte (NASCIMENTO, *et al.*, 2011).

Conforme a análise da Tabela 15, percebe-se que as cultivares Corujinha e Macaíba Branca não apresentaram diferença estatística entre elas, quando analisadas por meio do Teste de Tukey; já as cultivares Roxinho e Sempre Verde apresentaram uma diferença estatística.

Tabela 15. Teste de Tukey do fator cultivares para condutância estomática (Gs)

Tratamentos	Médias	
Corujinha	1.61748	a
Macaíba Branca	1.34159	a
Roxinho	0.61290	b
Sempre Verde	0.54042	b

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

Roxinho e Sempre Verde são cultivares que realizam de forma mais rápida o fechamento dos estômatos, para evitar a perda de água durante situações de déficit hídrico. Isso faz com que a produtividade possa diminuir, o que se comprovou em relação a cultivar Roxinho, enquanto

a cultivar Sempre Verde manteve o seu índice de produtividade, mostrando que não é apenas o déficit hídrico em geral que conta na condutância estomática, mas também o tratamento aplicado a cada genótipo. Uma cultivar mostra-se mais sensível ao déficit hídrico do que a outra (LIMA, 2017).

Por meio da análise da Tabela 16, percebe-se que as cultivares Macaíba Branca e Corujinha apresentaram significância quanto a Condução Estomática, em relação às demais cultivares, quando submetidas à 40% de disponibilidade de água.

Tabela 16. Médias da interação cultivar x água disponível para condutância estomática (Gs)

Cultivar	Água Disponível							
	40% de AD		60% de AD		80% de AD		100% de AD	
Corujinha	2.2341	a	1.8351	a	0.7817	a	1.6191	ab
Macaíba Branca	0.6723	b	1.2066	ab	1.2423	a	2.2451	a
Roxinho	0.4452	b	0.7086	ab	0.6873	a	0.6105	b
Sempre Verde	0.3874	b	0.4805	b	0.5121	a	0.7816	b

Diferença Mínima Significativa (dms) para colunas = 4.0971. CV = 43%. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Ficou evidenciado que o processo de redução hídrica diminui a abertura dos estômatos e não ocorre somente em resposta à radiação solar, mas, principalmente, em função do potencial hídrico do solo, mostrando que cada genótipo reage de forma diferente à menor quantidade de água (NASCIMENTO, *et al.*, 2011).

Na análise de concentração de CO₂ interno (Ci) (Tabela 17), o teste “F” apresentou significância ao nível de 1% de probabilidade, indicando a influência da variável cultivar e 5% de probabilidade relativa à interação cultivar x água disponível.

Tabela 17. Análise de variância (ANOVA) para concentração de CO₂ interno (Ci)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	11878.45901	3959.48634	48.2595	**
Água Disponível (F2)	3	776.15266	258.71755	3.1533	--
Int. F1 x F2	9	2054.47091	228.27455	2.7823	*
Resíduo	32	2625.46488	82.04578		
Total	47	17334.54745			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

Percebe-se ainda, conforme a Tabela 17, que a interação cultivar x água disponível foi significativa a nível de 5%, mostrando que a quantidade de água disponível afeta a taxa de concentração de CO₂ no feijão-caupi.

Cultivares diversas podem apresentar diferenças entre as interações na concentração interna de CO₂ (Ci), pois os genótipos reagem de maneira diversa ao déficit hídrico. Em termos gerais, a concentração interna de CO₂ (Ci) no feijão-caupi apresenta acúmulo diante de déficit hídrico mais severo e pequenas variações quando a disponibilidade de água é maior, estando esses comportamentos associados à condutância estomática e fotossíntese líquida da planta em situações de seca (DUTRA, *et al.*, 2015).

Na análise da Tabela 18, percebe-se que as cultivares Corujinha e Macaíba Branca apresentaram diferença estatística em relação às cultivares Roxinho e Sempre Verde, quando analisada por meio do Teste de Tukey.

Tabela 18. Teste de Tukey do fator cultivares para concentração de CO₂ interno (Ci)

Tratamentos	Médias	
Corujinha	310.21580	a
Macaíba Branca	302.60620	a
Roxinho	278.90120	b
Sempre Verde	272.57280	b

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

Algumas cultivares de feijão-caupi, como a Roxinho, que reage mais ao déficit hídrico e Sempre Verde, que reage um pouco menos, fecham automaticamente seus estômatos diante da falta de água, o que impacta na concentração de CO₂ interno (Ci), pois é captado em menor quantidade. Trata-se de estratégia de defesa ao déficit hídrico, principalmente nas regiões semiáridas (FREITAS, *et al.*, 2017).

Conforme a análise da Tabela 19, percebe-se que com 40% de água disponível ocorreu importante discriminação do percentual de Concentração de CO₂ interno, ficando cada cultivar com sua particularidade fisiológica.

Tabela 19. Médias da interação cultivar x água disponível para concentração de CO₂ interno (Ci)

Cultivar	Água Disponível							
	40% de AD		60% de AD		80% de AD		100% de AD	
Corujinha	323.6873	a	311.4693	a	302.6110	a	303.0953	a
Macaíba Branca	292.5480	b	306.6733	a	298.5427	a	312.6607	a
Roxinho	269.9837	c	292.9250	ab	276.5970	b	276.0990	b
Sempre Verde	272.8427	bc	274.2120	b	263.7853	b	279.4510	b

Diferença Mínima Significativa (dms) para colunas =4.0971. CV = 43%. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

Considerando o déficit hídrico de 80%, as cultivares Corujinha e Macaíba Branca apresentaram maior quantidade de CO₂ interno o que, provavelmente, resultará em maior fitomassa, em função da fase bioquímica da fotossíntese ser mais longa (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Na análise da transpiração foliar (E) (Tabela 20), o teste “F” não apresentou significância probabilística quanto à interação aultivar x água disponível, porém houve significância a 1% de probabilidade, mostrando que houve influência da variável cultivar quanto ao percentual de transpiração.

Tabela 20. Análise de variância (ANOVA) para transpiração foliar (E)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	13.69975	4.56658	6.7588	**
Água Disponível (F2)	3	33.37231	11.12410	16.4644	--
Int. F1 x F2	9	10.21708	1.13523	1.6802	ns
Resíduo	32	21.62068	0.67565		
Total	47	78.90982			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

A variável cultivar mostra-se sensível ao déficit hídrico nos estudos, correlacionada aos intervalos de irrigação. Da primeira semana de déficit até a quarta semana, a queda na transpiração foliar (E) pode chegar a uma média de 9% de diferença entre duas cultivares. Aquelas que são mais sensíveis ao déficit hídrico apresentam maior queda na transpiração foliar (E) (FERREIRA, 2017).

A análise da Tabela 21 mostra que a cultivar Corujinha apresentou diferença significativa em relação às demais cultivares, quando analisadas de acordo com o Teste de Tukey.

Tabela 21. Teste de Tukey do Fator Cultivares para Transpiração Foliar (E)

Tratamentos	Médias	
Corujinha	6.30658	b
Macaíba Branca	7.80808	a
Roxinho	7.20092	ab
Sempre Verde	7.07575	ab

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

As cultivares com maiores taxas de transpiração foliar (E) demonstraram maior resistência ao déficit hídrico, do que a cultivar que apresentou a taxa menor. Essa taxa será tanto mais baixa, quanto menor for a lâmina de água aplicada, podendo chegar a valores inferiores a 1, se a redução for de até 75% (DUTRA, *et al.*, 2015).

Pela Tabela 22, verificou-se que houve significância a 1% de probabilidade quando aplicada regressão cúbica pela equação $E = 80.70983333 + 10.28560764 AD - 0.15637115 AD^2 + 0.00074727 AD^3$, com coeficiente de correlação (r) = 0.99999999 e coeficiente de determinação (R^2) = 0.99999998.

Tabela 22. Regressão Polinomial para Transpiração Foliar (E) em função da água disponível

Reg. Linear	1	1.84310	1.84310	0.0225	ns
Reg. Quadra	1	2.36563	2.36563	0.0288	ns
Reg. Cúbica	1	771.94392	771.94392	9.4087	**
Total	3	776.15266	GL-resíduo = 32		

As cultivares de feijão-caupi, quando submetidas à redução hídrica, apresentam baixa transpiração, refletindo na redução de altura das plantas. Portanto, se conclui que quanto maior a lâmina de água aplicada, maior será o número de sementes por vagem madura, bem como na altura dos exemplares das cultivares (MEIRA, *et al.*, 2017).

Na análise de eficiência instantânea do uso da água (A/E) (Tabela 23), o teste “F” apresentou significância a nível de 1% de probabilidade, indicando a influência da variável cultivar e interação cultivar x água disponível.

Tabela 23. Análise de variância (ANOVA) para eficiência instantânea do uso da água (A/E)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	4.37572	1.45857	32.9901	***
Água Disponível (F2)	3	1.09568	0.36523	8.2607	--
Int. F1 x F2	9	1.91279	0.21253	4.8071	***
Resíduo	32	1.41480	0.04421		
Total	47	8.79898			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F.

Percebe-se ainda, por meio dos dados da Tabela 23, que a interação cultivar x água disponível foi significativa a nível de 1%, sendo assim, não apresentou uma equação representativa apenas em relação à água disponível.

A relação entre cultivar e água disponível tem alta significância na eficiência instantânea do uso da água, sendo que algumas conseguem repor rapidamente o que foi perdido diante do déficit hídrico (DUTRA, *et al.*, 2015).

Por meio da análise da Tabela 24, percebe-se que as cultivares Roxinho, Macaíba Branca e Sempre Verde não apresentaram diferença estatística entre elas, quando analisadas por meio do Teste de Tukey; já a cultivar Corujinha apresentou uma diferença estatística significativa em relação às outras cultivares.

Tabela 24. Teste de Tukey do fator cultivares para eficiência instantânea do uso da água (A/E)

Tratamentos	Médias	
Corujinha	3.51824	a
Macaíba Branca	2.81472	b
Roxinho	2.81238	b
Sempre Verde	2.83685	b

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

Nesse caso, a cultivar Corujinha conseguiu repor mais rápido os prejuízos causados pelo déficit hídrico do que as demais cultivares, conseguindo manter suas atividades fisiológicas estáveis (SANTOS, 2016).

Conforme a análise da Tabela 25, percebe-se que houve um deslocamento em relação a eficiência instantânea do uso da água à medida que se reduzia sua disponibilidade para 40%, exceto para a cultivar Corujinha.

Tabela 25. Médias da interação cultivar x água disponível para eficiência instantânea do uso da água (A/E)

Cultivar	Água Disponível							
	40% de AD		60% de AD		80% de AD		100% de AD	
Corujinha	3.9823	a	3.6951	a	3.2337	a	3.1619	a
Macaíba Branca	3.1808	b	2.7953	b	2.9286	a	2.3542	b
Roxinho	2.9413	b	2.5100	b	2.8528	a	2.9455	a
Sempre Verde	2.7910	b	2.7353	b	3.0486	a	2.7725	ab

Diferença Mínima Significativa (dms) para colunas = 4.0971. CV = 43%. As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si

Observou-se que a variável A/E apresentou interação significativa entre a disponibilidade de água e as cultivares. A A/E representa a relação entre fotossíntese e transpiração, onde os valores observados relacionam a quantidade de molécula de CO₂ fixado pela planta por cada molécula de H₂O perdida (FERRAZ, *et al.*, 2012).

Nesse sentido, a menor taxa de A/E observada pode ser reflexo dos aumentos nas taxas de assimilação de CO₂ e transpiração, além de ter forte relação com aumento na radiação solar e temperatura do ar, assim como na redução na umidade relativa do ar, considerando que as condições climáticas influenciam as trocas gasosas (FERRAZ, *et al.*, 2012).

Na análise da eficiência da carboxilação A/Ci (Tabela 26), o teste “F” não apresentou significância a nível probabilístico, não indicando haver influência da variável cultivar e a interação cultivar x água disponível.

Tabela 26. Análise de variância (ANOVA) para eficiência da carboxilação (A/Ci)

FV	GL	SQ	QM	F	
Cultivar (F1)	3	0.00007	0.00002	0.2461	ns
Água Disponível (F2)	3	0.00126	0.00042	4.2002	--
Int. F1 x F2	9	0.00080	0.00009	0.8915	ns
Tratamentos	15	0.00213	0.00014	1.4242	ns
Resíduo	32	0.00319	0.00010		
Total	47	0.00532			

FV = Fonte de variação, GL = Graus de liberdade, SQ = Soma de quadrado, QM = Quadrado médio, F = Estatística do teste F, MG = Média geral

A eficiência instantânea de carboxilação (A/Ci) não mostra relação com a cultivar, mas possui estreita relação com a concentração intracelular de CO₂ e com a taxa de assimilação de dióxido de carbono. Entre 20°C e 30°C são obtidos os valores mais expressivos para as taxas de

A/Ci. As cultivares com maior resistência ao déficit hídrico apresentam as melhores taxas (FERRAZ, *et al.*, 2012).

A Tabela 27, apresentou significância a 1% de probabilidade quando aplicada regressão linear pela equação $A/Ci = 0.05614583 + 0.00022833 AD$, com coeficiente de correlação (r) = 0.99630937 e coeficiente de determinação (R^2) = 0.99263236. Então, conclui-se que quanto maior a lâmina de água aplicada, maior será a eficiência da carboxilação (A/Ci).

Tabela 27. Regressão polinomial para eficiência da carboxilação (A/Ci), em função da água disponível

Reg. Linear	1	0.00125	0.00125	12.5556	**
Reg. Quadra	1	0.00000	0.00000	0.0097	ns
Reg. Cúbica	1	0.00000	0.00000	0.0352	ns
Total	3	0.00126	GL-resíduo = 32		

A carboxilação é mais eficiente nos genótipos tolerantes ao déficit hídrico e que também apresente maior capacidade fotossintética. Assim, os genótipos mais sensíveis apresentam menor eficiência na carboxilação (LIMA, 2017).

5 CONCLUSÕES

As conclusões a que se pode chegar, após a realização do estudo, foram de que a aplicação do racionamento de água apresentou discriminação em quase todos os itens avaliados nas variáveis fisiológicas; a cultivar Roxinho foi a mais sensível à aplicação do estresse hídrico, provavelmente por apresentar um atraso em seu desenvolvimento fisiológico, se comparada às outras cultivares; foi também observada uma produtividade maior para a cultivar Sempre Verde.

Sobre as variáveis de produção, em relação ao número de sementes por vagem (NSV), sobressaíram-se as cultivares Sempre Verde e Macaíba Branca e em relação à variável Peso de 100 sementes (P100), destacaram-se as cultivares Sempre Verde e Corujinha.

Esses resultados fizeram com que o interesse pela continuidade dos estudos sobre o feijão-caupi e o déficit hídrico aumentasse, principalmente no que se refere à aplicação de técnicas para minimizar o problema e conseguir aumentar a produtividade, mesmo diante de situações de seca, como ocorre no semiárido.

PERSPECTIVAS DE ESTUDOS FUTUROS

Dentre as técnicas encontradas na literatura pesquisada, destacou-se o uso do mandacaru, planta largamente encontrada na vegetação da caatinga do semiárido, produz a rizobactéria *Bacillus aryabhattai* e tem sido usada no cultivo de milho em condições de seca, protegendo a lavoura de perdas ocasionadas pelo déficit hídrico. O uso da técnica, pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) ocorre no contexto da busca por uma agricultura mais eficiente e sustentável, que leve em conta as causas do que afeta as plantas e o equilíbrio do solo e não apenas a correção dos sintomas (LIMA, 2021).

Em estudo futuro sugere-se o uso dessa técnica no cultivo de feijão-caupi, em condições de déficit hídrico, para analisar os efeitos protetores que, conforme a cultivar escolhida pelo produtor, pode resultar em maior aproveitamento do plantio. Contribuir com esses estudos seria gratificante.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO JÚNIOR, G.N. *et al.* Estresse hídrico em plantas forrageiras: uma revisão. **Revista Pubvet**, v. 13, n. 1, p.1-10, jan. 2019. Disponível em: <https://www.pubvet.com.br/uploads/6257ac3ac8fea78dc6103292937f9d35.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2021.
- BELO, E.S. **Efeitos do estresse hídrico no metabolism de gabirobeira**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – da Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2011. 131 p.
- BEZERRA, A.A.C. *et al.* Morfofisiologia de produção de feijão-caupi, cultivar BRS Novaera, em função da densidade de plantas. In: SILVA-MATOS, R.R.S.; OLIVEIRA, P.S.T.; PEREIRA, R.Y.F. (orgs.). **Ciências Agrárias: conhecimentos científicos e técnicos e difusão de tecnologias 2**. Ponta Grossa: Atena, 2020. P. 165-175.
- BIANCHI, L.; GERMINO, G.H.; SILVA, M.A. Adaptação das plantas ao estresse hídrico. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 5, n. 4, p. 15-32, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312119183_Adaptacao_das_Plantas_ao_Deficit_Hidrico. Acesso em: 8 maio 2021.
- BRESINSKY, A. *et al.* **Tratado de Botânica de Strasburger**. 36. ed. Porto Alegre: Artmed, 2012.
- BROETTO, F.; GOMES, E.R.; JOCA, T.A.C. (orgs.). **O estresse das plantas: teoria e prática**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2017.
- CARVALHO, J.F. **Avaliação de cultivares de feijão-caupi e feijão vagem arbustivo em sistema orgânico de produção**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012. 86 p.
- CLEMENTE, D.I. **Estresse hídrico sobre caracteres morfofisiológicos e agrônômicos em populações de milho**. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – da Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2017. 114 p.
- COELHO, J.B.M. **Potencial osmótico, solutos orgânicos e comportamento hídrico do feijão vigna cultivado em solos salinizados**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – da Universidade Rural de Pernambuco, Recife, 2012. 73 p.
- CONAB. Companhia Brasileira de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: grãos – sexto levantamento. **Observatório Agrícola**, Brasília, v. 7, n. 6, p. 1-89, mar. 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/item/download>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- _____. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira de grãos – sétimo levantamento. **Observatório Agrícola**, Brasília, v. 8, n. 7, p. 9-116, abr. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 1 jul. 2021.
- CONTI JÚNIOR, J.L.F. **Parâmetros fisiológicos como indicadores de tolerância à seca em clones de *Eucalyptus* spp.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) – da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Jaboticabal, 2019. 44 p.

CORREIA, C.V. *et al.* Mecanismos metabólicos e morfológicos em vegetais para adaptação ao estresse salino. In: BROETTO, F.; GOMES, E.R.; JOCA, T.A.C. (orgs.). **O estresse das plantas: teoria e prática**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2017. P. 64-77.

COSTA, N.F. **Aspectos ecofisiológicos da catingueira e do pinhão-bravo em uma área de caatinga de Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014. 81 p.

DIEBEL, J.; NORDA, J.; KRETCHMER, O. **Condições meteorológicas médias de Areia – Brasil**. WeatherSpark, 2013. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/31416/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Areia-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 20 jul. 2021.

DUTRA, A.F. *et al.* Parâmetros fisiológicos e componentes de produção de feijão-caupi cultivado sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 2, p. 189-97, 2015. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1190/119039562004.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

ENÉAS FILHO, J.; MIRANDA, M.R.A.; SILVEIRA, J.A.G. **Fisiologia vegetal**. Fortaleza: UFC, 2015. Disponível em: <http://www.fisiologiavegetal.ufc.br/apostila.htm>. Acesso em: 18 jun. 2021.

FERRARI, E.; PAZ, A.; SILVA, A.C. Déficit hídrico no metabolismo da soja em semeaduras antecipadas no Mato Grosso. **Revista Nativa**, Sinop, v. 3, n. 1, p. 67-77, jan./mar. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/274696470_DEFICIT_HIDRICO_NO_METABOLISMO_DA_SOJA_EM_SEMEADURAS_ANTECIPADAS_NO_MATO_GROSSO_WATER_DEFICIT_ON_THE_SOYBEAN_METABOLISM_IN_EARLY_SOWINGS. Acesso em: 21 jun. 2021.

FERRAZ, R.L.S. *et al.* Trocas gasosas e eficiência fotossintética em ecótipos de feijoeiro cultivados no semiárido. **Revista de Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 181-88, abr./jun. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/pat/v42n2/10.pdf>. Acesso em: 28 maio 2021.

FERREIRA, A.C. **Fisiologia e morfologia de plantas de feijão sob deficiência hídrica**. Dissertação (Mestrado em Ciências/Fitotecnia) – da Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017. 63 p.

FRANÇOIS, T. **Relações hídricas e trocas gasosas em plantas de feijão submetidas à irrigação deficitária**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. 115 p.

FREIRE FILHO, F.R. *et al.* **Feijão-caupi no Brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2011. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/916831/1/feijaocaupi.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2021.

FREIRE FILHO, F.R. *et al.* A cultura: aspectos socioeconômicos. In: VALE, J.C.; BERTINI, C.; BORÉM, A. (org.). **Feijão-caupi: do plantio à colheita**. Viçosa: Ed. UFV, 2017. P. 9-34.

FREIRE FILHO, F.R.; COSTA, A.F. Feijão-caupi: classificação botânica e importância. In: COSTA, A.F. (org.). **Cadernos do Semiárido – Riquezas e Oportunidades**, n. 17. Recife: CREA-PE/ Edit. UFRPE, 2020. P. 11-20. Disponível em: <https://www.creape.org.br/wp->

content/uploads/2020/10/CADERNO-SEMIARIDO-17-FEIJAO-CAUPI.pdf. Acesso em: 29 jun. 2021.

FREITAS, R.M.O. *et al.* Physiological responses of cowpea under water stress and rewatering in no-tillage and conventional tillage systems. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 3, p. 559-67, jul.set. 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/index.php/caatinga/article/view/5228/pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

FRIZZONE, J.A. **Necessidade de água para irrigação**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2017. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/leb/disciplinas/Frizzzone/LEB_1571/TEXTOS_COMPLEMENTAR_2_-_NECESSIDADE_DE_AGUA_PARA_IRRIGACAO.pdf. Acesso em: 18 jun. 2021.

GONÇALVES, F.L.T. **Biometeorologia vegetal**. São Paulo: USP/IAG, 2020. Disponível em: <http://www.dca.iag.usp.br/material/fgoncalv/old/aula5.pdf>. Acesso em: 12 maio 2021.

GUIMARÃES, D.G. **Parâmetros genéticos em cultivares de feijão-caupi sob níveis de irrigação, salinidade e tipos de adubações**. Tese (Doutorado em Agronomia) – da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2020. 211 p.

HAGUENAUER, G.M. **Tecnologias de irrigação e o uso eficiente da água: o caso do gotejamento superficial**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. 113 p.

JACINTO JUNIOR, S.G. *et al.* Respostas fisiológicas de genótipos de fava (*Phaseolus lunatus* L.) submetidas ao estresse hídrico cultivadas no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 34, n. 3, p. 413-22, set. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbmet/v34n3/0102-7786-rbmet-34-03-0047.pdf>. Acesso em: 21 maio 2021.

KELLING, C.R.S. **Resposta da transpiração e do crescimento foliar de cultivares de crisântemo (*Dentratheuma grandiflora* Tzvelev) à fração de água transpirável no substrato**. Tese (Doutorado em Ciências/Fitotecnia) – da Universidade de São Paulo/ESALQ, Piracicaba, 2014. 75 p.

KLEIN, C.; KLEIN, V.A. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – ReGeT**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 21-9, jan./abr. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/14990/pdf>. Acesso em: 17 jun. 2021.

KOTECK, L. **Avaliação da deficiência hídrica no estado de Santa Catarina, Brasil**. Relatório de Estágio Supervisionado (Bacharelado em Agronomia) – da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011. 43 p.

LAGO, I. **Transpiração e crescimento foliar de clones de batata e de mandioca em resposta à fração de água transpirável no solo**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011. 92 p.

LEITE, R.S. **Déficit hídrico e sua atenuação em plantas de fisális. (*Physalis angulata* L.)**. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) – da Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2019. 81 p.

LEITE, A.L. **Laudo da análise de solo – n. 39.630**. Areia: Universidade Federal da Paraíba, 2019.

LIMA, E.G.S. *et al.* **Transpiração e condutância estomática em folhas de mudas de *Platonia insignis* (Clusiaceae) submetidas ao estresse hídrico e reidratação**. Anais 64º Congresso Nacional de Botânica, Belo Horizonte, 10-15 nov. 2013. Disponível em: <https://dtihost.sfo2.digitaloceanspaces.com/sbotanicab/64CNBot/resumo-ins20469-id6219.pdf>. Acesso em: 5 maio 2021.

LIMA, E.N. **Análise fisiológica, bioquímica e proteômica de respostas ao estresse hídrico em genótipos de feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]**. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. 120 p.

LIMA, E. **Bactéria encontrada no mandacaru vira bioproduto que promove tolerância à seca em plantas**. Embrapa, 27 abr. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/60941801/bacteria-encontrada-no-mandacaru-vira-bioproduto-que-promove-tolerancia-a-seca-em-plantas>. Acesso em: 1 jul. 2021.

LOPES SOBRINHO, O.P. *et al.* **Uso de potenciais da água na planta no manejo da irrigação: uma revisão**. Mais Soja, 29 jul. 2018. Disponível em: <https://maissoja.com.br/uso-de-potenciais-da-agua-na-planta-no-manejo-da-irrigacao-uma-revisao/>. Acesso em: 23 jun. 2021.

MALISZEWSKI, E. **Mato Grosso se destaca em feijão-caupi: cadeia tem condições de crescer mais no Brasil e atingir mercado externo**. Agrolink, 25 jun. 2020. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/mato-grosso-se-destaca-em-feijao-caupi_435791.html. Acesso em: 1 jul. 2021.

MEDEIROS, L. **Modelos de probabilidade e inferência estatística: análise de variância – Parte 2**. UFPB, Departamento de Estatística, Aula 19, 2014. Disponível em: <http://www.de.ufpb.br/~tarciana/MPIE/Aula19.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

MEIRA, A.L. *et al.* Estimativas de parâmetros genéticos para características de crescimento em feijão-caupi sob estresse hídrico severo. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido - ACSA**, Patos, v. 13, n. 1, p. 41-7, jan./mar. 2017. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/817/pdf>. Acesso em: 25 jun. 2021.

MELO, A.P. **Avaliação da tolerância à seca em feijoeiro inoculado com rizóbio e bactérias diazotróficas endofíticas na presença de ácidos húmicos**. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014. 70 p.

MELO FILHO, M.S.; SILVA, M.M. **Déficit hídrico na cultura da cana de açúcar: uma revisão literária**. Anais XIII Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão – JEPEX, Recife, 9-13 dez. 2013. Disponível em: <http://www.eventosufrpe.com.br/2013/cd/resumos/R1714-1.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

MESSCHMIDT, A.A. **Respostas fisiológicas induzidas por estresse hídrico e infecção por *Meloidogyne javanica* (Treub) Chitwood em portaenxertos de *Prunus* spp.** Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) – da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2013. 68 p.

MORALES, R.G.F. **Resistência ao déficit hídrico em famílias de tomateiros derivados de *Solanun pennellii***. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – da Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012. 94 p.

MOREIRA, L.R. *et al.* Características morfológicas de sorgo sacarino BRS 501 em déficit hídrico. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 18, n. 3, p. 135-45, set./dez. 2016. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/17738/1/artigo.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

MOURA, V.B. **Reflectometria no domínio do tempo, evapotranspiração e fatores de resposta do feijão-caupi submetido a distintas lâminas de irrigação no nordeste paraense**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – da Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém, 2019. 103 p.

MUIANGA, M.R.D. **Relação entre crescimento e respostas ecofisiológicas em cones híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* submetidos às diferentes doses de adubação potássica**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – da Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2013. 70 p.

NASCIMENTO, S.P. *et al.* Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 853–60, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/XmDHyjThcWxXV4MqjNVX6Dh/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 24 jun. 2021.

NEVES, A.C. *et al.* **Cultivo do feijão-caupi em sistema agrícola familiar**. Embrapa Circular Técnica n. 51, Teresina, nov. 2011. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/45769/1/CT51.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2021.

NHANOMBE, E.A.L.P. **Efeitos de restrição hídrica em feijoeiro cultivado em plantio direto e convencional**. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. 68 p.

OLIVEIRA, E. *et al.* Descrição de cultivares locais de feijão-caupi coletados na microrregião Cruzeiro do Sul, Acre, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 45, n. 3, p. 243-54, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/fGJN3QCwCQ5csZ7j86CtDvN/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 jun. 2021.

OLIVEIRA, H.P. *et al.* Respostas fisiológicas de forrageiras ao déficit hídrico e baixas temperaturas. **Revista Eletrônica Nutri Time**, v. 14, n. 5, p. 7008-14, set./out. 2017. Disponível em: <https://www.nutritime.com.br/site/wp-content/uploads/2020/02/Artigo-438.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

PADRÓN, R.A.R. *et al.* Desenvolvimento vegetativo de pimentão cultivado com lâminas e frequências de irrigação. **Revista Tecnologia e Ciência Agropecuária**, João Pessoa, v. 9, n. 2, p. 49-55, abr. 2015. Disponível em: <https://zeoserver.pb.gov.br/edicoes/file/tca9209>. Acesso em: 10 jun. 2021.

PEIXOTO, C.P. (org.). **Curso de fisiologia vegetal: teoria e prática**. Cruz das Almas: Edit. UFRB, 2020.

PENHA FILHO, N. *et al.* Estudo sobre a produtividade do feijão-caupi “verde” consorciado com milho em função da colheita parcelada das vagens. **Agrarian Academy**, Centro

Científico Conhecer, Goiânia, v. 4, n.7, p. 246-254, 2017. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/Agrarian%20Academy/2017a/estudo.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2021.

PEREIRA, C.S. *et al.* Períodos de déficit hídrico após a semeadura de feijão-caupi. **Scientific Electronic Archives**, v. 12, n. 3, p. 7-11, jun. 2019. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/SEA/article/download/pdf>. Acesso em: 24 jun. 2021.

PES, L.Z.; ARENHARDT, M.H. **Fisiologia vegetal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria/Colégio Politécnico/Rede e-Tec Brasil, 2015.

PORTES, T.A. Como surgiu o feijão de terceira safra ou feijão de inverno? Um pouco de história. **Revista Cultivar**, n. 162, nov. 2012. Disponível em: <http://www.grupocultivar.com.br/site/content/artigos/artigos.php?id=1002>. Acesso em: 30 jun. 2021.

REIS, L.C. **Déficit hídrico e ácido abscísico no crescimento, metabolismo fotossintético e antioxidante em mudas de *Calophyllum brasiliense* Cambess.** Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – da Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2018. 71 p.

RODRIGUES, A.L. **Respostas fisiológicas e estruturais em plantas submetidas a estresse hídrico recorrente em diferentes condições de luz.** Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2018. 114 p.

RODRIGUES, J.S. **Uso de tensiometria e balanço hídrico climatológico no manejo de irrigação do feijão-caupi CV. BRS pujante.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrônoma) – do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Petrolina, 2018. 27 p.

RUAS, J.F. **Feijão: mercado nacional.** Análise mensal. Brasília, CONAB, jul./ago./set. 2020. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/item/download>. Acesso em: 30 jun. 2021.

SALVADOR, C.A. **Produção e comércio internacional de feijão: prognóstico feijão.** Governo do estado do Paraná, Departamento de Economia Rural – DERAL, nov. 2020. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2021-01/Feijao_2021.pdf. Acesso em: 1 jul. 2021.

SANCHES, R.F.E. **Relações hídricas e respostas ao deficit hídrico da espécie *Bauhinia forficata* Link: mecanismos de manutenção do status hídrico.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – da Universidade de São Paulo/Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012. 79 p.

SANTOS, D. *et al.* Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento, em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 8, p. 836-42, ago. 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/rdjbTrYbCzTL5FtfjQmrCLG/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 20 jun. 2021.

SANTOS, P.L.S. **Respostas fisiológicas do feijão-caupi submetidos a restrição hídrica e aplicação de óxido de cálcio sobre as folhas.** Dissertação (Mestrado em Ciências/Agricultura e Biodiversidade) – da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016. 44 p.

SILVA, M.L. **Avaliação de genótipos de sorgo forrageiro na Zona da Mata de Alagoas.** Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – da Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2011. 84 p.

SILVA, B.M. **Disponibilidade de água no solo:** métodos de estimativa e implicações de manejo em cafeeiros na região do cerrado. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – da Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014. 135 p.

SILVA, N.P. **Desempenho agrônomo e fisiológico de híbridos de milho cultivados com e sem restrição hídrica.** Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal/Produção Vegetal no Semiárido) – da Universidade Federal de Montes Claros, Janaúba, 2019. 85 p.

SILVA, J.C. *et al.* Desempenho agrônomo do rabanete em função de lâminas de irrigação e níveis de adubação nitrogenada. **Revista Ciência Agrícola**, Rio Largo, v. 18, n. 3, p. 7-11, 2020. Disponível em: <https://seer.ufal.br/index.php/article/download>. Acesso em: 19 jun. 2021.

SILVA, K.J.D.; ROCHA, M.M.; MENEZES JÚNIOR, J.A.N. Socioeconomia. In: BASTOS, E.A. (coord.). **A cultura do feijão-caupi no Brasil.** Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2016. P. 6-12.

SILVA JÚNIOR, J.S. **Desempenho produtivo do feijão-caupi sob diferentes densidades de plantas e regimes hídricos.** Dissertação (Mestrado em Ciências) – da Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2018. 69 p.

SNA. Sociedade Nacional de Agricultura. **Exportações de feijão já começam a ganhar peso.** Rio de Janeiro, SNA, 11 fev. 2021. Disponível em: <https://www.sna.agr.br/exportacoes-de-feijao-ja-comecam-a-ganhar-peso/>. Acesso em: 1 jul. 2021.

SOUZA, A.P.R. **Aspectos fisiológicos da emergência e crescimento inicial das mudas de *Ormosia arborea* (Vell.) Harms em diferentes disponibilidades hídricas.** Dissertação (Mestrado em Biologia Geral/Bioprospecção) – da Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2017. 118 p.

SUGUIYAMA, V.F. **Alterações fisiológicas e bioquímicas nas respostas de tolerância à dessecação em *Barbacenia purpurea* Hook. – *Velloziaceae*.** Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente) – do - Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 2013. 80 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal.** 5. ed. Trad. de Beatriz Blat Egea. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TAIZ, L. *et al.* **Fundamentos de fisiologia vegetal.** 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2021.

VITAL, R.G. **Mecanismos da tolerância ao deficit hídrico e à alta temperatura em cultivares de soja.** Tese (Doutorado em Ciências Agrárias/Agronomia) – do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, 2019. 94 p.

VITORINO, H.S.; MARTINS, D. Efeito do déficit hídrico na eficiência de herbicidas e nas características bioquímicas de *Ipomoea grandifolia*. **Revista Planta Daninha**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 185-91, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/grzYSZXJdJYSFT4bzmvszBn/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 jun. 2021.

YEATES, S. Efeitos do estresse hídrico na fisiologia do algodoeiro. In: ECHER, F.R. (Edit.). **O algodoeiro e os estresses abióticos**: temperatura, luz, água e nutrientes. Cuiabá: IMA, 2014. P. 63-77. Disponível em: [http://sites.unoeste.br/gea/wp-content/uploads/2018/11/2014-O-
algodoeiro-e-os-estresses-abi%C3%B3ticos-Temperatura-luz-%C3%A1gua-e-nutrientes.pdf](http://sites.unoeste.br/gea/wp-content/uploads/2018/11/2014-O-algodoeiro-e-os-estresses-abi%C3%B3ticos-Temperatura-luz-%C3%A1gua-e-nutrientes.pdf). Acesso em: 8 maio 2021.