

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 11/02/2024.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ANDRESSA APARECIDA RODRIGUES DE MELO

**ALTERAÇÕES MORFO-ANATÔMICAS E BIOQUÍMICAS DE
GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI SUBMETIDOS AO DÉFICIT
HÍDRICO**

Ilha Solteira

2022

ANDRESSA APARECIDA RODRIGUES DE MELO

**ALTERAÇÕES MORFO-ANATÔMICAS E BIOQUÍMICAS
DE GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI SUBMETIDOS AO
DÉFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Ilha Solteira, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Sistema de Produção).
Orientador: Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis

Ilha Solteira

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M528a Melo, Andressa Aparecida Rodrigues de.
Alterações morfo-anatômicas e bioquímicas de genótipos de Feijão-caupi submetidos ao déficit hídrico / Andressa Aparecida Rodrigues de Melo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
118 f. : il.

Dissertação (mestrado) -Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas de Produção, 2022

Orientador: André Rodrigues dos Reis
Inclui bibliografia

1. Estresse hídrico. 2. Feijão-caupi. 3. Fixação biológica de nitrogênio. 4. Anatomia de nódulos.

João Josué Barbosa
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Alterações morfo-anatômicas e bioquímicas de genótipos de feijão- caupi submetidos ao déficit hídrico.

AUTORA: ANDRESSA APARECIDA RODRIGUES DE MELO

ORIENTADOR: ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA, área: Sistemas de Produção pela Comissão Examinadora:

André Rodrigues dos Reis

Prof. Dr. ANDRÉ RODRIGUES DOS REIS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia de Biosistemas / FEI UNESP Tupa

André Rodrigues dos Reis

Prof. Dr. MARCELO CARVALHO MINHOTO TEIXEIRA FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

André Rodrigues dos Reis

Prof. Dr. JOÃO PAULO RODRIGUES MARQUES (Participação Virtual)
Departamento de Solos / Escola Superior de Agricultura

Ilha Solteira, 11 de fevereiro de 2022

DEDICO

Aos meus pais, Alfredo e Claudia,
e a toda minha família por todo o amor e apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por TUDO!

Aos meus pais Alfredo e Claudia por todo apoio e amor. Aos meus irmãos Anderson, Aila, Amanda e Junior, por serem meu suporte e por tantos momentos de alegrias juntos.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Rodrigues dos Reis, pela oportunidade e por toda experiência compartilhada, todo suporte e amizade.

Aos meus professores da Pós-graduação pelo suporte e conhecimentos compartilhados, em especial ao professor Enes Furlani e Marcos Eustáquio.

A todos os servidores da UNESP, em especial a Yasmin e Jéssica pela atenção e assistência.

Aos amigos do grupo de estudos em fisiologia agrícola: Maria, Nema, Matheus, Márcio, Lara, Fagner e Maycon por todo auxílio nas atividades.

Aos meus amigos Trio do R: Luan e Lucy, por todos os momentos de risadas e confidencialidade.

Aos meus presentes de Tupã Maycon por toda parceria e amor, Lara por ser minha base e parceira pra tudo, Diva pelo acolhimento e carinho em todos os momentos.

Aos professores Dr. Marcelo Carvalho Minhoto Teixeira Filho e Dr. João Paulo Rodrigues Marques, pela contribuição e auxílio na construção desse trabalho.

Ao laboratório Professor Elliot Watanabe Kitajima, por toda estrutura e suporte na realização do trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	12
	REFERÊNCIAS	14
2	O ESTRESSE HÍDRICO INTERROMPE A NODULAÇÃO E O ACÚMULO DE UREÍDEOS, COMPROMETENDO O CRESCIMENTO E A PRODUÇÃO DAS PLANTAS DE FEIJÃO-CAUPI	16
2.1	INTRODUÇÃO.....	17
2.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
2.3	COLETA DE AMOSTRAS.....	19
2.4	DETERMINAÇÃO DE PIGMENTOS FOTOSSINTÉTICOS.....	20
2.5	LOCALIZAÇÃO DE AMIDO EM TECIDOS VEGETAIS.....	20
2.6	EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS NITROGENADOS E AÇÚCARES	21
2.6.1	Açúcares solúveis totais e sacarose	21
2.6.2	Determinação de ureídeos	22
2.6.3	Aminoácidos	22
2.6.4	Nitrato e amônia	23
2.7	BIOMETRIA DAS PLANTAS E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS	23
2.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA	23
2.9	RESULTADOS	24
2.10	DISCUSSÃO.....	25
2.11	CONCLUSÃO.....	29
	REFERÊNCIAS	31
3	RESPOSTAS MORFO-ANATÔMICAS E BIOQUÍMICAS DE GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI SENSÍVEIS E TOLERANTES AO ESTRESSE POR DÉFICIT HÍDRICO	45
3.1	INTRODUÇÃO.....	46
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	48
3.3	COLETA DE AMOSTRAS.....	49
3.4	ANATOMIA DOS NÓDULOS.....	49
3.5	ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO.....	50
3.6	EXTRAÇÃO DE COMPOSTOS NITROGENADOS	50
3.6.1	Determinação de ureídeos	50
3.6.2	Aminoácidos	50
3.6.3	Nitrato e amônia	50

3.7	DETERMINAÇÃO DE TROCAS GASOSAS E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA	50
3.8	PEROXIDAÇÃO LIPÍDICA E DETERMINAÇÃO DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO	51
3.9	ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO DE PROTEÍNA E ATIVIDADE DE ENZIMAS	51
3.10	ANÁLISE DO PERFIL DE AÇÚCARES.....	52
3.11	ANÁLISE ESTATÍSTICA	53
3.12	RESULTADOS	53
3.12.1	Efeito do estresse hídrico no crescimento do feijão-caupi.....	53
3.12.2	Anatomia do nódulo	54
3.12.3	Metabolismo do N.....	54
3.12.4	Taxas fotossintéticas.....	55
3.12.5	Metabolismo oxidativo e antioxidativo.....	55
3.12.5	Teor de açúcares.....	55
3.12.6	Análise de cluster e heatmap.....	56
3.13	DISCUSSÃO	56
3.14	CONCLUSÃO.....	61
	REFERÊNCIAS	63
4	MECANISMO DE DEFESA DE NÓDULOS DE FEIJÃO-CAUPI SUBMETIDOS A SECA.....	78
4.1	INTRODUÇÃO.....	79
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	81
4.3	COLETA DE AMOSTRAS.....	82
4.4	COMPOSTOS NITROGENADOS	82
4.5	ANÁLISE DO PERFIL DE AÇÚCARES.....	82
4.6	Peroxidação lipídica e determinação de peróxido de hidrogênio	83
4.7	ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO DE PROTEÍNA E ATIVIDADE DE ENZIMAS	83
4.8	ANATOMIA DOS NÓDULOS.....	84
4.9	ANÁLISE ESTATÍSTICA	85
4.10	RESULTADOS	85
4.11	DISCUSSÕES	87
4.12	CONCLUSÃO.....	90
	REFERÊNCIAS	92
5	MUDANÇAS ANATÔMICAS E ULTRAESTRUTURAL DE GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI	102

5.1	INTRODUÇÃO.....	103
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	104
5.3	ANATOMIA DE FOLHAS E RAÍZES	104
5.4	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE TRANSMISSÃO	105
5.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	105
5.6	RESULTADOS	106
5.7	DISCUSSÃO.....	107
5.8	CONCLUSÃO.....	109
	REFERÊNCIAS	110

RESUMO

A seca é um dos maiores estresse abiótico que interfere na produção agrícola do mundo. O feijão-caupi é uma importante fonte de proteína na alimentação humana e animal, sendo cultivados em regiões áridas e semi-áridas no mundo. O objetivo do experimento I: Foi avaliar o efeito de diferentes níveis de capacidade de água no solo (CAD) (20, 40, 60, e 80% da CAD) na fixação biológica do nitrogênio, ajuste osmótico celular e produtividade do feijão-caupi. Os resultados desse estudo sugerem que a redução do número de nódulos e acúmulo de ureídeos foram as principais respostas fisiológicas para a redução do crescimento e produtividade causados pela umidade do solo abaixo de 40%. O objetivo do experimento II: Foi avaliar a resposta morfofisiológica, bioquímica e anatômicas de raízes, folhas e nódulos de genótipos de feijão caupi, sensíveis: BRS Tracuateua (G1) e BRS Tumucumaque (G2), e tolerantes: Pingo de ouro 1-2 (G3) e BRS Marataoã (G4) submetidos ao déficit hídrico (CAD 40%) ou não (CAD 80%). As variáveis que possibilitou o agrupamento entre os genótipos tolerantes foram condutância estomática, fotossíntese e o acúmulo de sacarose, glicose, sorbitol e frutose nas raízes. Anatomicamente, o genótipo G4 apresentou melhor desenvolvimento do nódulo, células do córtex bem desenvolvidas e feixes vasculares mais organizados. Maior quantidade de grãos de amido foram encontrados nas folhas dos genótipos da CAD 40%, sendo maior no genótipo G4 em decorrência do aumento do floema nas raízes. A microscopia eletrônica de transmissão revelou que o genótipo G4 apresentou organização de grana. Nas raízes foi possível observar que os elementos de vasos do genótipo G2 apresentaram maior diâmetro na CAD 40%, comportamento que não ocorreu no genótipo G4.

Palavras-chave: compostos nitrogenados, mecanismo de adaptação, metabolismo antioxidativo, seca, *Vigna unguiculata* L.

ABSTRACT

Drought is one of the biggest abiotic stresses that interfere with agricultural production in the world. Cowpea is an important source of protein in human and animal food, being cultivated in arid and semi-arid regions in the world. The objective of experiment I: It was to evaluate the effect of different levels of soil water retention capacity (SWRC) (20, 40, 60, and 80% of SWRC) on biological nitrogen fixation, cellular osmotic adjustment and productivity of cowpea. The results of this study suggest that the reduction in the number of nodules and accumulation of ureides were the main physiological responses to the reduction in growth and productivity caused by soil moisture below 40%. The objective of experiment II: It was to evaluate the morphophysiological, biochemical and anatomical response of roots, leaves and nodules of cowpea genotypes, sensitive: BRS Tracuateua (G1) and BRS Tumucumaque (G2), and tolerant: Pingo de ouro 1-2 (G3) and BRS Marataoã (G4) submitted to water deficit (SWRC 40%) or not (SWRC 80%). The variables that allowed the grouping between the tolerant genotypes were stomatal conductance, photosynthesis and the accumulation of sucrose, glucose, sorbitol and fructose in the roots. Anatomically, the G4 genotype showed better nodule development, well-developed cortex cells and more organized vascular bundles. Greater amount of starch grains were found in the leaves of the 40% CAD genotypes, being higher in the G4 genotype due to the increase in phloem in the roots. Transmission electron microscopy revealed that the G4 genotype showed granum organization. In the roots, it was possible to observe that the vessel elements of the G2 genotype presented greater diameter in the 40% CAD, a behavior that did not occur in the G4 genotype.

Keywords: nitrogen compounds, adaptation mechanism, antioxidant metabolism, drought.

1 INTRODUÇÃO GERAL

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) é bastante utilizado na alimentação humana e animal, devido ao seu alto teor de proteína. Os grãos apresentam compostos bioativos (AWIKA; DUODU, 2017), e as folhas apresentam alto teor de micronutrientes e antioxidantes (Owade *et al.*, 2020), podendo ser utilizadas na alimentação animal. O cultivo do feijão caupi é realizado principalmente em regiões áridas e semi-áridas do mundo, onde a seca é bastante comum (Namatsheve *et al.*, 2020). Apesar do feijão-caupi apresentar alta plasticidade, diferentes genótipos apresentam comportamento distintos quando submetidos a diferentes estresses abióticos (CARVALHO *et al.*, 2019).

A seca é um dos principais estresses abióticos que afeta a produtividade das culturas, pois interrompe vários mecanismos essenciais fisiológicos, morfológicos e anatômicos das plantas (CHANDRA *et al.*, 2021). A previsão é que a incidência e severidade do déficit hídrico aumentarão nos próximos anos em decorrência das alterações climáticas (NADEEM *et al.*, 2019).

O estresse hídrico diminui a fotossíntese, o status hídrico, condutância estomática, e transpiração (TANKARI *et al.*, 2020), podendo impactar na síntese e transporte de açúcares. Para se desenvolver e reproduzir as plantas necessitam de distribuição de fotoassimilados ocorram em órgão de maior demanda (LEMOINE *et al.*, 2013; Nešović *et al.*, 2021). As folhas e raízes jovens são os principais drenos durante os estágios iniciais de desenvolvimento (FELLER; FISCHER, 1994), enquanto sementes e frutos tornam-se os principais drenos durante o estágio reprodutivo (TEGEDER; MASCLAUX-DAUBRESSE, 2018).

Os níveis de açúcar também influenciam no crescimento e desenvolvimento de nódulos (GIBSON, 2005). A alocação do açúcar no nódulo pode funcionar como um sinal metabólico sistêmico que impulsiona a função e o desenvolvimento do nódulo (LAMBERT *et al.*, 2020). A redução da produção da sacarose durante o estresse hídrico pode reduzir o desenvolvimento de nódulos e conseqüentemente a fixação biológica de nitrogênio (KRYVORUCHKO *et al.*, 2016). Além disso, a sacarose alivia os efeitos negativos do nitrato nas taxas de crescimento dos nódulos de soja (LAMBERT *et al.*, 2020).

Para enfrentar situações de estresse, as plantas desenvolveram uma série de mecanismos que compreendem em alterações morfológicas, bioquímicas e anatômicas. Nas folhas pode ocorrer redução da superfície transpirante, fechamento estomático, aumento de tricomas, senescência de folhas velhas (KOLAHİ *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2009). Já nas raízes pode ocorrer

aumento do volume radicular, maior quantidade de aerênquima no córtex, aumento da espessura de exoderme, metaxilemas numerosos e com menor diâmetro (JALEEL *et al.*, 2009; MAKBUL *et al.*, 2011). As modificações anatômicas dos nódulos durante a seca são pouco conhecida, porém a tolerância foi associada com a capacidade de sustentar suprimento de fotoassimilados (KUNERT *et al.*, 2016). No entanto, em situação de estresse, o aumento do etileno reduz o número de nódulos (LOHAR *et al.*, 2009). Esse mecanismo ocorre para reduzir a utilização de fotoassimilados nos nódulos e priorizar outras estruturas comprometidas das plantas (FERGUSON *et al.*, 2010).

O processo de fixação biológica de nitrogênio se inicia pela infecção da bactéria em pelos radiculares, essa infecção é acompanhada por várias modificações, como o enrolamento do pelo radicular e divisões de células corticais, dando início a organogênese do nódulo (POPP; OTT, 2011). Nas células infectadas, os bacterióides são responsáveis pela realização da fixação biológica de nitrogênio. A enzima nitrogenase reduz o nitrogênio atmosférico a amônio (DEN HERDER; PARNISKE, 2009) que é posteriormente reduzido a glutamina. Em seguida é transformado em ácido úrico (SMITH; ATKINS, 2002) e sintetizado em alantoína e o ácido alantóico (TODD *et al.*, 2006).

A seca pode levar a peroxidação lipídica, sendo o malondialdeído um importante sinalizador de estresse oxidativo (FOYER, 2018; SWANSON; GILROY, 2010). Para eliminação das espécies reativas ao oxigênio (EROS), as plantas desenvolveram um importante mecanismo de resistência, que compreende na ativação de enzimas antioxidativas, como: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbato peroxidase (APX) e glutathione redutase (GR) (WASZCZAK *et al.*, 2018).

REFERÊNCIAS

- CARVALHO, M. *et al.* Evaluating stress responses in cowpea under drought stress. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 241, p. 153001, 2019.
- CHEN, M. *et al.* Leaf Cuticular Transpiration Barrier Organization in Tea Tree Under Normal Growth Conditions. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 12, p. 1316, 2021.
- CREEK, D. *et al.* Coordination between leaf, stem, and root hydraulics and gas exchange in three arid-zone angiosperms during severe drought and recovery. **Plant, Cell & Environment**, [s. l.], v. 41, n. 12, p. 2869–2881, 2018.
- DONG, S.; BECKLES, D. M. Dynamic changes in the starch-sugar interconversion within plant source and sink tissues promote a better abiotic stress response. **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 234–235, p. 80–93, 2019.
- DU, Q. *et al.* Effects of potassium deficiency on photosynthesis, chloroplast ultrastructure, ROS, and antioxidant activities in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Integrative Agriculture**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 395–406, 2019.
- EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Embrapa Solos**, [s. l.], p. 353, 2013.
- FLEXAS, J. *et al.* Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. **New Phytologist**, [s. l.], v. 172, n. 1, p. 73–82, 2006.
- FOYER, C. H. Reactive oxygen species, oxidative signaling and the regulation of photosynthesis. **Environmental and Experimental Botany**, [s. l.], v. 154, p. 134–142, 2018.
- FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Stress-triggered redox signalling: what's in pROSpect? **Plant, Cell & Environment**, [s. l.], v. 39, n. 5, p. 951–964, 2016.
- GONÇALVES, C. G. *et al.* Morphological modifications in soybean in response to soil water management. **Plant Growth Regulation**, [s. l.], v. 83, n. 1, p. 105–117, 2017.
- HASANUZZAMAN, M. *et al.* Residual transpiration as a component of salinity stress tolerance mechanism: a case study for barley. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 107, 2017.
- HU, M. *et al.* Wheat acclimate to water deficit by modifying carbohydrates metabolism, water use efficiency, and growth. **Brazilian Journal of Botany**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 505–515, 2015.
- JOGAWAT, A. *et al.* Crosstalk between phytohormones and secondary metabolites in the drought stress tolerance of crop plants: A review. **Physiologia Plantarum**, [s. l.], v. 172, n. 2, p. 1106–1132, 2021.
- KARNOVSKY, M. J. A formaldehyde-glutaraldehyde fixative of high osmolality for use in electron microscopy. **J. Cell Biol.**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 1A-149A, 1965.

KIRCHHOFF, H. Architectural switches in plant thylakoid membranes. **Photosynthesis Research**, [s. l.], v. 116, n. 2–3, p. 481–487, 2013.

KOOCHAK, H. *et al.* The structural and functional domains of plant thylakoid membranes. **The Plant Journal**, [s. l.], v. 97, n. 3, p. 412–429, 2019.

LECOEUR, J. *et al.* Expansion of pea leaves subjected to short water deficit: cell number and cell size are sensitive to stress at different periods of leaf development. **Journal of Experimental Botany**, [s. l.], v. 46, n. 9, p. 1093–1101, 1995.

MARQUES, J. P. R. *et al.* Ultrastructural changes in the epidermis of petals of the sweet orange infected by *Colletotrichum acutatum*. **Protoplasma**, [s. l.], v. 253, n. 5, p. 1233–1242, 2016.

MARTÍNEZ, J. P. *et al.* Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **European Journal of Agronomy**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 30–38, 2007.

MUNJONJI, L. *et al.* Stomatal Behavior of Cowpea Genotypes Grown Under Varying Moisture Levels. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 12, 2017.

NARDINI, A. *et al.* Leafminers help us understanding leaf hydraulic design. **Plant, Cell & Environment**, [s. l.], v. 33, n. 7, p. 1091–1100, 2010.

NAWAZISH, S. *et al.* Leaf anatomical adaptations of *Cenchrus ciliaris* L. from the salt range, Pakistan against drought stress. **American Journal of Enology and Viticulture**, [s. l.], v. 48, n. 33, p. 352–356, 1997, 2006.

PATAKAS, A.; NOITSAKIS, B. Cell wall elasticity as a mechanism to maintain favorable water relations during leaf ontogeny in grapevines. **American Journal of Enology and Viticulture**, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 352–356, 1997.

PRATHAP, V.; TYAGI, A. Correlation between expression and activity of ADP glucose pyrophosphorylase and starch synthase and their role in starch accumulation during grain filling under drought stress in rice. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 157, p. 239–243, 2020.

RAIJ, B. V. *et al.* Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Campinas: Instituto Agrônomo**, [s. l.], n. 19, p. 285, 2001.

SAM, O. *et al.* Changes in Tomato Leaves Induced by NaCl Stress: Leaf Organization and Cell Ultrastructure. **Biologia plantarum**, [s. l.], v. 46, n. 3, p. 361–366, 2003.

SEHGAL, A. *et al.* Effects of Drought, Heat and Their Interaction on the Growth, Yield and Photosynthetic Function of Lentil (*Lens culinaris* Medikus) Genotypes Varying in Heat and Drought Sensitivity. **Frontiers in Plant Science**, [s. l.], v. 8, p. 1776, 2017.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, [s. l.], v. 52, n. 3/4, p. 591, 1965.

SILVA, B. R. S. *et al.* Anatomical changes in stem and root of soybean plants submitted to salt stress. **Plant Biology**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 57–65, 2021.

SINGH, A. *et al.* Genotypic Variation in Root Anatomy, Starch Accumulation, and Protein Induction in Upland Rice (*Oryza sativa*) Varieties Under Water Stress. **Agricultural Research**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 24–30, 2013.

SMERTENKO, T. *et al.* Brachypodium distachyon MAP20 functions in metaxylem pit development and contributes to drought recovery. **New Phytologist**, [s. l.], v. 227, n. 6, p. 1681–1695, 2020.

SORIN, C. *et al.* Assessment of nutrient remobilization through structural changes of palisade and spongy parenchyma in oilseed rape leaves during senescence. **Planta**, [s. l.], v. 241, n. 2, p. 333–346, 2015.

STROCK, C. F. *et al.* Root metaxylem and architecture phenotypes integrate to regulate water use under drought stress. **Plant, Cell & Environment**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 49–67, 2021.

VITOVA, M. *et al.* Accumulation of energy reserves in algae: From cell cycles to biotechnological applications. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 33, n. 6, p. 1204–1218, 2015.

WILHELM, C.; GOSS, R.; GARAB, G. The fluid-mosaic membrane theory in the context of photosynthetic membranes: Is the thylakoid membrane more like a mixed crystal or like a fluid? **Journal of Plant Physiology**, [s. l.], v. 252, p. 153246, 2020.

YADAV, V. *et al.* Structural modifications of plant organs and tissues by metals and metalloids in the environment: A review. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s. l.], v. 159, p. 100–112, 2021.

ZHANG, F. J. *et al.* Effect of Drought Stress on Anatomical Structure and Chloroplast Ultrastructure in Leaves of Sugarcane. **Sugar Tech**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 41–48, 2015.

ZHENG, Y. *et al.* Elevated CO₂ concentration induces photosynthetic down-regulation with changes in leaf structure, non-structural carbohydrates and nitrogen content of soybean. **BMC Plant Biology**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 255, 2019.