

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**RELAÇÃO DA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO COM O
TEOR E ACÚMULO DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E
POTÁSSIO EM CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Thais Ramos da Silva

Bióloga

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**RELAÇÃO DA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO COM O
TEOR E ACÚMULO DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E
POTÁSSIO EM CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Thais Ramos da Silva

Orientador: Prof. Dr. Jairo Osvaldo Cazetta

Coorientadora: Dra. Samira Domingues Carlin

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2015

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

THAIS RAMOS DA SILVA – Nasceu em Goiatuba – GO, em 14 de março de 1982. Graduiu-se em Ciências Biológicas pela ULBRA – Instituto Luterano de Ensino Superior de Itumbiara, em 2006. Em 2007 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal na FESURV – Universidade de Rio Verde – obtendo o título de mestre em 2009. Em agosto de 2011 ingressou no curso de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

À minha mãe, Maria Terezinha Ramos da Silva
Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao meu orientador Dr. Jairo Osvaldo Cazetta, pela paciência, apoio e por todos bons conselhos.

À minha coorientadora Dra. Samira Domingues Carlin pela generosidade, orientações e pela amizade.

À Bióloga Bruna Robiati Telles pela cooperação no experimento e nas análises laboratoriais.

À UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias pela oportunidade de cursar o doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) e pelas instalações do experimento e das análises laboratoriais.

Aos funcionários da Fazenda Experimental da UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias pela colaboração no experimento.

À Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – APTA, da cidade de Jaú- SP, pelos toletes de mudas de cana-de-açúcar cedidos para o experimento.

Aos meus professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pelos conhecimentos que tiveram a generosidade de compartilhar: Renato de Mello Prado, Manoel Evaristo Ferreira, Miguel Ângelo Mutton, Durvalina Maria Mathias dos Santos e Edson Luiz Mendes Coutinho.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	IX
SUMMARY.....	XI
I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. A cultura da cana-de-açúcar no Brasil.....	3
2.2. Cultivares de cana-de-açúcar.....	4
2.2.1. Cultivar SP81-3250	5
2.2.2. Cultivar RB855453.	6
2.2.3. Cultivar IACSP95-5000.	6
2.3. Potencial hídrico do solo.	7
2.4. O estresse por deficiência hídrica	8
2.4.1. Crescimento..	9
2.4.2. Potencial hídrico foliar	10
2.4.3. Teor de clorofila.....	11
2.4.4. Trocas gasosas	11
2.4.5. Fotossíntese.....	13
2.4.6. Nutricionais.....	14
III. MATERIAL E MÉTODOS... ..	17
3.1. Preparo e análises químicas e físicas do solo.....	17
3.2. Instalação e condução do experimento.	18
3.3. Tratamentos e delineamento experimental	19
3.4. Avaliações	20
3.4.1. Avaliações biométricas.....	20
3.4.2. Medições de trocas gasosas	20
3.4.3. Teor de clorofila.....	21
3.4.4. Potencial hídrico foliar	21
3.4.1. Fitomassa e avaliações nutricionais	22
3.5. Análises estatísticas	22
IV. RESULTADOS	23

4.1. Avaliações de crescimento, potencial hídrico foliar, teor de clorofila e trocas gasosas	23
4.1. Fitomassa e avaliações nutricionais	47
V. DISCUSSÃO	54
VI. CONCLUSÕES.....	61
VII. REFERÊNCIAS	62

RELAÇÃO DA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO COM O TEOR E ACÚMULO DE NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO EM CULTIVARES DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – Nas regiões em expansão da cana-de-açúcar no Brasil deverá ocorrer nos próximos anos um aumento na ocorrência de eventos extremos, como anos mais secos. Torna-se, então importante a utilização de cultivares tolerantes à deficiência hídrica nessas novas áreas. Assim, o presente estudo teve por objetivo definir o grau de tolerância ao déficit hídrico de três cultivares de cana-de-açúcar por meio de variáveis fisiológicas e verificar a relação da tolerância destas cultivares com o teor e acúmulo de N, P e K. O experimento foi conduzido em vasos de 50 dm³ contendo um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura média. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com 9 tratamentos (3 cultivares x 3 potenciais hídricos do solo), com quatro repetições. Com 60 dias de idade as cultivares SP81-3250, RB855453 e IACSP95-5000 foram submetidas aos três potenciais hídricos do solo: Ψ_{SR} (-0,010 a -0,015 MPa), Ψ_M (-0,050 a -0,055 MPa) e Ψ_S (-0,075 a -0,080 MPa) e avaliadas em três épocas: 30, 60 e 90 dias após a imposição dos tratamentos. As variáveis avaliadas foram: número de folhas verdes, área foliar, altura da planta, número de perfilhos, potencial hídrico foliar, índice SPAD, fotossíntese, transpiração, condutância estomática, concentração interna de CO₂, eficiência instantânea de carboxilação, eficiência instantânea de uso da água, eficiência intrínseca de uso da água, fitomassa, N nas folhas, N nos colmos, acúmulo de N, P nas folhas, P nos colmos, acúmulo de P, K nas folhas, K nos colmos, acúmulo de K e eficiência de utilização de N, P e K. Verificaram-se menores valores nas plantas das cultivares sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} nas variáveis: número de folhas verdes, área foliar, altura da planta, número de perfilhos, índice SPAD, fotossíntese, transpiração, condutância estomática, eficiência instantânea de carboxilação, eficiência intrínseca de uso da água, eficiência instantânea de uso da água, fitomassa, N, P e K nas folhas, N e K nos colmos, acúmulo de N, P e K e eficiência de utilização de N, P e K. A concentração interna de CO₂ e K nas folhas e colmos tiveram maiores valores sob Ψ_S . Aos 60 DAT a cultivar SP foi considerada tolerante ao Ψ_S , pois apresentou maior crescimento e manteve os valores de fotossíntese, transpiração e condutância estomática os

mesmos em relação às plantas sob Ψ_{SR} . A cultivar RB foi considerada suscetível, pois apresentou menor crescimento e não manteve fotossíntese, transpiração e condutância estomática. A cultivar IAC ora apresentou comportamento semelhante a SP e ora não se diferenciou da cultivar RB, por isso não foi possível determinar seu grau de tolerância ao déficit hídrico severo. As variáveis analisadas indicam que as plantas da cultivar SP são tolerantes em até 60 dias de exposição ao déficit hídrico severo. As plantas da cultivar RB apresentam um comportamento suscetível e as da IAC não apresentam comportamento bem definido. Não há diferença entre as plantas das cultivares no acúmulo de N, P nas folhas, eficiência de utilização de nitrogênio, eficiência de utilização de fósforo e eficiência de utilização de potássio, sob déficit hídrico severo. Sob déficit hídrico severo as plantas da cultivar tolerante apresentam maiores teores de N e K nas folhas e colmos e maior acúmulo de P e K sob déficit hídrico severo. As plantas da cultivar suscetível apresentam maior acúmulo de P e K.

Palavras-chave: nutrientes minerais, potenciais hídricos do solo, *Saccharum officinarum* L.

THE TOLERANCE OF WATER DEFICIT RELATIONSHIP WITH THE CONTENT AND ACCUMULATION OF NITROGEN, PHOSPHORUS AND POTASSIUM IN VARIETY OF SUGARCANE

SUMMARY – In regions where expansion of sugarcane in Brazil will occur in the coming years an increase in the occurrence of extreme events such as the driest years. It then becomes important to the use of varieties tolerant to water stress in these new areas. The present study aimed to define the degree of tolerance to drought of three varieties of sugarcane by means of physiological variables and the relation of tolerance of these varieties with the content and accumulation of N, P and K. The experiment was conducted in pots containing a 50 dm³ Typic Haplustox. The experimental design was randomized blocks, with nine treatments (3 varieties x 3 water potential of the soil) with four replications. With 60 days of age the SP81-3250 varieties, RB855453 and IACSP95-5000 were submitted to the three soil water potential: $\Psi_{\text{no restriction}}$ (-0.010 to -0.015 MPa), Ψ_{moderate} (-0.050 to -0.055 MPa) and Ψ_{severe} (-0.075 to -0.080 MPa) and evaluated at three times: 30, 60 and 90 days after treatment imposition. The variables analyzed were: number of green leaves, leaf area, plant height, number of tillers, leaf water potential, SPAD index, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, internal CO₂ concentration, instantaneous carboxylation efficiency, instant use efficiency water, intrinsic water use efficiency, phytomass, N in the leaves, N in the stalks, N accumulation, P in the leaves, P in the stalks, P accumulation, K in the leaves, K in the stalks, K accumulation and N, P and K utilization efficiency. There were lower values in plants of the varieties Ψ_{severe} compared to plants under $\Psi_{\text{no restriction}}$ the variables: number of green leaves, leaf area, plant height, number of tillers, SPAD index, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance, instant efficiency carboxylation, intrinsic efficiency of water use, instantaneous water use efficiency, phytomass, N, P and K in the leaves, N and K in the stalks, N, P and K accumulation and efficiency of use of N, P and K. The internal CO₂ concentration and K in the leaves and in the stalks had higher values under Ψ_{severe} . At 60 DAT to variety SP was considered tolerant under Ψ_{severe} because the highest growth and kept the values of photosynthesis, transpiration and stomatal conductance in relation to the same plants under $\Psi_{\text{no restriction}}$. The variety RB was considered susceptible, therefore showed lower growth and did not maintain

photosynthesis, transpiration and stomatal conductance. IAC now presented similar behavior SP and now did not differentiate variety RB, so it was not possible to determine their degree of tolerance to severe water stress. The variables analyzed indicate that the variety SP are tolerant within 60 days of exposure to severe water stress. The plants variety RB have susceptible behavior and the IAC do not have well-defined behavior. There is no difference between plants of the varieties in the N accumulation, P in the leaves, nitrogen utilization efficiency, phosphorus utilization efficiency and potassium utilization efficiency under severe water stress. Under severe water stress the plants variety tolerant have higher content of N and K in the leaves and stalks and greater P and K accumulation under severe water stress. The plants variety susceptible have a higher P and K accumulation.

Keywords: mineral nutrients, soil water potential, *Saccharum officinarum* L.

I. INTRODUÇÃO

A variabilidade e as mudanças climáticas causadas por processos naturais e antropogênicos devem afetar o processo produtivo e o modo de vida da humanidade, no século 21. As estimativas recentes de aumento de temperatura do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (International Panel on Climate Change – IPCC) no Quarto Relatório de Avaliação (AR4) estão entre 1,8 e 3,6 °C e a concentração de CO₂ estimada em 720 ppm no período entre 2009 a 2099 (MARIN; NASSIF, 2013). Países dependentes dos recursos naturais e exportadores de commodities, como ainda é o caso do Brasil, podem sofrer os impactos de eventos extremos, de modo mais pronunciado do ponto de vista econômico e social.

Apesar de recentes, as pesquisas enfocando este aspecto já trouxeram resultados que permitem inferir sobre os efeitos das projeções climáticas na cultura da cana-de-açúcar considerando-se as tendências futuras para o setor. Ao se considerar a tendência de expansão da cultura observada ao longo da última década e a conjuntura atual do setor, pode-se traçar um cenário qualitativo de médio prazo levando em conta as mudanças climáticas globais e as respostas fisiológicas da cultura aos elementos climáticos mais prováveis de serem alterados neste período.

Estes eventos extremos, como anos mais secos, deverão ocorrer em regiões onde estão as áreas de expansão da cana-de-açúcar (BOMBARDI; CARVALHO, 2008). Este cenário de maior fragilidade climática é especialmente importante para culturas com ciclos mais longos, mais expostas aos riscos climáticos, como é o caso da cana-de-açúcar (MARIN; NASSIF, 2013).

Estes períodos de deficiência hídrica coincidem na cana-de-açúcar com as fases de perfilhamento e de grande crescimento que têm sido identificadas como um período crítico por demanda de água e de nutrientes (RAMESH, 2000; ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2010). Assim, é neste período onde os danos causados pela deficiência hídrica são mais prejudiciais à produção (PINCELLI, 2010).

A utilização de cultivares tolerantes à deficiência hídrica nessas novas áreas torna-se a maneira mais econômica de contornar os problemas causados pela seca. Para algumas cultivares como a SP81-3250 e a RB855453 há indicações do comportamento destas sob déficit hídrico (PINCELLI, 2010), porém para outras

cultivares cultivadas nestas regiões como a IACSP95-5000 ainda não há na literatura informações sobre o comportamento desta sob déficit hídrico.

Portanto, seria muito importante conhecer as variáveis de crescimento, fisiológicas e nutricionais relacionadas com a tolerância à seca, pois estas poderiam ser usadas como mecanismos de melhoramento e desenvolvimento de cultivares de cana-de-açúcar.

Algumas variáveis morfológicas já estudadas e consideradas eficientes para diferenciar cultivares tolerantes ao déficit hídrico são número de folhas verdes, área foliar, altura da planta e número de perfilhos (PINCELLI, 2010; HOLANDA, 2012).

Quanto às variáveis fisiológicas pode-se usar como distinção de cultivares tolerantes o teor de clorofila, a fotossíntese, a transpiração, a condutância estomática, a concentração interna de CO₂, a eficiência instantânea de carboxilação, a eficiência instantânea de uso de água e a eficiência intrínseca de uso da água (SILVA et al., 2013; PINCELLI, 2010).

Em relação aos efeitos nutricionais nas plantas sob déficit hídrico na cana-de-açúcar, estes ainda são desconhecidos. Porém, sabe-se que em trigo o déficit hídrico reduziu a absorção de N, mas sugere que os mecanismos de transporte e redistribuição desse nutriente nas plantas tolerantes são menos prejudicados que nas susceptíveis (MIN et al., 2012). No caso da soja, Mauad, Crusciol e Grassi Filho (2011) observaram maiores teores de N, P e K na parte aérea da cultivar tolerante em relação à cultivar susceptível. Ashraf, Shahbaz e Ali (2013), também notaram que cultivares de canola tolerantes ao déficit hídrico tiveram elevada capacidade de acumular K e N na parte aérea das plantas.

Considerando a necessidade de informações sobre a resposta da cana-de-açúcar em condições de déficit hídrico o objetivo do presente estudo foi definir o grau de tolerância ao déficit hídrico de três cultivares de cana-de-açúcar por meio de variáveis fisiológicas e verificar a relação da tolerância destas cultivares com o teor e acúmulo de N, P e K.

II. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A cultura de cana-de-açúcar no Brasil

No Brasil, a cana-de-açúcar chegou logo após o descobrimento do País, para quebrar o monopólio francês no suprimento mundial de açúcar, oriundo das colônias caribenhas (CANABRAVA, 2005). A cultura ganhou importância econômica mais expressiva a partir da segunda metade do século XVI, quando os engenhos do nordeste brasileiro passaram a operar em Pernambuco, Bahia, Alagoas, Sergipe e Paraíba. No século XVII a produção de cana-de-açúcar expandiu-se para o Pará e Amazonas (onde os engenhos foram orientados para a produção de cachaça) chegando, em seguida, ao Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte. Neste período a cultura atendia perfeitamente à estratégia de Portugal, associando a ocupação intensa da colônia e a produção de um item altamente lucrativo para a metrópole na Europa (CANABRAVA, 2005).

No século XIX a expansão dos polos produtores de açúcar pelo mundo reduziu a importância do Brasil no mercado mundial comprometendo, assim, a viabilidade econômica da atividade interna. Neste período, São Paulo e Rio de Janeiro se firmaram como polos fornecedores para as regiões Sul e Sudeste. Em 1933 foi criado o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) com a finalidade de regular a produção interna e desenvolver pesquisas sobre a cultura. Em 1973 o Brasil iniciou, com a primeira crise do petróleo, o Programa Nacional do Alcool – ProAlcool, com o objetivo de inserir o etanol na matriz energética brasileira. Em 1979 iniciou-se a produção de veículos movidos a etanol no Brasil. O baixo preço do produto atraiu a classe média e, em 1985, 96% dos veículos fabricados no País eram movidos a etanol. Porém na segunda metade da década de 80 houve escassez de crédito para os produtores de cana-de-açúcar, diminuição nos preços pagos ao produtor de álcool e preços atrativos do açúcar no mercado internacional, culminando na escassez de etanol no mercado interno e no comprometimento da credibilidade do setor perante o consumidor final (KOHLHEPP, 2010).

Desde o início da década passada o Brasil tem-se destacado na agricultura de energia. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011) a área de cana-de-açúcar no Brasil cresceu 19% em Goiás, 32% em Mato Grosso do Sul, 42% no Tocantins e 26% no Paraná, entre 2006 e 2009. Em São Paulo, que responde atualmente por 52,7% da área plantada e 58,2% da produção nacional de cana-de-açúcar, houve avanço de 11% no mesmo período (CONAB, 2011).

No caso do açúcar, o Brasil ocupa mais de 40% do mercado internacional. A demanda externa tem impulsionado sua expansão devido ao crescimento da população mundial e ao aumento do consumo em países em desenvolvimento, particularmente na Ásia, face ao crescimento de renda per capita e ao processo de êxodo rural nesses países. Mais recentemente, a quebra de safra em países produtores representou incentivo adicional para o produto no mercado externo, afetando o mercado interno de etanol (MARIN; NASSIF, 2013).

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor mundial de etanol, pouco abaixo dos Estados Unidos, que utilizam o milho para sua produção. As condições pedoclimáticas e a larga experiência acumulada na produção de álcool combustível colocam o Brasil em posição privilegiada em relação aos demais países produtores (MARIN; NASSIF, 2013).

Na safra 2014/2015, espera-se produzir no Brasil 659,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e desta produção em torno de 47% será destinado para a produção de açúcar, enquanto o restante (53%) será para a produção de etanol (CONAB, 2014).

2.2. Cultivares de cana-de-açúcar

A partir da criação do ProÁlcool um novo ciclo de pesquisa se iniciou dando suporte a expansão da cultura no país. Em poucos anos, a área plantada com a cana-de-açúcar triplicou, invadindo áreas consideradas menos aptas principalmente nas regiões de cerrados. Para enfrentar os novos desafios advindos dessa expansão iniciaram-se os programas de melhoramento genético visando à obtenção

de novas cultivares, que surgiram no Brasil no começo do século passado (SANDOVAL; GENÔ, 2010).

Como as cultivares de cana-de-açúcar podem ser cultivadas em distintos ambientes as agências em melhoramento desenvolveram diversas cultivares a fim de atender os produtores de acordo com suas expectativas e necessidades de plantio e produtividade. Assim, cada cultivar possui características próprias, como é caso das cultivares SP81-3250, RB855453 e IACSP95-5000.

2.2.1. Cultivar SP81-3250

A cultivar SP81-3250 apresenta bom perfilhamento, levemente decumbente com pouco acamamento, despalha média, crescimento vigoroso, alto perfilhamento; colmos de diâmetro médios, de cor verde arroxeada ao sol e verde amarelada sob a palha, apresenta ziguezague suave, pouca cera e ausência de rachaduras, gemas de tamanho médio com pouca saliência do tipo oval, apresentando pelos no ápice, folhas de largura média; o palmito é de cor verde amarelada com pouca cera e comprimento médio (SIMÕES NETO, 2008-2009).

Segundo Marin (2015) a cultivar SP81-3250 possui maturação precoce a média, boa produtividade agrícola em cana-planta, longo período útil de industrialização (PVI), alto teor de fibra, florescimento médio, pouca exigência em fertilidade do solo, elevada capacidade de adaptar-se a diferentes solos e climas (MARIN, 2015).

Estudos realizados com a SP81-3250 indicaram que a cultivar possui maturação mais lenta (TASSO JÚNIOR et al., 2011) e quando comparada a outras cultivares se destaca no grupo das que atingem maiores alturas, maior teor de BRIX (sólidos solúveis totais), maior número de cana por hectare e maior produtividade (CAPONE et al., 2011). Pincelli (2010) estudando cultivares de cana-de-açúcar sob déficit hídrico observou que a SP81-3250 apresentou os maiores valores nas variáveis morfofisiológicas estudadas.

2.2.2. Cultivar RB855453

Segundo a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético – RIDESA, a cultivar RB855453 apresenta rápido desenvolvimento; colmos arroxeados ao sol, entrenós curtos, com muita cera; despalha média; gemas pouco salientes; folhas verdes escuras, de largura e comprimento médios, pontas curvas, bainha esverdeada e pouco joçal (RIDESA, 2010).

Quanto às características agroindustriais a RB855453 possui alta produtividade agrícola, perfilhamento médio, bom fechamento entre linhas, crescimento regular, porte médio, raro tombamento, florescimento frequente, chochamento médio, maturação precoce, despalha normal e pouco resistente a ambientes restritivos (HOFFMANN et al., 2008).

Avaliando variáveis de crescimento, densidade estomática, eficiência fotoquímica do fotossistema II, clorofila e matéria seca da parte aérea e das raízes, Pincelli (2010) observou que a cultivar RB855453 obteve os menores valores nestas variáveis em relação às outras cultivares estudadas.

2.2.3. Cultivar IACSP95-5000

As características agroindustriais da cultivar IACSP95-5000 são de alta produtividade e elevadíssimos teores de sacarose, adaptada a colheita mecânica, sendo adaptada a todas as regiões de cultivo da região Centro-Sul do Brasil, mas indicada para ambientes favoráveis (A1-C2), porte ereto, ótima brotação de soqueira, apresentando bom perfilhamento e fechamento de entrelinhas, não apresentando tombamento e florescimento, e ainda apresentando resistência as principais doenças (LANDELL et al., 2007)

2.3. Potencial hídrico do solo

A água nos sistema solo-planta-atmosfera busca constantemente o equilíbrio termodinâmico obedecendo a tendência universal de se mover de locais onde apresenta maior energia para aqueles onde o nível energético é mais baixo (LACERDA, 2007). O Ψ_w é uma expressão quantitativa da energia livre associada com a água. Essa energia livre da água pode ser influenciada por quatro principais fatores: concentração de solutos, pressão, forças de superfície e gravidade, as quais definem os componentes do potencial hídrico (Ψ_w): $\Psi_w = \Psi_s + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_g$ (SILVA, 2011).

Os termos Ψ_s , Ψ_p , Ψ_m e Ψ_g denotam os efeitos de solutos, pressão, forças de superfície e gravidade, respectivamente, sobre a energia livre da água. A contribuição de cada uma dessas forças dependerá da parte do sistema analisado. O estado de referência ou potencial hídrico padrão foi estabelecido como zero. Assim, os fatores acima podem aumentar ou diminuir o potencial hídrico, ou seja, a energia livre capaz de realizar trabalho. Em geral, o Ψ é negativo, indicando que as forças que reduzem a energia livre da água prevalecem sobre as que aumentam. Isso parece ser fundamental no sistema solo-planta-atmosfera (SILVA, 2011).

Enquanto a solução dentro da célula pode ter um valor positivo de pressão, fora dela pode ter valor negativo. Por exemplo, no xilema de plantas transpirando, desenvolve-se uma pressão negativa que pode atingir valores de -1,0 MPa ou menor. A magnitude dessa pressão negativa nas paredes celulares e no xilema varia consideravelmente, dependendo da taxa de transpiração e da altura da planta (LACERDA, 2007).

É importante destacar que o potencial hídrico representa a força total que determina a direção do movimento da água. Isto quer dizer que a direção do movimento de água é determinado somente pela diferença de Ψ_w entre dois pontos, e não pela diferença de um dos seus componentes isolados (LACERDA, 2007).

Na prática, o potencial hídrico dos solos (Ψ_w) normais é igual ao potencial mátrico. Em geral, para a determinação do potencial hídrico do solo, mede-se o potencial mátrico (Ψ_m) do solo e considera-se igual ao Ψ_w , desprezando-se a contribuição do componente osmótico (em geral, a solução do solo é muito diluída).

A determinação do Ψ_m pode ser feita em laboratório (utilizando-se o Extrator de Richards) ou no campo (utilizando-se Tensiômetros, que permitem obter boas leituras até tensões de cerca de -0,080 MPa) (LACERDA, 2007).

2.4. O estresse por deficiência hídrica

O estresse hídrico é a mudança significativa das condições ideais de cultivo das plantas, impedindo-as de expressar todo seu potencial genético de crescimento, desenvolvimento e produção (SHAFI UR; HARRIS; ASHRAF, 2005). Existem três respostas básicas das plantas ao déficit hídrico. O escape ocorre quando as plantas entram em estado de dormência, diminuem órgãos ou aumentam as raízes. No adiamento da desidratação, as plantas para manter o teor de água no tecido utilizam mecanismos para minimizar a perda de água e maximar a absorção, como crescimento das raízes, controle dos estômatos e da transpiração, modificações anatômicas e morfológicas das folhas e ajuste osmótico que mantêm o potencial hídrico da planta. A tolerância à desidratação, as plantas mantêm seu crescimento e seu metabolismo, mesmo com a redução do potencial hídrico do solo (GHOTBI RAVANDI et al., 2014; MARTÍNEZ FERNANDÉZ et al., 2012; SUN et al., 2013; TARDIEU, 2005). A resposta das plantas ao estresse é influenciada pela sua duração, severidade e frequência, bem como as partes afetadas da planta, estágio de desenvolvimento e genótipo (FRITSCH NETO; DOVALE; CAVATTE, 2011).

A cana-de-açúcar, quando submetida à deficiência hídrica, apresenta várias alterações morfofisiológicas, como: diminuição da condutância estomática, enrolamento da folha, redução da área foliar, redução da transpiração e redução da fotossíntese (comprometimento das etapas fotoquímicas e bioquímicas) (INMAN BAMBER; SMITH, 2005). Parte dessas respostas são mecanismos para evitar a perda de água, ou seja, de tolerância a seca (KRAMER, 1980).

As plantas quando submetidas à deficiência hídrica apresentam várias alterações morfofisiológicas como: redução do crescimento e diminuição das trocas gasosas. Quanto aos nutrientes as alterações na absorção e acúmulo destes são

específicas para cada espécie de planta. Parte dessas respostas são mecanismos para evitar a perda de água, ou seja, de tolerância à seca (KRAMER, 1980).

2.4.1. Crescimento

As principais alterações que o déficit hídrico ocasionam na planta são a redução da área foliar, aceleração da senescência e abscisão das folhas (TAIZ; ZEIGER, 2013) para diminuir a superfície transpirante da planta e dessa forma evitar a perda de água para a atmosfera.

O crescimento da célula é considerado um dos processos mais sensíveis ao déficit hídrico no solo, com a divisão e expansão celular sendo diretamente inibidas pelo estresse hídrico (SAUSEN, 2007). Em estudo realizado em cana-de-açúcar sob déficit hídrico foi observada redução no alongamento do colmo e menor desenvolvimento foliar (INMAN BAMBER, 2004).

A redução do crescimento é considerada como uma característica adaptativa para a sobrevivência da cultura, pois permite direcionar assimilados e energia, antes utilizados para o crescimento do caule, em moléculas protetoras para combater o estresse e/ou para manter o crescimento da raiz, para absorção de água (SAUSEN, 2007). Os componentes biométricos ligados a produtividade de colmos, podem ser um bom indicador de tolerância ao estresse hídrico (HOLANDA, 2012).

A área foliar é um importante fator de produção, pois é fundamental para uma maior interceptação de luz solar e acúmulo de biomassa, sendo que o lento desenvolvimento das folhas pode limitar a produção da cultura (INMAN BAMBER, 1994), e o maior desenvolvimento da área foliar na fase inicial pode ter grande influência no fechamento mais rápido do dossel e de maior quantidade de luz inicial solar interceptada (SINCLAIR et al., 2004).

Em situações de déficit hídrico, ocorre redução na área foliar, pois uma menor área foliar permite menor perda de água por transpiração, o que caracteriza um meio de proteção da planta (PRISCO, 1986). A planta pode perder área foliar pela redução do tamanho individual das folhas, como também pela senescência e redução no aparecimento de novas folhas (SILVA et al., 2005).

O número de folhas verdes depende tanto do aparecimento de novas folhas, quanto da velocidade de senescência das folhas mais velhas. Em ambientes de alta demanda evaporativa, os dois fatores influenciam o número de folhas verdes, já em ambientes com baixa demanda evaporativa, a senescência contribui mais do que o aparecimento de folhas novas, dessa forma o número de folhas verdes pode ser um bom indicador de estresse hídrico (INMAN BAMBER; SMITH, 2005).

2.4.2. Potencial hídrico foliar

O potencial hídrico foliar (Ψ_f) diminui com o declínio da disponibilidade de água no solo, levando à perda da turgescência e induzindo também ao fechamento estomático, e tais respostas diferenciam-se de espécie para espécie (MANSUR; BARBOSA, 2000; TAVARES, 2009). O Ψ_f descreve o estado energético foliar, cujos gradientes explicam os fluxos da água no sistema solo-planta-atmosfera. Embora haja variação ao longo do dia, mesmo em plantas irrigadas, essa variável descreve o estado hídrico da planta, e tem sido muito utilizado em estudos das relações hídricas dos vegetais (BERGONCI et al., 2000).

O método mais simples e útil para se caracterizar o status de água nas plantas é o potencial hídrico (KLAR, 1984). As medições de potencial hídrico podem determinar o grau de hidratação da planta, e esta variável fornece um índice relativo do estresse hídrico ao qual a planta está submetida (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O limiar de fração de água disponível para a planta, quantidade de água existente no solo a partir da qual a condutância diminui, comparada com um valor de referência, varia para diferentes espécies. Além disso, o limiar de fração de água disponível para as plantas é maior para o potencial da água na folha e expansão foliar do que para a condutância estomática e trocas gasosas, e há variação intraespecífica dependendo das condições experimentais, como o tipo de solo e demanda evaporativa principalmente (SANDRAS; MILROY, 1996).

2.4.3. Teor de clorofila

A clorofila é o pigmento fotossintético mais abundante do planeta, com uma produção anual estimada em 1×10^9 toneladas (HENDRY; PRICE, 1993). É o principal pigmento responsável pela captação de energia luminosa no processo de fotossíntese, constitui um dos principais fatores relacionados à eficiência fotossintética de plantas e consequentemente ao crescimento e adaptabilidade a diferentes ambientes (RÊGO; POSSAMAI, 2004).

As cultivares tolerantes de cana-de-açúcar apresentaram menor redução de teor de clorofila total quando comparada com as sensíveis, em potenciais hídricos mais baixos (PINCELLI, 2010). Outros trabalhos também verificaram alta redução de pigmento fotossintético em plantas de cana-de-açúcar sob deficiência hídrica (CHAUM; KIRDMANEE, 2009), o que indica que a deficiência hídrica é um dos estresses ambientais responsáveis pela perda de pigmentos nas folhas de cana-de-açúcar.

A avaliação do teor de clorofila utilizando o medidor indireto de clorofila como SPAD é importante para os estudos de fisiologia das plantas, possibilitando a sua utilização como critério de avaliação do estado das plantas (ESPOSTI et al., 2003), indicar a senescência foliar (NOODÉN; GUIAMET; JOHN, 1997), além de ser uma importante ferramenta no diagnóstico de estresse em plantas (HENDRY; PRICE, 1993).

2.4.4. Trocas gasosas

As trocas gasosas atuam no balanço energético das folhas, participando da regulação de sua temperatura, de maneira a deixá-la dentro da faixa de valores adequados aos processos fisiológicos das plantas e de adaptação destas ao ambiente (PINCELLI, 2010).

O controle da transpiração é realizado pelo fechamento estomático, que é o único processo solo-planta-atmosfera que possui essa resposta instantânea.

O controle estomático da condutância estomática foliar é um mecanismo pelo qual as plantas reduzem em suas perdas de água e na maioria das vezes indica

uma condição de deficiência hídrica. O fechamento estomático pode ocorrer dentro de uma larga faixa de potencial de água na folha, dependendo da espécie (JONES, 1992). Em plantas sem restrição hídrica, a condutância estomática pode aumentar com a diminuição do potencial da água na folha, resultante de uma maior taxa de transpiração à medida que a abertura estomática aumenta.

A regulação da abertura e fechamento estomático é um processo extremamente complexo envolvendo fatores do ambiente e da própria planta. O rápido fechamento estomático é uma característica desejável e variável em genótipos de cana-de-açúcar, sendo causado pela eficiente sinalização entre as raízes e as folhas (INMAM BAMBER; SMITH, 2005). Cultivares mais tolerantes à seca apresentam fechamento estomático em valores de potencial da água maiores quando comparadas às cultivares sensíveis (SMITH; SINGELS, 2006).

O potencial da água na folha pode ser visto como uma medida de sensibilidade da cana-de-açúcar ao estado da água no solo, contudo a condução estomática diminui em resposta à seca do solo, sem alterações significativas no potencial hídrico (SMITH; SINGELS, 2006).

Quando a abertura estomática é reduzida, o fluxo de vapor d'água diminui proporcionalmente em maior grau do que a diminuição do fluxo de absorção de CO_2 . Num caso extremo, em que as perdas por transpiração podem afetar irreversivelmente, o crescimento ou a sobrevivência da planta, os estômatos tendem a fechar completamente, limitando o suprimento de CO_2 (PIMENTEL, 1998).

A redução na assimilação de CO_2 ocorre devido ao fechamento estomático, afetando a fotossíntese devido à restrição ao fluxo de CO_2 , resultando em efeitos prejudiciais diretamente sobre o aparelho fotossintético, enquanto que as taxas respiratórias não são afetadas (SASSAKI; MACHADO, 1999).

O controle das trocas gasosas é considerado um processo complexo, pois, as plantas enfrentam certo dilema onde, se ocorrer ligeira diminuição de turgescência celular, suficiente para causar o fechamento dos estômatos, vai tornar a absorção de dióxido de carbono extremamente difícil, diminuindo sensivelmente a atividade de assimilação de carbono, assim, elas necessitam abrir os estômatos para a entrada de CO_2 e também fechá-los para evitar a perda de água, porém a tendência é favorecer a assimilação fotossintética (PIMENTEL, 1998; ANGELOCCI, 2002).

Diversos são os trabalhos que mostram a influência hídrica nas trocas gasosas sobre as culturas, em especial sobre a cana-de-açúcar (INMAN BAMBER; SMITH, 2005; SMITH; SINGELS, 2006), desta forma, em condições de estresse hídrico as variáveis de trocas gasosas podem apresentar alterações de forma distinta, de acordo com a espécie, tanto por limitações difusivas, restringindo a disponibilidade de dióxido de carbono para assimilação, quando por limitações metabólicas, pelo aumento do efeito fotoinibitório (GONÇALVES et al., 2010).

2.4.5. Fotossíntese

Nas membranas dos tilacóides, os fotossistemas I e II são responsáveis por captar e converter a energia luminosa do sol (fótons) em energia química (ATP e NADPH) e neste processo, a água é fundamental para o fotossistema II. O centro de reação do fotossistema II é formado por um complexo protéico junto à molécula de clorofila *a* que possui um redutor muito forte que oxida a molécula de água em elétrons, prótons e oxigênio (TAIZ; ZEIGER, 2013).

Desta forma, o fotossistema II depende da água para a geração de energia química, requerida posteriormente para fixação de CO₂, e demonstra que variações na disponibilidade hídrica geram menor eficiência do fotossistema II, ou seja, com recurso de água limitado, menos ATP e NADPH são formados e, como consequência, menos CO₂ é fixado (LU; ZHANG, 1999; SOUZA et al., 2005).

Outros efeitos são as alterações da atividade da ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase oxigenase (Rubisco) (LAWLOR, 1995) e da ATP sintase (TEZARA et al., 1999). A deficiência de CO₂, ATP ou RuBP, assim como a inibição da Rubisco, pode comprometer o ciclo de Calvin e a produção do primeiro aceptor dos elétrons fotossintéticos, o NADPH (HAUPT; FOCK, 2000).

2.4.6. Nutricionais

Além de comprometer a fisiologia da planta, o déficit hídrico pode causar prejuízos indiretos, como efeitos negativos à nutrição da planta, contribuindo para a redução da produtividade (FUKAMI et al., 2012).

O déficit hídrico rigoroso diminui ou inibe a absorção de nutrientes pelas plantas, pois a água é o veículo por meio do qual os íons predominantemente se movimentam da solução do solo para o sistema radicular, principalmente para aqueles cuja principal via de contato do nutriente com as raízes se dá por fluxo de massa. Assim, a restrição hídrica no solo leva, obrigatoriamente, à deficiência de vários nutrientes (NOVAIS et al., 1990).

A umidade do solo, além de influenciar a disponibilidade de elementos essenciais, afeta também o processo de absorção radicular, visto que a água é o veículo natural de entrada dos nutrientes na planta. Assim, a precipitação pluviométrica ou níveis de irrigação, utilizados na área agrícola, podem influenciar a absorção dos nutrientes pelas culturas (PRADO, 2008).

Quando a disponibilidade de água no solo é baixa, a mobilidade dos íons torna-se menor, porque o ar substitui a água nos espaços porosos do solo, aumentando a força retenção iônica pelos colóides do solo (MONTEIRO, 2009). De acordo com o autor, os efeitos sobre a mobilidade dos nutrientes são importantes mesmo em situações em que o conteúdo tem pouco efeito sobre as relações hídricas, resultando em redução na absorção dos mesmos.

O nitrogênio é requerido em maior quantidade pelas culturas, seguido pelo potássio. O N é considerado o principal nutriente para o desenvolvimento da planta (ALVIM; BOTREL, 2001). Como parte do metabolismo global das plantas, o metabolismo do nitrogênio é afetado pelo déficit hídrico, visto que, além de diminuição da expansão celular (TAIZ; ZEIGER, 2013), vários processos fisiológicos, entre eles a síntese de aminoácidos, são amplamente alterados (SILVEIRA et al., 2003; SODEK, 2004). Além disso, o estresse hídrico provoca reduções drásticas na atividade de redutase de nitrato (SINHA; NICHOLAS, 1981). A redutase de nitrato é a primeira enzima na via de assimilação do nitrato, e provavelmente representa o

passo limitante na incorporação desse nutriente em compostos orgânicos, tais como proteínas, aminoácidos, ácidos nucleicos e nucleotídeos (CAMPBELL, 1988).

O N é suprido às raízes basicamente por fluxo de massa, em virtude de que as formas no solo prontamente disponíveis às plantas (amônio e nitrato) se encontram quase que totalmente na solução do solo. Nesse mecanismo, os nutrientes se movimentam em direção às raízes acompanhando o fluxo de água. A transpiração das plantas gera um déficit hídrico interno que faz com que elas absorvam água do solo, que, por sua vez, gera um gradiente hídrico no solo entre a rizosfera e os locais imediatamente distantes dela. Com isso, a água se movimenta em direção às raízes e leva consigo os nutrientes nela dissolvidos. A quantidade de N que chega à planta por esse mecanismo depende, portanto, das condições de transpiração, da concentração do nutriente na solução do solo e do teor de água no solo (NAVA, 2007).

O fósforo é um elemento pouco móvel no solo e seu suprimento para as raízes é efetuado principalmente pelo processo de difusão, o qual depende de umidade do solo e da superfície radicular (GAHOONIA; RAZA; NIELSEN, 1994). Por sua vez, a umidade do solo interfere diretamente no desenvolvimento radicular, influenciando direta ou indiretamente, no fornecimento de fósforo para as plantas (MACKAY; BARBER, 1985).

Para Hernández, Gomes e Vanzela (2005), o suprimento adequado de água no solo favorece a absorção do fósforo pelas plantas, em função de promover a solubilização desses nutrientes como também a sua difusão até a raiz das plantas. Além disso, sob condições de estresse hídrico, a transpiração, que provoca o fluxo contínuo de água do solo à superfície externa das folhas, carreando os nutrientes, é reduzida ou anulada, decrescendo ou zerando a absorção de nutrientes.

O contato do potássio com as raízes das plantas também se dá principalmente por difusão (GAHOONIA; RAZA; NIELSEN, 1994) o que também indiretamente depende da água disponível no solo. As plantas dependem também do potássio para regular a abertura e fechamento dos estômatos. O próprio funcionamento dos estômatos depende de um suprimento adequado de potássio, o qual se move para dentro das células-guarda. Estas acumulam água e intumescem, causando abertura dos estômatos, permitindo o movimento livre dos gases para

dentro e para fora da célula. Quando o suprimento de água é baixo, o potássio é bombeado para fora das células guarda e os poros se fecham firmemente para evitar perda de água. Se o suprimento de potássio é inadequado, os estômatos ficam lentos, demoram a responder e o vapor d'água é perdido (TAIZ; ZEIGER, 2013).

O potássio exerce também uma função maior no transporte de água e nutrientes no xilema, em todas as partes da planta, contribuindo para regulação do potencial osmótico da planta (MALAVOLTA, 1993).

III. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Preparo e análises químicas e físicas do solo

Na Fazenda Experimental da UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP, foram retiradas amostras do solo utilizado no estudo.

O solo da área classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, textura média, A moderado, caulínítico, hipoférico, muito profundo (EMBRAPA, 2013), cuja composição granulométrica na camada de 0,0 – 0,20 m (argila = 536 g kg⁻¹; silte = 228 g kg⁻¹; areia fina = 135 g kg⁻¹ e areia grossa = 101 g kg⁻¹) foi determinada em amostras deformadas por meio da dispersão NaOH (0,1 mol L⁻¹) e agitação lenta por 16 h. O conteúdo de argila foi obtido pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986).

Este solo foi analisado quimicamente conforme indicações de Raij et al. (2001) e apresentou os seguintes resultados: pH (CaCl₂) = 5,8; matéria orgânica = 23 g dm⁻³; P (resina) = 76 mg dm⁻³; K = 5,7 mmol_c dm⁻³; Ca = 49,0 mmol_c dm⁻³; Mg = 26,0 mmol_c dm⁻³; H+Al = 22,0 mmol_c dm⁻³; SB = 80,7 mmol_c dm⁻³; CTC = 102,7 mmol_c dm⁻³; V = 79%. Os teores de P e K no solo foram considerados muito altos (RAIJ et al., 1997).

Os vasos (50 dm³) foram levados até a Fazenda Experimental e preenchidos com o solo acima descrito.

Na casa de vegetação do Departamento de Tecnologia, na UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, o solo de três vasos foram umedecidos até sua capacidade de campo e coletadas amostras deste solo em anéis volumétricos que foram submetidas a diferentes potenciais hídricos em câmara de pressão (KLUTE, 1986) e determinada a curva de retenção de água (Figura 1).

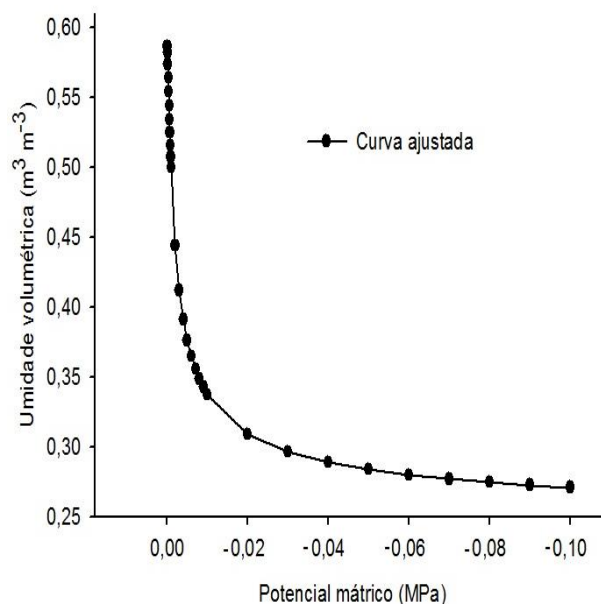


Figura 1. Curva de retenção de água de amostra de um Latossolo Vermelho eutrófico típico, textura média, Jaboticabal, SP.

A partir dos dados da curva de retenção foram determinados os volumes de água por unidade de volume de solo a serem impostos nos tratamentos durante a instalação e condução do experimento, sendo:

- a) -0,010 a -0,015 MPa = Ψ_{SR} = sem restrição hídrica;
- b) -0,050 a -0,055 MPa = Ψ_{M} = potencial hídrico moderado e
- c) -0,075 a -0,080 MPa = Ψ_{S} = potencial hídrico severo.

O solo dos vasos foi pesado para exatamente 50 dm^3 de solo em cada vaso e incorporado 222,0 mg dm^3 de superfosfato simples, segundo recomendações de Raij et al. (1997). Também durante este preenchimento dos vasos foram instalados no centro geométrico dos vasos um tubo de PVC com perfurações ao longo de toda sua extensão para realizar a reposição de água e assim garantir rápida distribuição da umidade do solo em todos os estratos do vaso.

3.2. Instalação e condução do experimento

O experimento foi realizado de janeiro a junho de 2012 e conduzido na casa de vegetação do Departamento de Tecnologia, na UNESP – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP.

Os mini toletes de cana-de-açúcar, com uma gema, de aproximadamente 6 cm de comprimento, das cultivares SP81-3250, RB855453 e IACSP95-5000, provenientes da coleção de cultivares da Unidade de Pesquisa de Jaú da APTA/SSA, Polo Centro Oeste, Jaú-SP, foram plantados em copos plásticos de 0,5 dm³ e preenchidos com areia.

Aos 30 dias de brotação das gemas, as plantas mais uniformes e de bom aspecto sanitário foram transferidas para os vasos, as quais foram cultivadas no solo sem restrição hídrica, em capacidade de campo, por 30 dias (período necessário para estabelecimento e adaptação do sistema radicular). Durante este período também foram instalados dois tensiômetros de punção, em cada unidade experimental, um na profundidade de 10 cm e o outro na de 30 cm.

Durante o período experimental as condições ambientais de temperatura média e umidade relativa do ar da casa de vegetação foram monitoradas com auxílio de termohigrômetro e mantidas em $20 \pm 4,3$ °C e $67 \pm 10\%$, respectivamente, para temperatura média e umidade relativa do ar.

Aos 50 dias de idade das plantas foi realizada a adubação de cobertura com 66,0 mg dm³ de cloreto de potássio e 91,0 mg dm³ de ureia segundo recomendações de Raij et al. (1997).

3.3. Tratamentos e delineamento experimental

Quando as plantas atingiram 60 dias de idade, foi iniciada a imposição dos três níveis de potenciais hídricos do solo: -0,010 a -0,015, -0,050 a -0,055 e -0,075 a -0,080 MPa. As leituras dos potenciais hídricos foram realizadas diariamente, pela manhã, com o tensímetro digital. Pela média das leituras eram calculadas as estimativas da umidade do solo e a quantidade de água necessária para manter os potenciais hídricos do solo, predeterminados, era repostada com o auxílio de provetas.

O experimento constou da combinação de três cultivares cultivadas e três potenciais hídricos do solo, num total de nove tratamentos. Tais tratamentos foram dispostos num delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições, perfazendo um total de 36 parcelas (vasos com 50 dm³ de solo)

3.4. Avaliações

As avaliações foram realizadas aos 30, 60 e 90 DAT (dias após a imposição dos tratamentos).

3.4.1. Avaliações biométricas

Para a altura da planta (A), o perfilho primário (primeiro perfilho a emergir durante a brotação da gema) foi marcado e seu crescimento monitorado nas três datas de avaliação, por meio de uma fita métrica, da superfície do solo até a folha +1.

O número de folhas verdes (NF) por planta, em cada unidade experimental, foi determinado considerando-se as folhas com pelo menos 20% de área foliar verde.

O número de perfilhos (NP) por planta foi realizado fazendo a contagem dos perfilhos em cada planta da unidade experimental.

Nas avaliações de área foliar (AF) foram realizadas medições do comprimento e diâmetro do limbo foliar na porção mediana da folha+1, com auxílio de uma fita métrica e régua, respectivamente. A área foliar foi calculada segundo metodologia descrita por Hermann e Câmara (1999): $AF = C \times L \times 0,75 \times (N+2)$, em que C é o comprimento da folha +2, L é a largura da folha +2, 0,75 é o fator de correção para área foliar da cultura, e N é o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde.

3.4.2. Medições de trocas gasosas

Para as avaliações das taxas de fotossíntese máxima (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e concentração interna de CO₂ (Ci) foi usado um analisador de gases por infravermelho, portátil (LCPro+ SYSTEM, ADC) acoplado a uma fonte de luz. As avaliações foram feitas sob concentração de CO₂ ambiente ($370 \pm 10 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e FFFA (fluxo de fótons fotossinteticamente ativo) de 1200

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, segundo metodologia descrita por Marengo, Gonçalves e Vieira (2001). As medições de trocas gasosas foram avaliadas entre 8:00 a 10:00 AM na porção mediana da folha +1 completamente expandida. Com os resultados das trocas gasosas foram calculadas as relações de eficiência instantânea de uso da água (EUA) de A/E , eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) de A/g_s e eficiência instantânea de carboxilação (EIC) de A/C_i .

3.4.3. Teor de clorofila (SPAD)

Uma estimativa do teor de clorofila foi determinado usando um medidor de clorofila SPAD-502 (Minolta Corp, Ramsey, NJ, EUA). Foi utilizada uma média de três leituras na porção mediana da folha +2. A análise do desenvolvimento da planta (índice SPAD) correspondeu a leitura do conteúdo de cor verde em folha, e o seu valor era equivalente à quantidade de luz transmitida através da folha em duas regiões de comprimentos de onda de vermelho e infravermelho. A quantidade de luz vermelha absorvida indicou a quantidade de clorofila, ao passo que a quantidade de luz absorvida ao lado do comprimento de onda infravermelho serviram como referência interna para compensar a espessura da folha.

3.4.4. Potencial hídrico foliar

Simultaneamente às medições de trocas gasosas, a folha +1 do perfilho principal de cada vaso foi cortada para avaliar o potencial de água na folha (Ψ_{folha}), a partir de uma bomba de pressão de Scholander (Soil Moisture Equipment, EUA). A pressão foi aplicada até ocorrer exsudação a partir do corte feito no pecíolo da folha. As medições foram avaliadas entre 8:00 a 10:00 AM.

3.4.5. Fitomassa e avaliações nutricionais

Com 90 DAT as plantas foram cortadas rente ao solo e separadas as folhas e colmos. Tais amostras foram lavadas com água destilada e secas em estufa com circulação de ar forçada a 65 °C até atingir peso constante. Então, a fitomassa (MASSA) foi determinada em balança analítica. A seguir, as amostras foram moídas em moinho tipo Willey e passadas em peneira com malha de 2 mm. O teor de N foi determinado pelo método de Kjeldhal, após digestão sulfúrica. O teor de P foi determinado pelo método espectrofotométrico do molibdato-vanadato e o teor de K determinado por espectrofotometria de absorção atômica em chama, após digestão nitro-perclórica das amostras (BATAGLIA et al., 1983). Com base nos dados de teor e fitomassa foi calculado o acúmulo dos nutrientes na parte aérea das plantas e a eficiência de utilização de nitrogênio (EUN), fósforo (EUP) e potássio (EUK).

3.5. Análises estatísticas

Os resultados das variáveis foram submetidas à análise de variância pelo teste F num esquema fatorial 3 x 3 (três cultivares x três potenciais hídricos do solo), dentro de cada época de avaliação (30, 60 e 90 DAT). As médias foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Tais cálculos foram executados com auxílio do programa Sisvar (FERREIRA, 2011).

Para verificação dos parâmetros que influenciaram na tolerância das cultivares ao déficit hídrico foram obtidas as correlações entre os parâmetros em função de todas as cultivares e potenciais hídricos do solo, pelo método de Barson, com o programa SigmaStat versão 3.1 (SYSTAT SOFTWARE INC., 2004).

IV. RESULTADOS

4.1. Avaliações de crescimento, potencial hídrico foliar, teor de clorofila e trocas gasosas

Na Tabela 1 encontra-se o resumo da análise de variância para as variáveis analisadas aos 30 DAT.

Tabela 1. Resumo da análise de variância de número de folhas verdes (NF), área foliar (AF), altura da planta (AP), número de perfilhos (NP), potencial hídrico foliar (Ψ_f), índice SPAD, fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO_2 (Ci), eficiência instantânea de carboxilação (EIC), eficiência instantânea de uso da água (EUA) e eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) sob efeito de cultivares e potenciais hídricos do solo aos 30 dias após a imposição dos tratamentos (DAT). Jaboticabal, SP, 2012.

Variáveis	Valores de F			CV(%)
	Cultivares	Potenciais	Interação	
NF (planta ⁻¹)	1072,80**	46,58**	27,57**	6,90
AF (m ² planta ⁻¹)	1454,83**	115,88**	37,81**	5,88
AP (cm)	225,64**	121,03**	15,84**	4,31
NP (planta ⁻¹)	147,10**	1,14 ^{ns}	1,30 ^{ns}	16,23
Ψ_f (MPa)	72,19**	228,01**	2,59 ^{ns}	7,18
SPAD	0,29 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,86 ^{ns}	6,28
A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	4,03*	26,53**	2,95*	8,92
E ($\text{H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0,15 ^{ns}	1,79 ^{ns}	1,41 ^{ns}	11,29
gs ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	0,81 ^{ns}	1,54**	1,42 ^{ns}	11,50
Ci ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)	3,39 ^{ns}	2,65 ^{ns}	2,62 ^{ns}	9,75
EIC ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)	4,83*	13,81**	3,14*	17,62
EUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$)	9,62**	3,27 ^{ns}	3,00*	8,10
EIUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)	2,15 ^{ns}	16,22**	2,75 ^{ns}	9,24

*, ** e ^{ns} – Significativo a 5% e 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente, em relação ao teste F. CV – coeficiente de variação.

Conforme observado na Tabela 1 houve efeito significativo para a interação cultivares x potenciais em: número de folhas verdes, área foliar, altura da planta,

fotossíntese, eficiência instantânea de carboxilação e eficiência instantânea de uso da água. O efeito independente de cultivares foi observado para: número de perfilhos e potencial hídrico foliar. O efeito de potenciais foi observado em: potencial hídrico foliar, condutância estomática e eficiência intrínseca de uso da água (Tabela 1). Os dados desses efeitos estão apresentados abaixo.

Verificou-se aos 30 DAT que os valores de número de folhas verdes, área foliar e altura da planta foram menores nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas em Ψ_{SR} em todas as cultivares (Figura 2 a, b e 3 a).

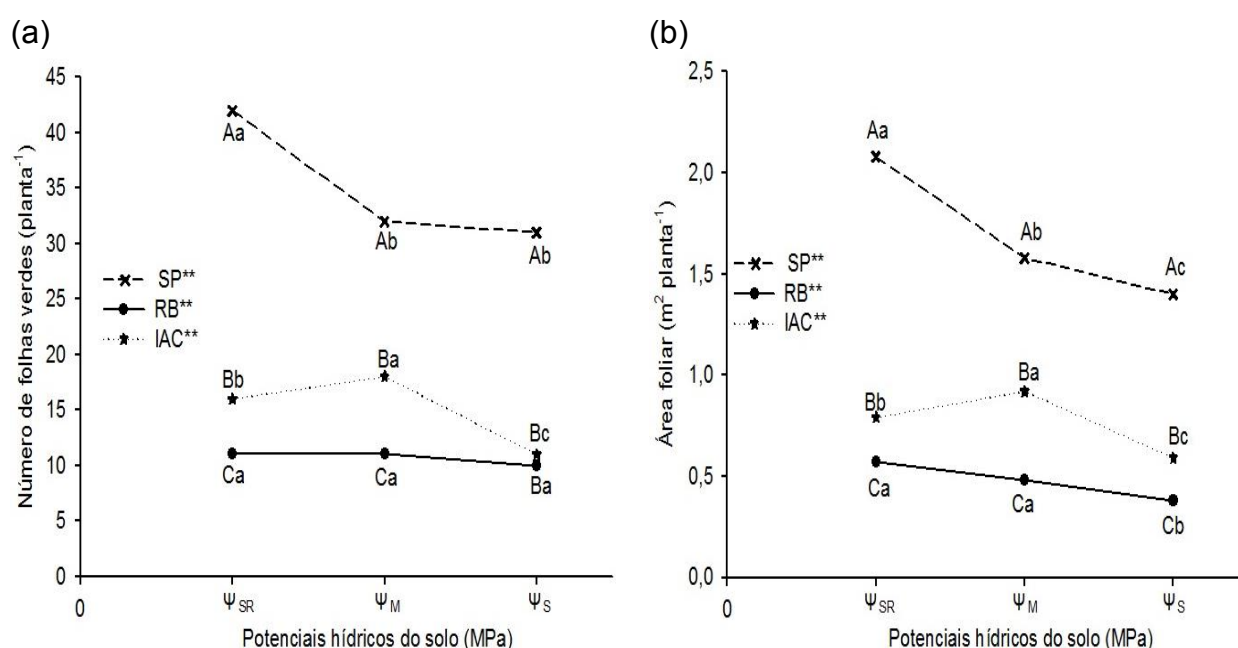


Figura 2. Número de folhas verdes (a) e área foliar (b) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 30 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

Para número de perfilhos observou-se efeito independente de cultivares (Tabela 1). A cultivar SP apresentou o maior número de perfilhos, a RB a menor quantidade de perfilhos e a IAC número de perfilhos intermediário (Figura 3 b).

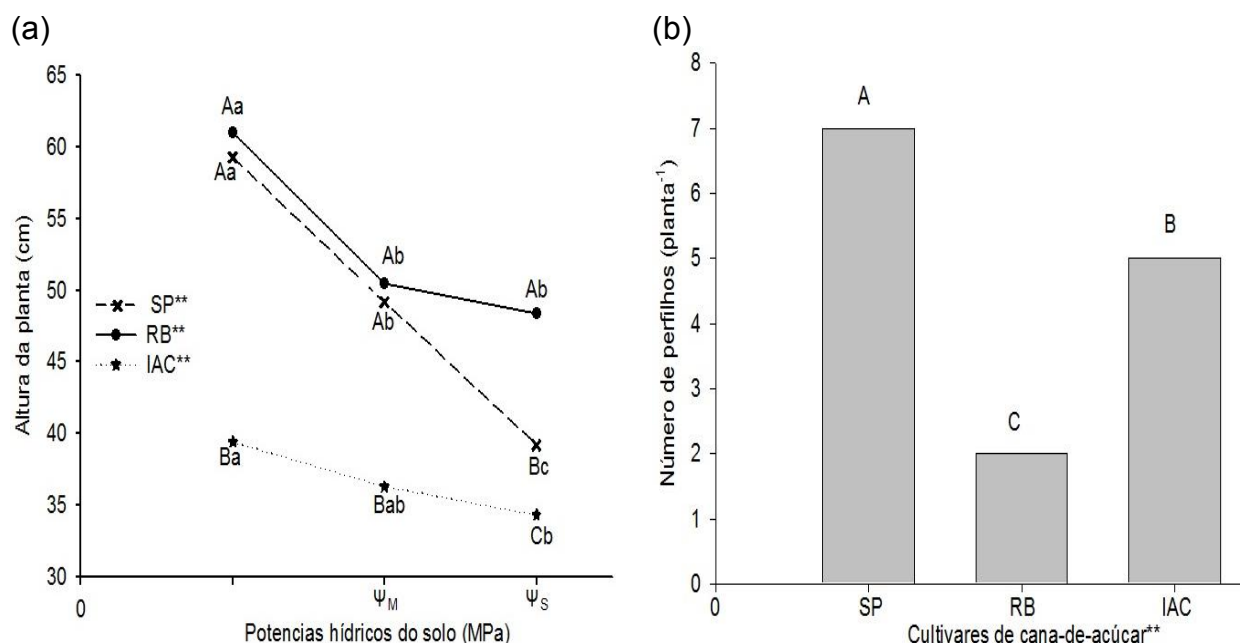


Figura 3. Altura da planta (a) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo e número de perfilhos de três cultivares de cana-de-açúcar (b) aos 30 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar.** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

Em potencial hídrico foliar foi observado efeito independente de cultivares e potenciais (Tabela 1). A cultivar RB obteve a maior redução do conteúdo de água na folha e a SP a menor redução do potencial hídrico foliar (Figura 4 a). A cultivar IAC apresentou valores intermediários (Figura 4 a). O potencial hídrico foliar tendeu a diminuir com o a redução do potencial hídrico do solo (Figura 4 b). A fotossíntese das plantas sob Ψ_S apresentou valores menores em relação às plantas sob Ψ_{SR} em todas as cultivares (Figura 4 c). Sob Ψ_{SR} e sob Ψ_S a cultivar SP apresentou maior fotossíntese (Figura 4 c).

Para condutância estomática foi observado efeito independente apenas para potenciais hídricos do solo, sendo observado menor condutância estomática nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 4 d).

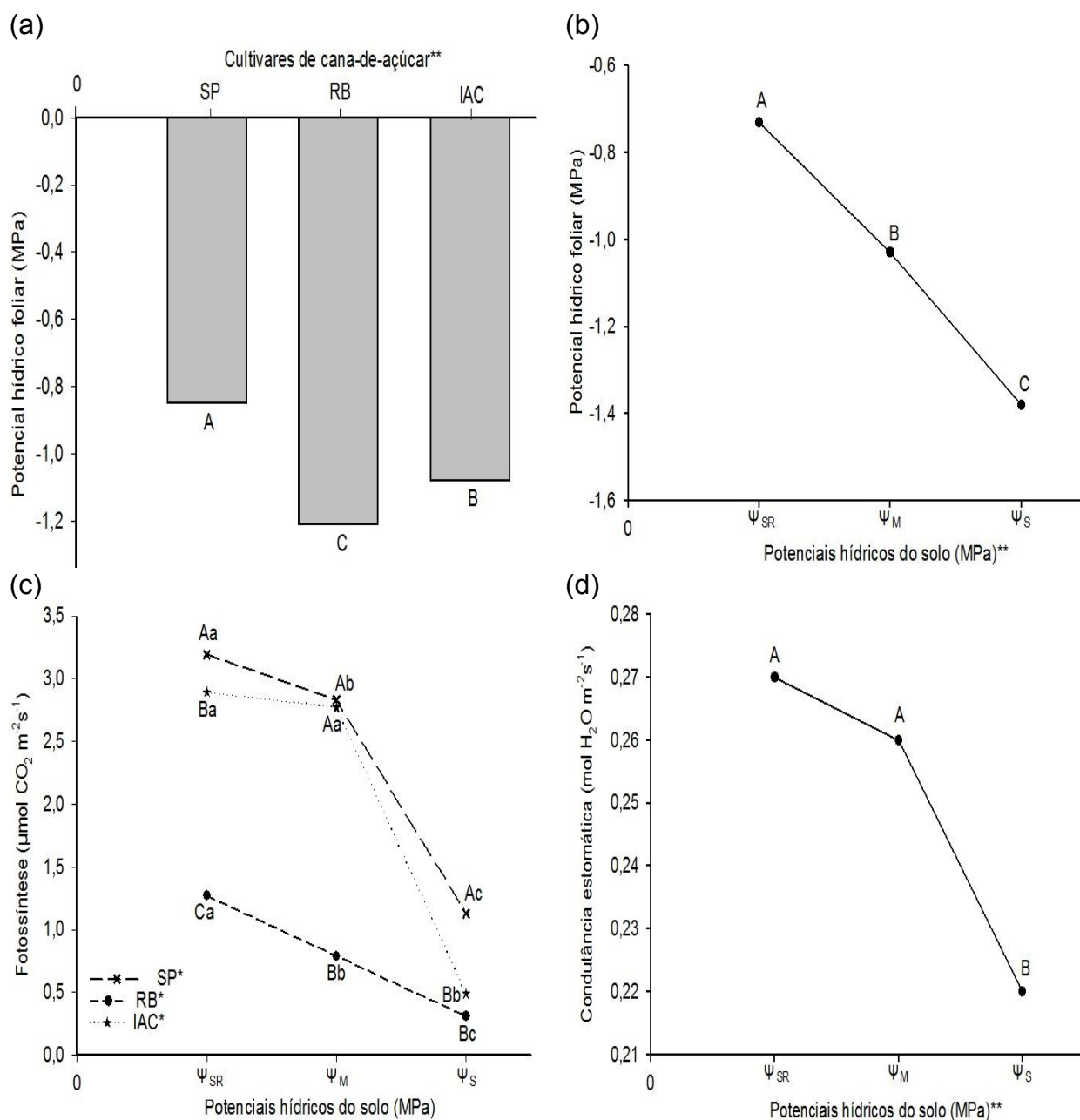


Figura 4. Potencial hídrico foliar de cultivares de cana-de-açúcar (a), potencial hídrico foliar, fotossíntese de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo (c) e condutância estomática sob potenciais hídricos do solo (d) aos 30 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** e * – Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

As cultivares SP e RB obtiveram o maior valor de EIC nas plantas sob Ψ_{SR} , porém as cultivares não se diferenciaram sob Ψ_S (Figura 5 a). A cultivar SP e RB

apresentaram menores valores de EIC sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 5 a). A cultivar IAC manteve os valores de EIC nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 5 a). As cultivares SP e RB apresentam os maiores valores de EIUA sob Ψ_{SR} , porém as cultivares não se diferem sob Ψ_S (Figura 5 b). A cultivar IAC mantém os valores de EIUA sob Ψ_S os mesmos das plantas sob Ψ_{SR} (Figura 5 b).

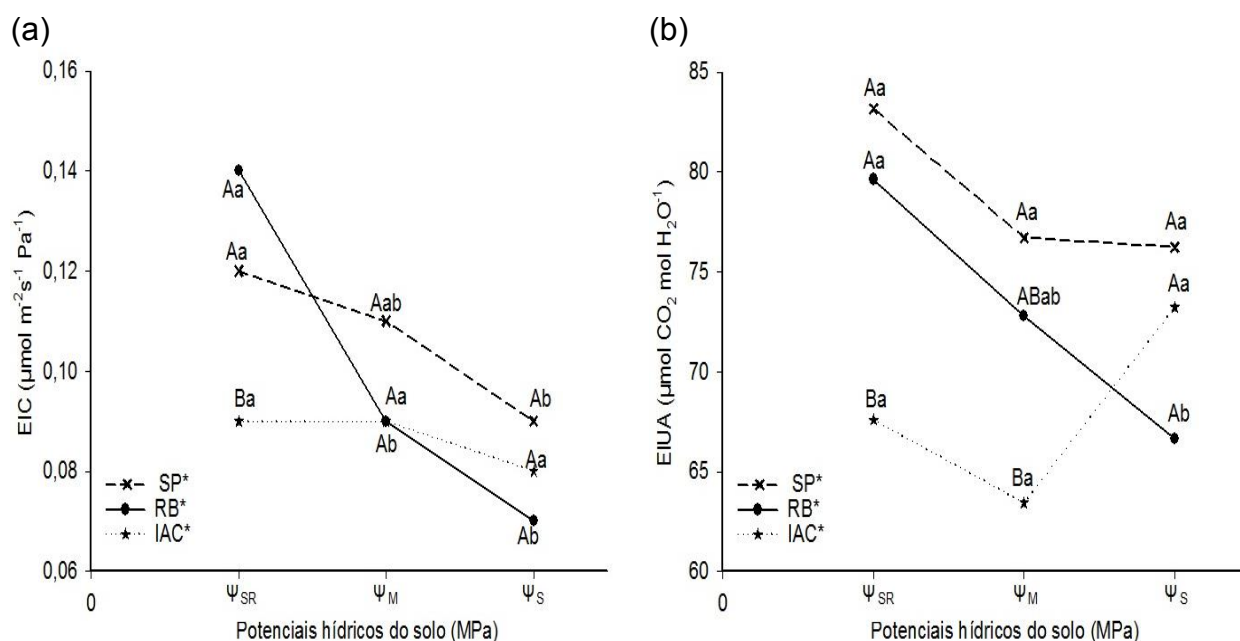


Figura 5. Eficiência instantânea de carboxilação (EIC) (a) e eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) (b) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 30 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. * – Significativo a 5% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

A EUA apresentou efeito independente em potenciais hídricos do solo, sendo 19% menor nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 6).

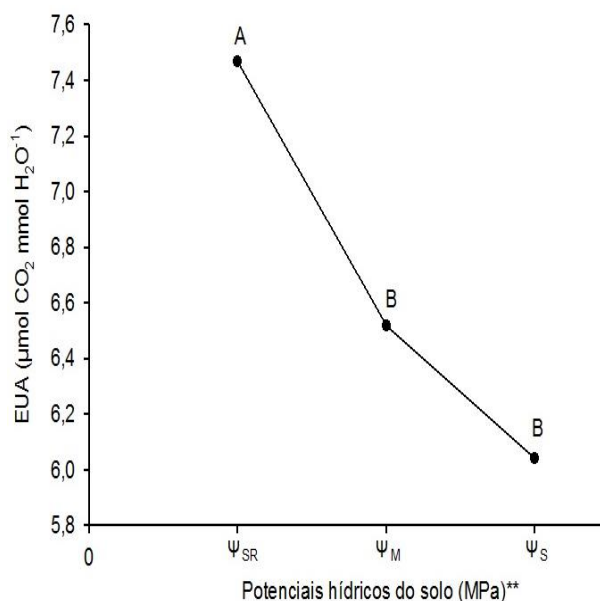


Figura 6. Eficiência instantânea de uso da água sob potenciais hídricos do solo (EUA) aos 30 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam potenciais hídricos do solo. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

Na Tabela 2 estão os resultados do resumo da análise de variância aos 60 DAT. Os resultados foram semelhantes aos observados na Tabela 1 (30DAT), destacando-se nesta avaliação a interação (cultivares x potenciais) para: potencial hídrico foliar, índice SPAD, transpiração e condutância estomática (Tabela 2). Quanto aos fatores independentes observou-se significância para cultivares em: número de perfilhos e eficiência instantânea de carboxilação e quanto a potenciais a significância foi observada para: número de perfilhos, concentração interna de CO_2 , eficiência instantânea de carboxilação e eficiência intrínseca de uso da água (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo da análise de variância de número de folhas verdes (NF), área foliar (AF), altura da planta (AP), número de perfilhos (NP), potencial hídrico foliar (Ψ_f), índice SPAD, fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO_2 (Ci), eficiência instantânea de carboxilação (EIC), eficiência instantânea de uso da água (EUA) e eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) sob efeito de cultivares e potenciais hídricos do solo aos 60 dias após a imposição dos tratamentos (DAT). Jaboticabal, SP, 2012.

Variáveis	Valores de F			CV(%)
	Cultivares	Potenciais	Interação	
NF (planta ⁻¹)	715,79**	316,50**	49,65**	8,10
AF (m ² planta ⁻¹)	678,17**	615,26**	69,35**	7,25
AP (cm)	243,26**	474,33**	13,25**	3,78
NP (planta ⁻¹)	247,09**	13,85**	1,79 ^{ns}	13,27
Ψ_f (MPa)	278,93**	616,79**	29,72**	3,55
SPAD	40,36**	241,14**	13,78**	3,08
A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	21,42**	20,81**	3,21*	16,95
E ($\text{H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	44,64**	11,93**	3,18*	10,57
gs ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	51,50**	17,43**	5,91**	13,44
Ci ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)	1,91 ^{ns}	17,25**	1,79 ^{ns}	10,94
EIC ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)	13,05**	21,37**	2,54 ^{ns}	22,70
EUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$)	1,34 ^{ns}	0,87 ^{ns}	0,04 ^{ns}	22,48
EIUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)	1,87 ^{ns}	7,83**	0,91 ^{ns}	15,38

** e ^{ns} – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente, em relação ao teste F. CV – coeficiente de variação.

As cultivares de cana-de-açúcar apresentaram comportamentos semelhantes para número de folhas verdes e área foliar aos 60 DAT (Figura 7 a e b) em relação aos 30 DAT (Figura 2 a e b). Observou-se uma redução ainda mais acentuada do Ψ_M para o Ψ_S do que aos 30 DAT (Figura 2 a e b e 7 a e b).

Em altura da planta nas cultivares mantidas sob Ψ_{SR} a SP foi superior, a RB apresentou valores intermediários e a IAC os menores valores, porém sob Ψ_S as cultivares SP e RB não se diferenciaram ($p>0,01$) e a cultivar IAC obteve os menores valores (Figura 8).

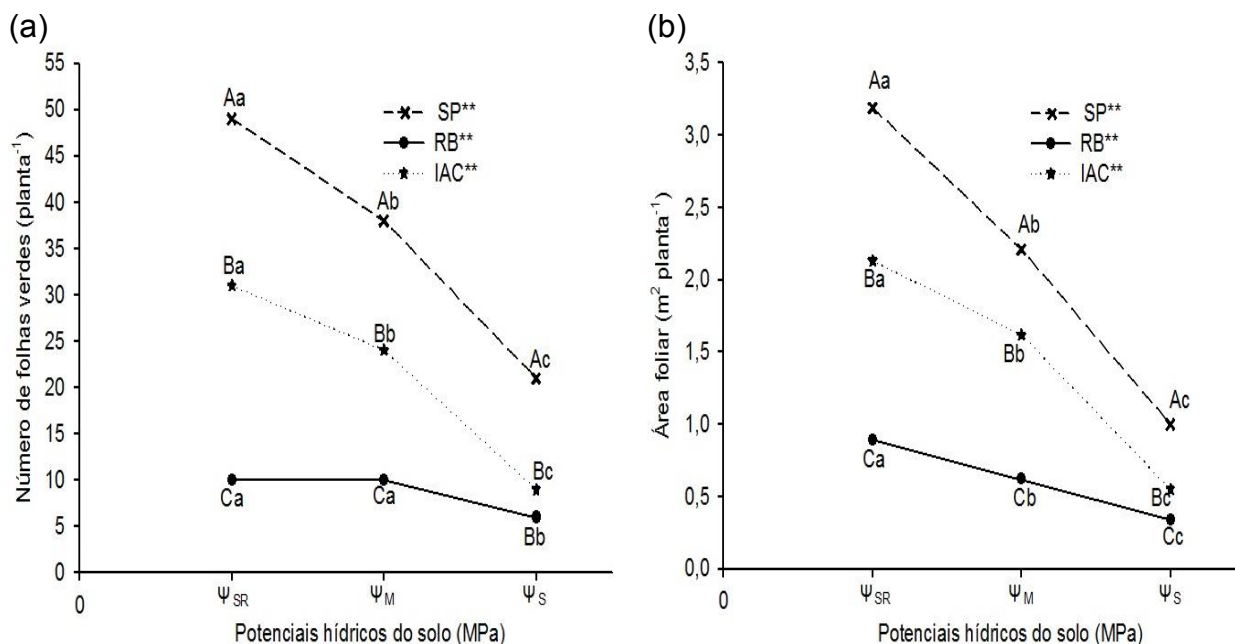


Figura 7. Número de folhas verdes (a) e área foliar (b) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 60 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

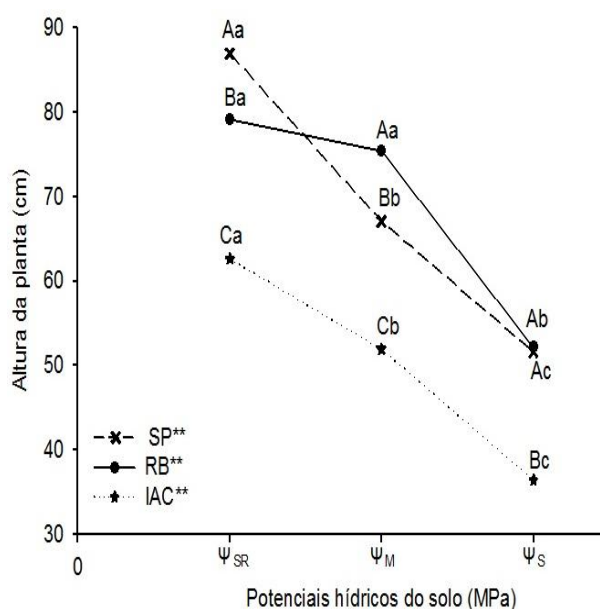


Figura 8. Altura da planta (c) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 60 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

O número de perfilhos foi afetado de forma independente pelas cultivares e potenciais hídricos do solo (Figura 9 a e b). Avaliando o efeito médio das cultivares observou-se que a cultivar SP produziu o maior número de perfilhos, a IAC apresentou valores intermediários e a RB produziu o menor número de perfilhos (Figura 9 a). A produção de número de perfilhos diminui nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 9 b).

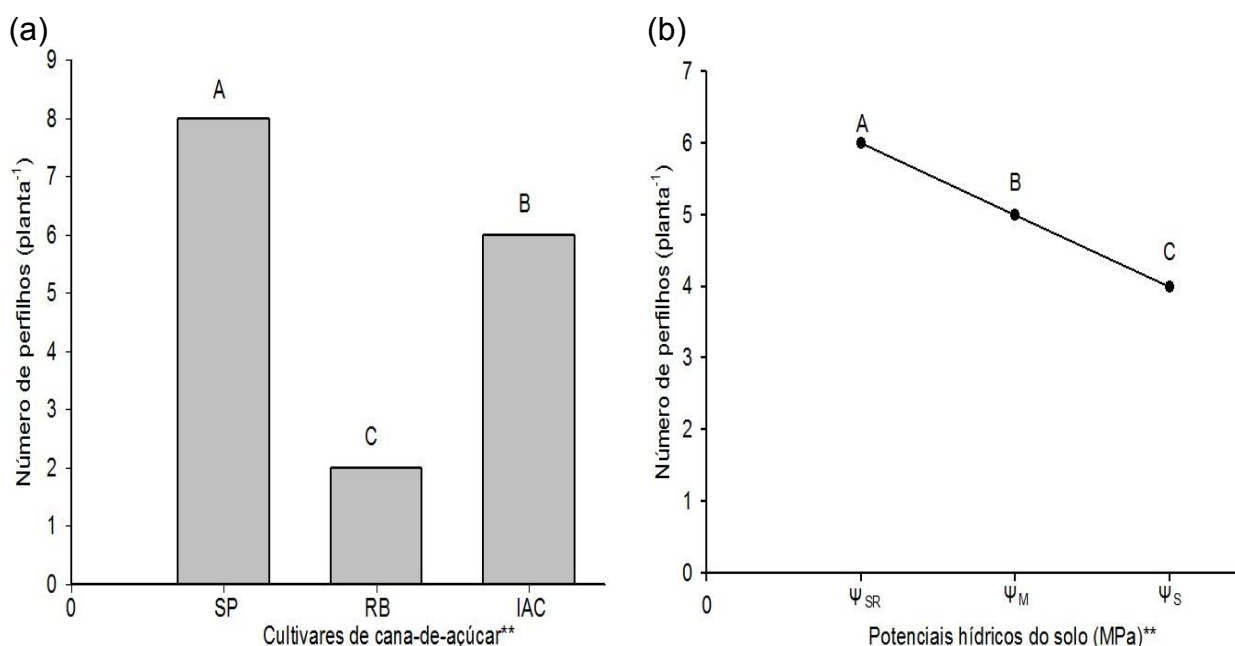


Figura 9. Número de perfilhos de três cultivares de cana-de-açúcar (a) e número de perfilhos sob três potenciais hídricos do solo (b) aos 60 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares e potenciais hídricos do solo.** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

As cultivares SP e IAC não se diferenciam nas plantas sob Ψ_{SR} em potencial hídrico foliar (Figura 10 a). Quando as plantas estão sob Ψ_S , em todas as cultivares a água nas folhas diminui, sendo que a cultivar SP apresenta os maiores valores de potencial hídrico foliar, a RB valores intermediários e a IAC valores inferiores em relação às demais cultivares (Figura 10 a). Em índice SPAD as cultivares também não se diferenciam quando mantidas sob Ψ_{SR} , porém sob Ψ_S a cultivar SP apresenta os maiores valores, a cultivar RB valores intermediários e a IAC os menores valores (Figura 10 b).

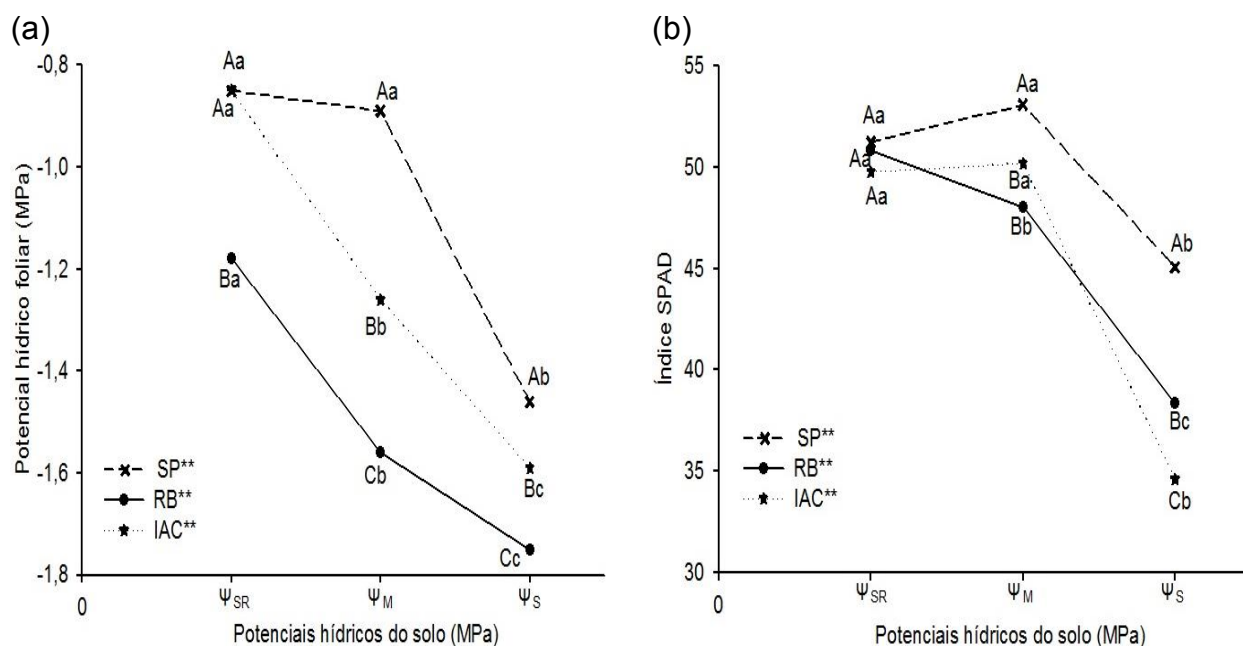


Figura 10. Potencial hídrico foliar (a) e teor de clorofila (b) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 60 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

O comportamento das cultivares foi semelhante para as medidas de fotossíntese, transpiração e condutância estomática (Figura 11 a, b e c). As plantas da cultivar IAC apresentaram os maiores valores de fotossíntese, transpiração e condutância estomática sob Ψ_S , não se diferenciando da SP em fotossíntese (Figura 11 a, b e c). A cultivar SP manteve os valores de fotossíntese, transpiração e condutância estomática os mesmos sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 11 a, b e c). A cultivar RB apresentou valores intermediários nas plantas sob Ψ_{SR} e sob Ψ_S obteve os menores valores (Figura 11 a, b e c). A concentração interna de CO_2 apresentou efeito independente para potenciais hídricos do solo e foi 20% maior nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 11 d).

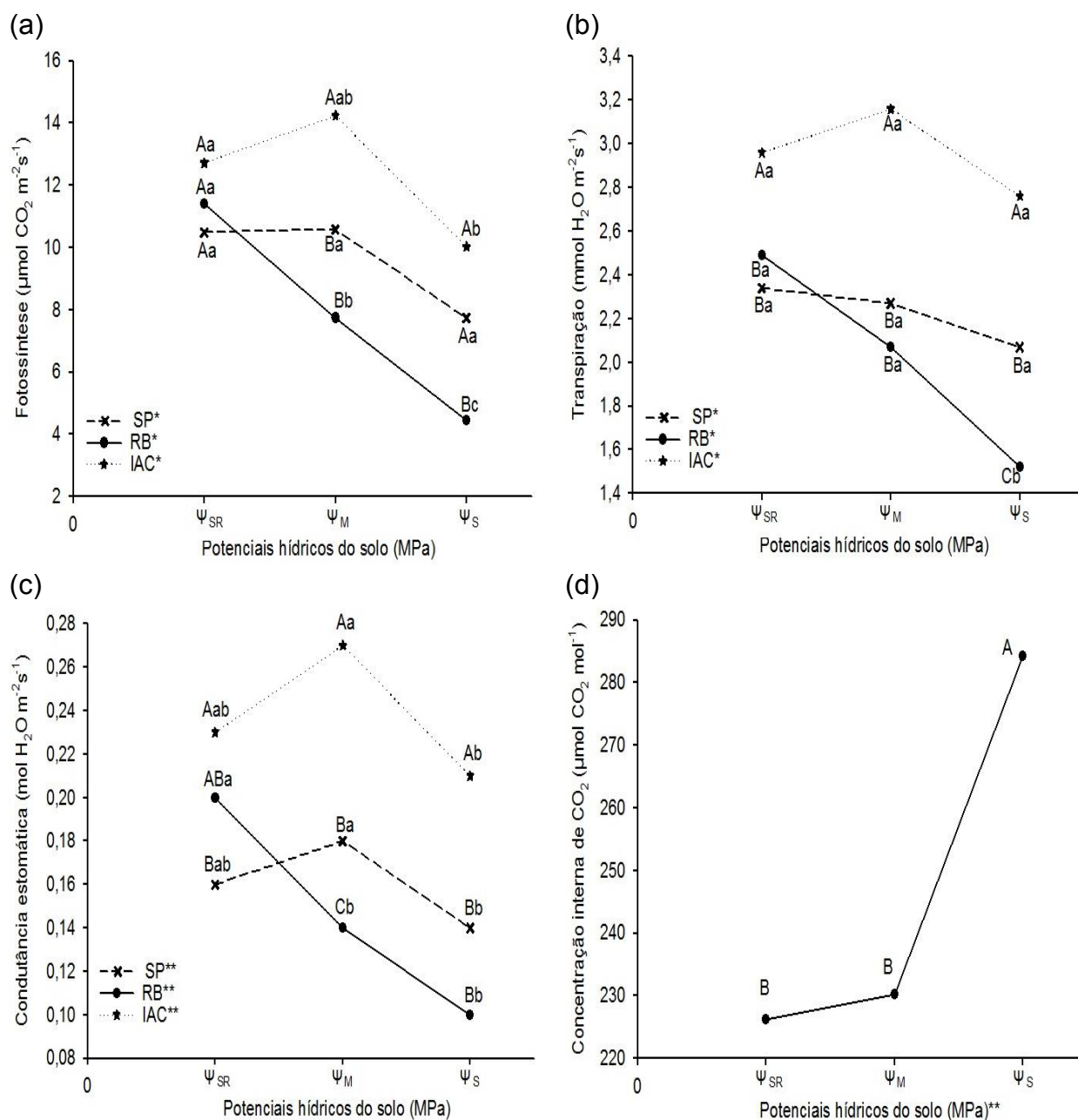


Figura 11. Fotossíntese (a), transpiração (b) e condutância estômática (c) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo e concentração interna de CO_2 sob três potenciais hídricos do solo (d) aos 60 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** e * – Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

A eficiência instantânea de carboxilação (EIC) apresentou efeito independente para cultivares e potenciais hídricos do solo (Figura 12 a e b).

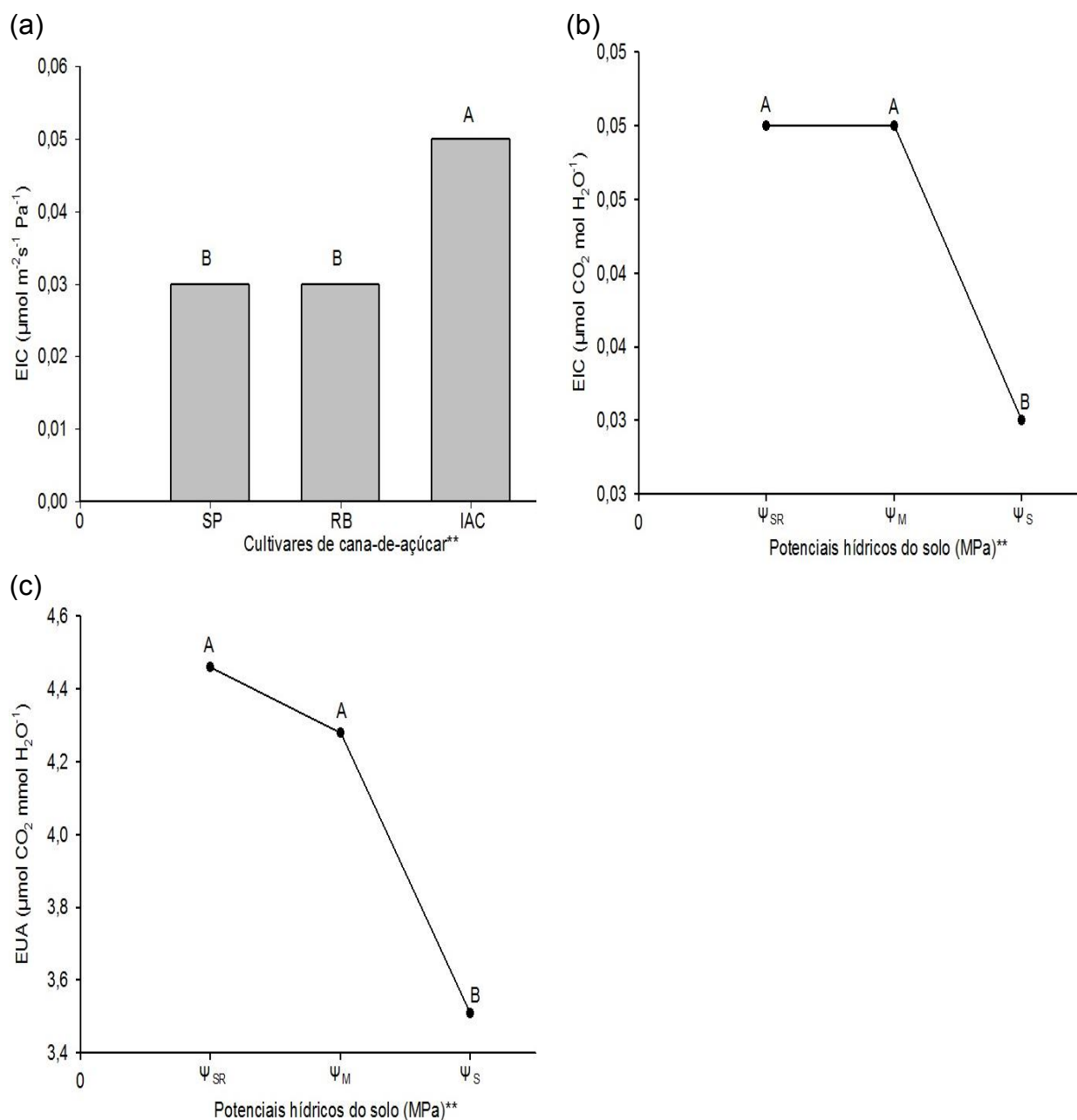


Figura 12. Eficiência instantânea de carboxilação (EIC) de três cultivares de cana-de-açúcar (a), eficiência instantânea de carboxilação (EIC) sob três potenciais hídricos do solo (b) e eficiência instantânea de uso da água (EUA) sob três potenciais hídricos do solo (c) aos 60 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar.** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

A EIC foi maior nas plantas da cultivar IAC em comparação com as cultivares SP e RB (Figura 12 a). A EIC foi 40% menor nas plantas sob Ψ_S em relação às

plantas em Ψ_{SR} (Figura 12 b). A eficiência instantânea de uso da água (EUA) apresentou efeito independente apenas para potenciais hídricos do solo e foi 21% menor nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas em Ψ_{SR} (Figura 12 c).

Na Tabela 3 encontra-se o resumo da análise de variância para as variáveis analisadas aos 90 DAT. A interação cultivares x potenciais foi significativa para número de perfilhos, o que não ocorreu aos 30 DAT e 60 DAT (Tabela 1 e 2). Por sua vez a transpiração e condutância estomática que foram significativas aos 60 DAT não foram significativas aos 90 DAT (Tabela 3). Nesta última avaliação foram observados independentes efeitos das cultivares sobre: transpiração e condutância estomática (Tabela 5). Enquanto os potenciais apresentaram efeitos independentes sobre a: transpiração, condutância estomática, concentração interna de CO_2 , eficiência de uso da água e eficiência intrínseca de uso da água (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise de variância de número de folhas verdes (NF), área foliar (AF), altura da planta (AP), número de perfilhos (NP), potencial hídrico foliar (Ψ_f), índice SPAD, fotossíntese (A), transpiração (E), condutância estomática (gs), concentração interna de CO_2 (Ci), eficiência instantânea de carboxilação (EIC), eficiência instantânea de uso da água (EUA) e eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) sob efeito de cultivares e potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos (DAT). Jaboticabal, SP, 2012.

Variáveis	Valores de F			CV(%)
	Cultivares	Potenciais	Interação	
NF (planta ⁻¹)	697,86**	503,97**	60,24**	7,02
AF (m ² planta ⁻¹)	725,28**	957,71**	82,55**	6,21
AP (cm)	214,94**	920,67**	16,83**	4,07
NP (planta ⁻¹)	296,42**	86,65**	9,46**	10,09
Ψ_f (MPa)	36,38**	189,57**	3,02*	4,48
SPAD	39,75**	343,32**	9,25**	3,60
A ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	52,36**	394,50**	12,36**	9,48
E ($\text{H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	8,36**	48,15**	0,62 ^{ns}	18,59
gs ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	12,91**	67,61**	1,54 ^{ns}	18,66
Ci ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$)	2,88 ^{ns}	5,65**	0,56 ^{ns}	18,28
EIC ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)	19,13**	118,65**	3,79*	18,94
EUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol H}_2\text{O}^{-1}$)	1,11 ^{ns}	6,34**	1,60 ^{ns}	21,66
EIUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol H}_2\text{O}^{-1}$)	1,76 ^{ns}	19,25**	2,77 ^{ns}	19,65

** e ^{ns} – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente, em relação ao teste F. CV – coeficiente de variação.

As cultivares apresentaram comportamentos semelhantes em relação ao número de folhas verdes, área foliar e número de perfilhos (Figura 13 a e b e 14 b). Estes comportamentos também foram semelhantes aos 30 DAT (Figura 2 a e b) e 60 DAT (Figura 7 a e b). Observou-se também uma redução ainda mais acentuada nestas variáveis nas plantas sob Ψ_s em relação às plantas sob Ψ_M (Figuras 13 a e b e 14 b) em comparação com o observado aos 60 DAT (Figura 7 a e b).

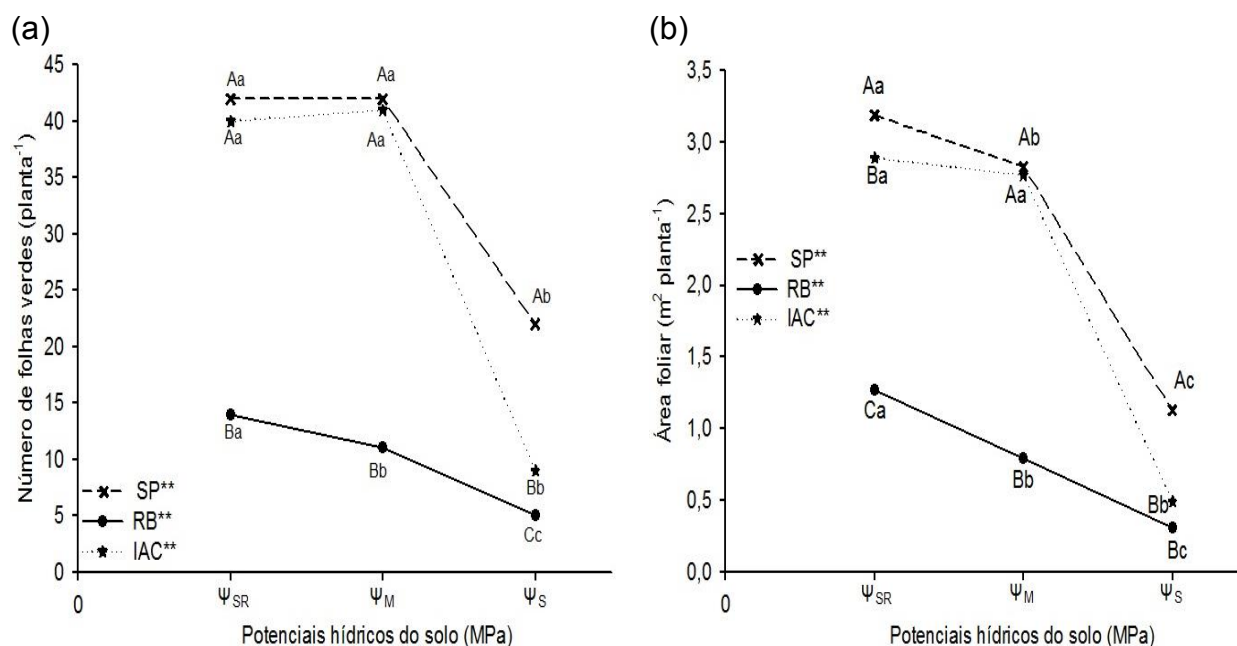


Figura 13. Número de folhas verdes (a) e área foliar (b) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

Em relação à altura da planta as cultivares não tiveram o mesmo comportamento. A cultivar RB apresentou os maiores valores nas plantas sob Ψ_{SR} e nas plantas sob Ψ_S , não se diferenciando da cultivar SP nas plantas sob Ψ_S (Figura 14 a). A cultivar IAC apresentou os menores valores nas plantas Ψ_{SR} e nas plantas sob Ψ_S (Figura 14 a).

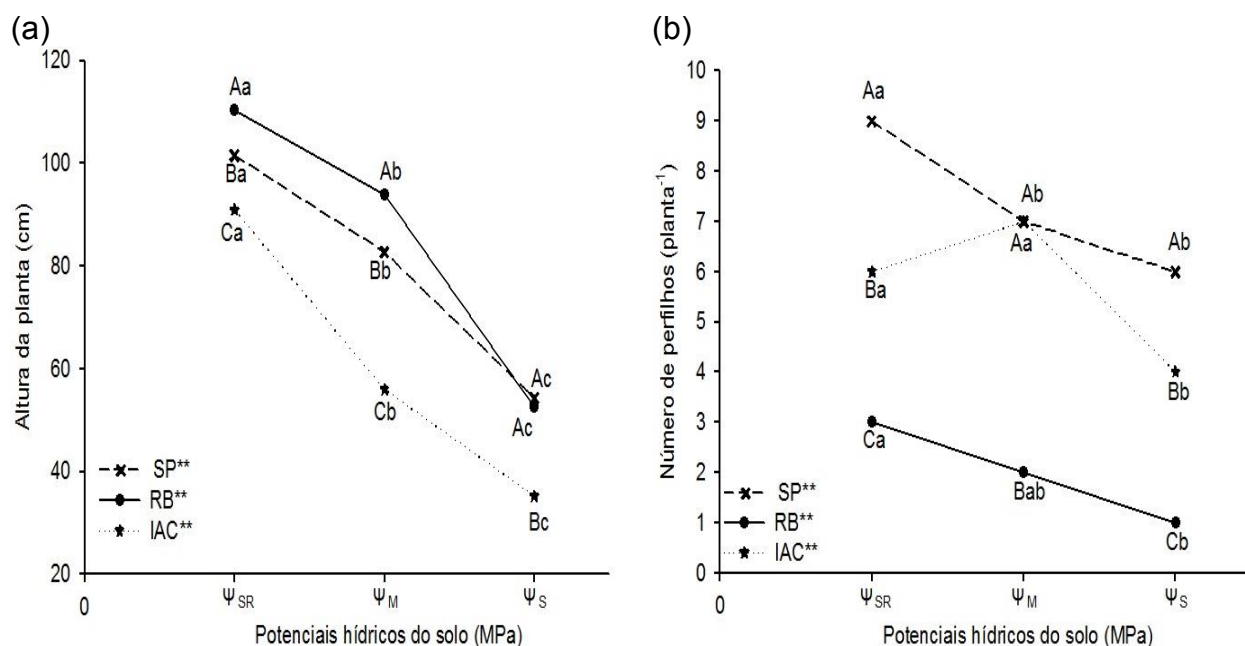


Figura 14. Altura da planta (a) e número de perfilhos (b) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

As plantas da cultivar SP apresentaram sob Ψ_S , a menor redução do teor de água nas folhas, não diferindo das plantas da cultivar IAC ($p > 0,01$) (Figura 15 a). Na cultivar RB foi observada a maior redução de água das folhas (Figura 15 a). Em índice SPAD a cultivar SP apresentou os maiores valores sob Ψ_{SR} e sob Ψ_S , não diferindo da IAC sob Ψ_{SR} (Figura 15 b).

Para fotossíntese, a cultivares SP e IAC apresentaram os maiores valores nas plantas sob Ψ_{SR} e sob Ψ_S (Figura 15 c). A cultivar RB apresentou os maiores valores sob Ψ_{SR} e valores intermediários nas plantas sob Ψ_S , não diferindo ($p > 0,01$) sob este potencial da cultivar SP (Figura 15 c).

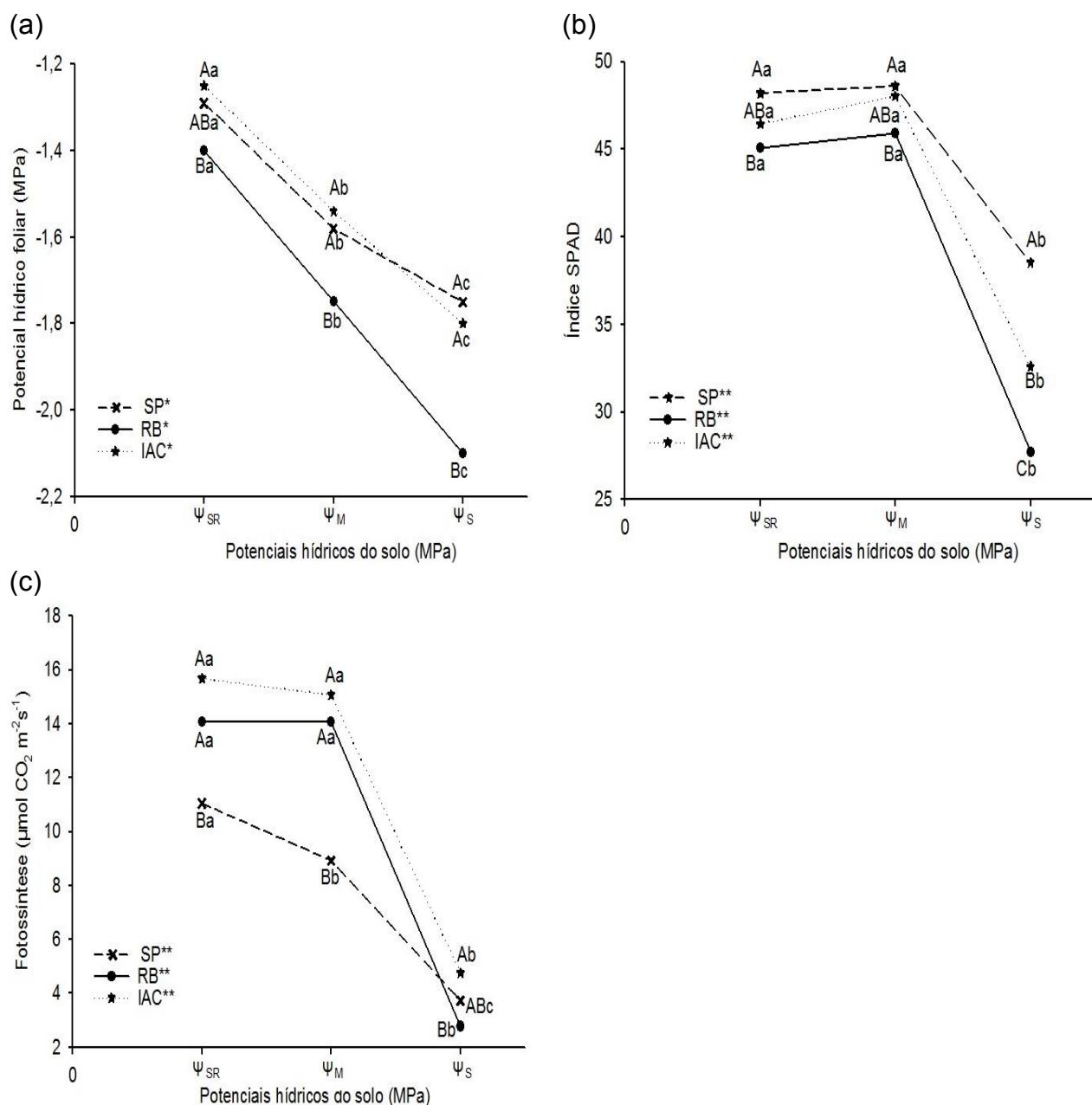


Figura 15. Potencial hídrico foliar (a), teor de clorofila (b) e fotossíntese (c) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar.** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

Para transpiração e condutância estomática foi observado efeito independente de cultivares e potenciais hídricos do solo. A transpiração foi maior

nas plantas das cultivares RB e IAC (Figura 16 a) e foi 55% menor nas plantas sob Ψ_S em relação às das plantas Ψ_{SR} (Figura 16 b).

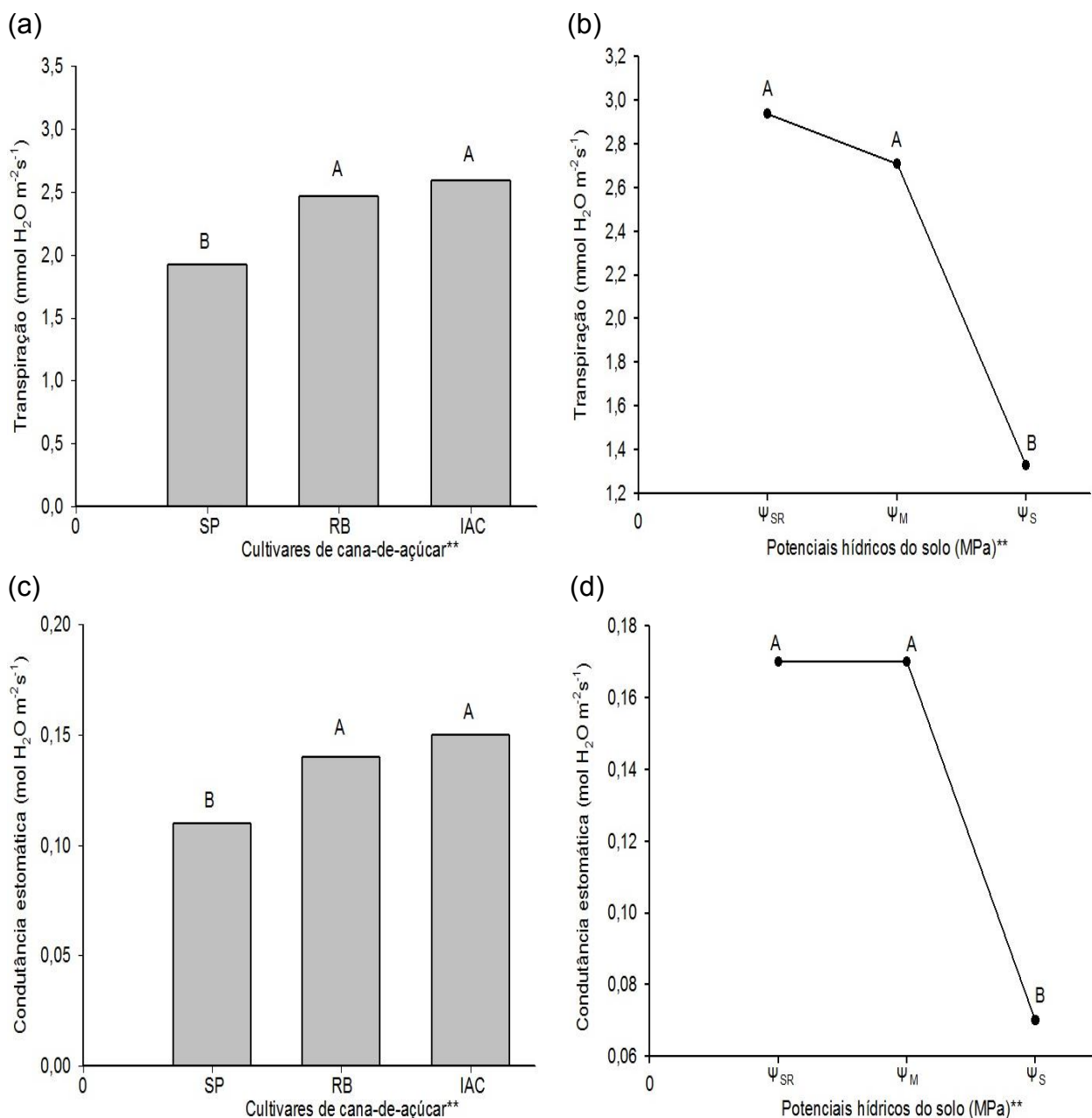


Figura 16. Transpiração de três cultivares de cana-de-açúcar (a) transpiração sob três potenciais hídricos do solo (b), condutância estomática de três cultivares de cana-de-açúcar (c) e condutância estomática sob três potenciais hídricos do solo (d) aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

A condutância estomática também foi maior nas cultivares RB e IAC (Figura 16 c). A condutância estomática foi 59% menor nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 16 d).

A concentração interna de CO_2 apresentou efeito independente para potenciais hídricos do solo e foram inversos aos das outras variáveis, sendo 20% maior nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 17 a). Nos resultados de EIC, as plantas das cultivares IAC e RB foram superiores às da SP sob Ψ_{SR} , porém sob Ψ_S as cultivares não se diferenciaram ($p>0,01$) (Figura 17 b).

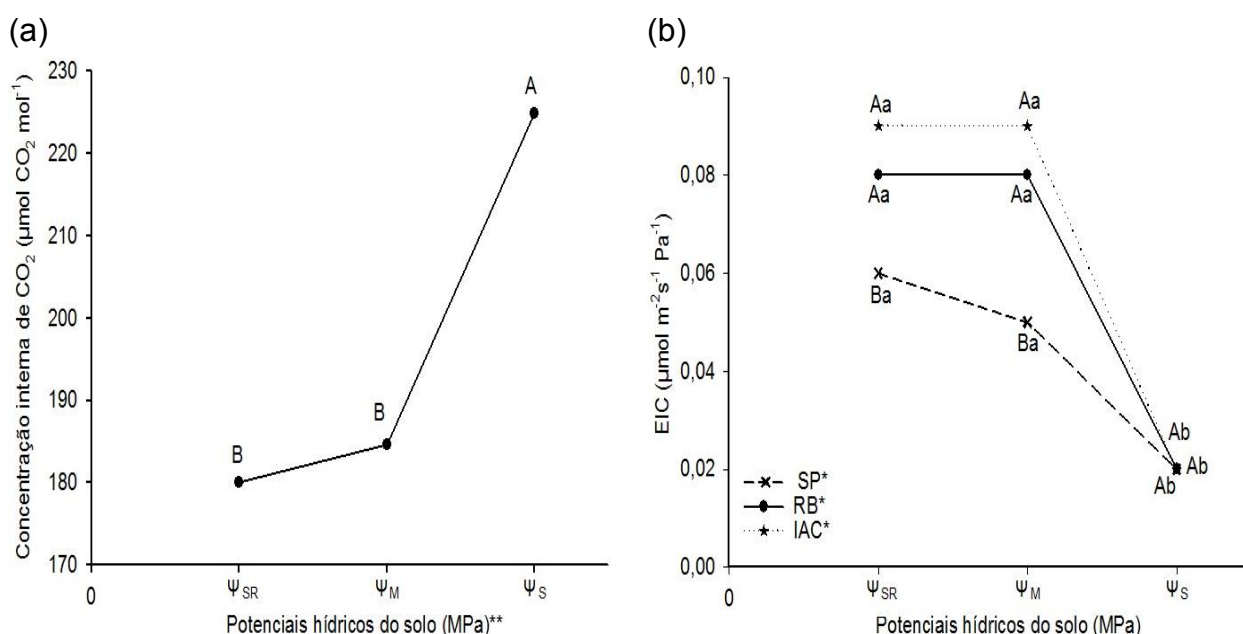


Figura 17. Concentração interna de CO_2 sob três potenciais hídricos do solo (a) e eficiência instantânea de carboxilação (EIC) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo (b) aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. * e ** – Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

Em EIUA e EUA observou-se efeito independente de potenciais hídricos do solo. Nas cultivares sob Ψ_S em relação às plantas Ψ_{SR} , a EIUA e EUA foram 26% e 38% menores, respectivamente (Figura 18 a e b).

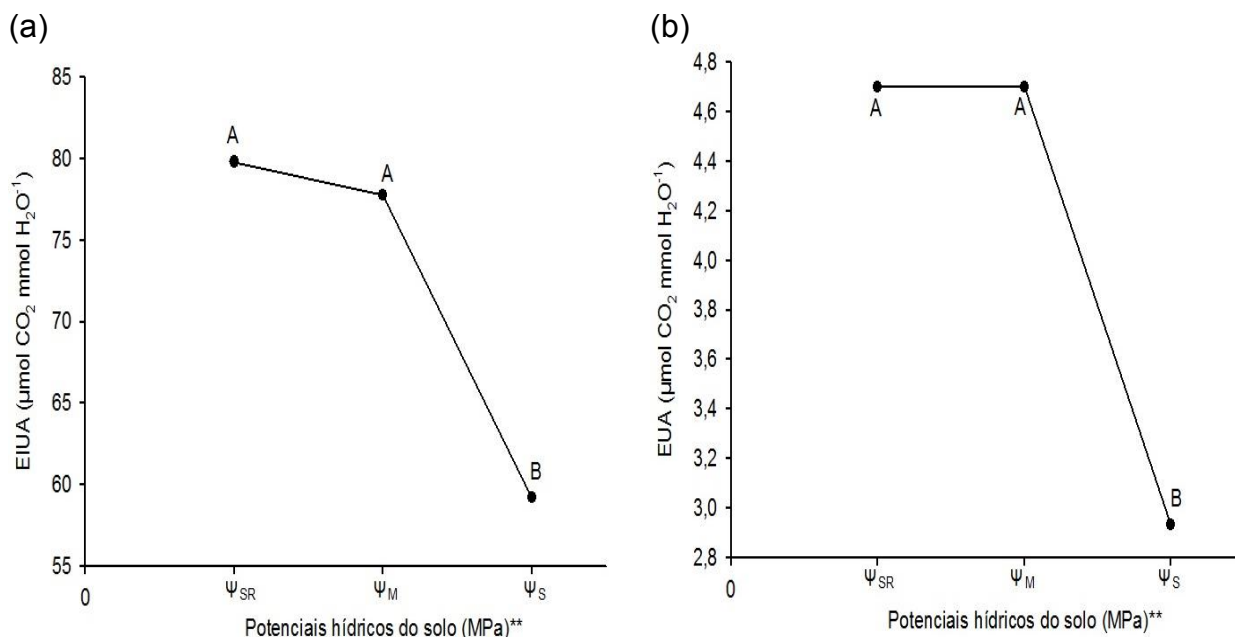


Figura 18. Eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) sob três potenciais hídricos do solo (a) e eficiência instantânea de uso da água (EUA) sob três potenciais hídricos do solo (b) aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

O número de perfilhos, número de folhas verdes, área foliar e potencial hídrico foliar se correlacionam positivamente aos 30 DAT (Tabela 4), 60 DAT (Tabela 5) e 90 DAT (Tabela 6). Aos 60 DAT (Tabela 5) estas variáveis apresentam correlação, também, com índice SPAD, fotossíntese, concentração interna de CO_2 , EIC e EUA. Com 90 DAT (Tabela 6) estas correlações aumentaram com transpiração, condutância estomática e EIUA.

O índice SPAD além de ser correlacionar com as variáveis de crescimento aos 60 DAT (Tabela 5) e 90 DAT (Tabela 6), também, se correlacionou aos 60 DAT com potencial hídrico foliar, concentração interna de CO_2 e EUA (Tabela 5). Com 90 DAT não se correlacionou apenas com concentração interna de CO_2 (Tabela 6).

Quanto às variáveis relacionadas às trocas gasosas, as correlações aos 30 DAT ocorreram para fotossíntese com transpiração, condutância estomática e EUA (Tabela 4). Com 60 DAT as correlações aumentaram entre fotossíntese com: concentração interna de CO_2 e EIC (Tabela 5). Aos 90 DAT, a fotossíntese também se correlacionou com EIUA (Tabela 6).

Assim, pelos resultados das Tabelas 4, 5 e 6 observou-se que as correlações aumentaram entre as variáveis e também os coeficientes foram maiores com o aumento dos dias em que as plantas ficaram submetidas aos potenciais hídricos do solo e épocas de avaliação, 30 DAT, 60 DAT e 90 DAT.

Tabela 4. Coeficientes de correlação de Pearson para a associação entre número de folhas verdes (NF), área foliar (AF), altura da planta (AP), número de perfilhos (NP), índice SPAD, potencial hídrico foliar (Ψ_f), transpiração (E), fotossíntese (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO_2 (Ci), eficiência instantânea de carboxilação (EIC), eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) e eficiência instantânea de uso da água (EUA) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 30 dias após a imposição dos tratamentos (DAT).

Variáveis	NF	AF	AP	SPAD	Ψ_f	E	A	gs	Ci	EIC	EIUA	EUA
30 DAT												
NP	0,81**	0,81**	-0,29	-0,06	-0,47**	0,06	0,09	-0,05	-0,14	0,10	0,23	0,05
NF		0,98**	0,21	-0,02	-0,58**	0,11	0,26	-0,04	-0,29	0,29	0,41*	0,19
AF			0,23	-0,01	-0,65**	0,11	0,29	-0,01	-0,32	0,32	0,42*	0,22
AP				0,11	-0,43**	0,10	0,61**	0,22	-0,47**	0,62**	0,48**	0,54**
SPAD					0,04	-0,20	-0,01	0,04	0,14	-0,02	-0,09	0,14
Ψ_f						-0,28	-0,67**	-0,47**	0,37*	-0,57**	-0,35*	-0,49**
E							0,38*	0,69**	-0,13	0,26	-0,29	-0,35*
A								0,65**	-0,72**	0,95**	0,50**	0,73**
gs									-0,26	0,52**	-0,32	0,18
Ci										-0,87**	-0,61**	-0,63**
EIC											0,58**	0,76**
EIUA												0,69**

* e ** – Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 5. Coeficientes de correlação de Pearson para a associação entre número de folhas verdes (NF), área foliar (AF), altura da planta (AP), número de perfilhos (NP), índice SPAD, potencial hídrico foliar (Ψ_f), transpiração (E), fotossíntese (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO_2 (Ci), eficiência instantânea de carboxilação (EIC), eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) e eficiência instantânea de uso da água (EUA) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 60 dias após a imposição dos tratamentos (DAT).

Variáveis	NF	AF	AP	SPAD	Ψ_f	E	A	gs	Ci	EIC	EIUA	EUA
60 DAT												
NP	0,87**	0,82**	0,08	0,37*	-0,69**	0,33	0,42*	0,29	-0,32	0,42*	0,22	0,38*
NF		0,98**	0,45**	0,62**	-0,85**	0,20	0,39*	0,18	-0,46**	0,45**	0,31	0,45**
AF			0,52**	0,67**	-0,89**	0,31	0,48**	0,29	-0,51**	0,53**	0,31	0,49**
AP				0,73**	-0,55**	-0,13	0,11	-0,14	-0,40*	0,20	0,33	0,34*
SPAD					0,76**	0,23	0,49**	0,28	-0,55**	0,56**	0,32	0,57**
Ψ_f						-0,40*	-0,60**	-0,42*	0,63**	-0,65**	-0,27	-0,59**
E							0,85**	0,94**	-0,44**	0,77**	-0,13	0,29
A								0,84**	-0,67**	0,97**	0,30	0,74**
gs									-0,47**	0,76**	-0,22	0,33
Ci										-0,80**	-0,25	-0,65**
EIC											0,35*	0,76**
EIUA												0,78**

* e ** – Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson para a associação entre número de folhas verdes (NF), área foliar (AF), altura da planta (AP), número de perfilhos (NP), índice SPAD, potencial hídrico foliar (Ψ_f), transpiração (E), fotossíntese (A), condutância estomática (gs), concentração interna de CO_2 (Ci), eficiência instantânea de carboxilação (EIC), eficiência intrínseca de uso da água (EIUA) e eficiência instantânea de uso da água (EUA) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos (DAT).

Variáveis	NF	AF	AP	SPAD	Ψ_f	E	A	gs	Ci	EIC	EIUA	EUA
90 DAT												
NP	0,92**	0,90**	0,21	0,63**	-0,69**	0,18	0,29	0,22	0,03	0,22	0,39*	0,42*
NF		0,98**	0,30	0,74**	-0,72**	0,37*	0,46**	0,42*	0,09	0,39*	0,39*	0,50**
AF			0,43**	0,78**	-0,79**	0,48**	0,56**	0,51**	-0,16	0,48**	0,41*	0,56**
AP				0,68**	-0,66**	0,65**	0,67**	0,61**	-0,38*	0,64**	0,38*	0,47**
SPAD					-0,78**	0,67**	0,80**	0,70**	-0,33	0,74**	0,61**	0,76**
Ψ_f						-0,64**	-0,71**	-0,64**	0,25	-0,64**	-0,53**	-0,62**
E							0,91**	0,97**	-0,40*	0,85**	0,27	0,46**
A								0,93**	-0,50**	0,96**	0,58**	0,77**
gs									-0,39*	0,86**	0,29	0,54**
Ci										-0,66**	-0,39*	-0,45**
EIC											0,59**	0,76**
EIUA												0,91**

* e ** – Significativo a 5% e 1% de probabilidade, respectivamente.

4.2. Fitomassa e avaliações nutricionais

A interação cultivares x potenciais foi significativa ($p>0,01$) para fitomassa, teores de N nas folhas e colmos, acúmulo de N, teor de P nas folhas, acúmulo de P, teores de K nas folhas e colmos e acúmulo de K (Tabela 7). Porém, o teor de P nos colmos não apresentou significância ($p>0,05$) para as fontes de variação avaliadas (Tabela 7).

Tabela 7. Resumo da análise de variância de fitomassa (MS), N nas folhas (N-FOLHAS), N nos colmos (N-COLMOS), acúmulo de N (N-ACÚMULO), P nas folhas (P-FOLHAS), P nos colmos (P-COLMOS), acúmulo de P (P-ACÚMULO), K nas folhas (K-FOLHAS), K nos colmos (K-COLMOS) e acúmulo de K (K-ACÚMULO) sob efeito de cultivares e potenciais hídricos do solo. Jaboticabal, SP, 2012.

Variáveis	Valores de F			CV(%)
	Cultivares	Potenciais	Interação	
MS (g)	45,14**	379,10**	15,80**	9,58
N-FOLHAS (g kg ⁻¹)	26,56**	40,84**	23,44**	6,74
N-COLMOS (g kg ⁻¹)	12,41**	8,47**	5,96**	11,95
N-ACÚMULO (g plantas ⁻¹)	28,65**	145,16**	11,79**	16,58
P-FOLHAS (g kg ⁻¹)	24,39**	8,13**	6,39**	10,37
P-COLMOS (g kg ⁻¹)	1,35 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,10 ^{ns}	22,48
P-ACÚMULO (g plantas ⁻¹)	45,28**	259,49**	6,72**	10,34
K-FOLHAS (g kg ⁻¹)	18,13**	30,43**	52,07**	3,29
K-COLMOS (g kg ⁻¹)	3,30 ^{ns}	105,32**	54,51**	5,56
K-ACÚMULO (g plantas ⁻¹)	28,53**	463,48**	9,90**	9,67

** e ^{ns} – Significativo a 1% de probabilidade e não significativo, respectivamente, em relação ao teste de F. CV – coeficiente de variação.

A fitomassa das plantas mantidas sob Ψ_s foi menor, 66,13 g, 53,29 g e 43,05 g, respectivamente, para SP, RB e IAC, em relação às cultivares mantidas sob Ψ_{SR} , 236,84 g, 172,68 g e 144,22 g, respectivamente, para SP, RB e IAC (Figura 19).

A cultivar SP apresentou a maior fitomassa quando as plantas estavam sob Ψ_{SR} (Figura 19). A cultivar RB apresentou fitomassa intermediária e a cultivar IAC a menor fitomassa nas plantas mantidas em Ψ_{SR} (Figura 19). Porém, nas plantas mantidas sob Ψ_S , a cultivar SP se diferenciou das demais e apresentou a maior fitomassa, não se diferenciando da cultivar RB. As plantas da cultivar IAC sob Ψ_S apresentaram a menor fitomassa não se diferenciando da RB (Figura 19).

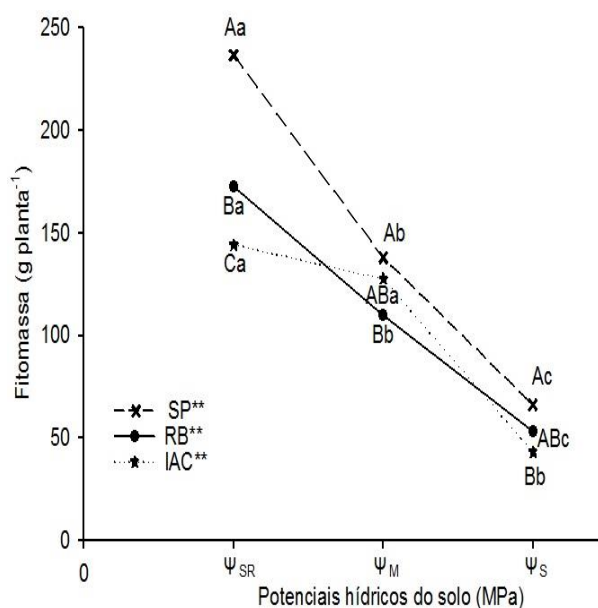


Figura 19. Fitomassa de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

Quando as plantas estavam sob Ψ_S os teores de N nas folhas e colmos diminuíram em todas as cultivares (Figura 20 a e b). Porém, as cultivares SP e IAC apresentaram os maiores teores de N nas folhas e colmos em relação à cultivar RB nas plantas cultivadas sob Ψ_S (Figura 20 a e b).

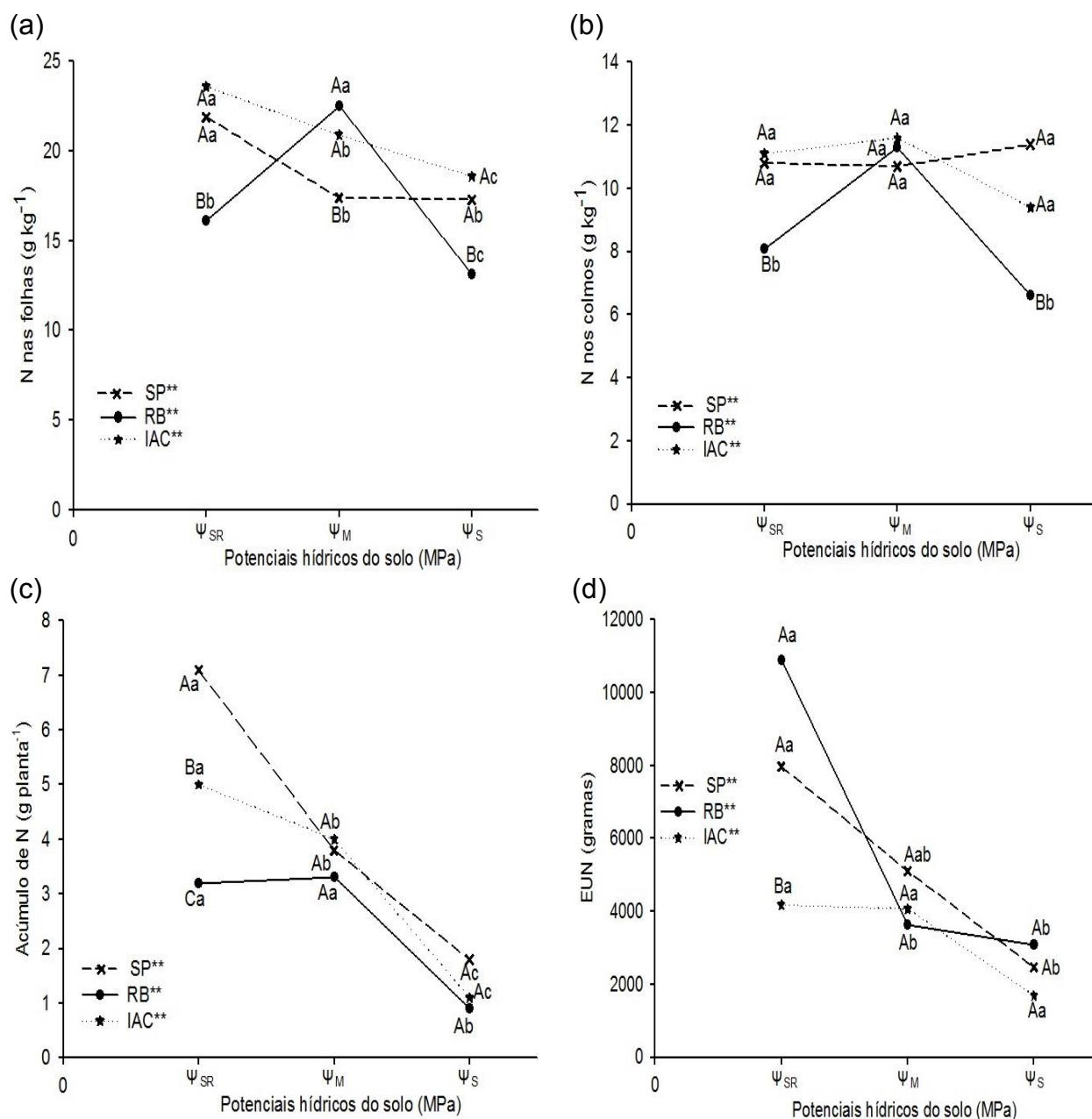


Figura 20. Teor de N na fitomassa de folhas (a) e colmos (b), acúmulo de N na parte aérea (c) e eficiência de utilização de N (EUN) (d) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

O teor de N nos colmos sofreu menor influência do potencial hídrico, em comparação com os resultados obtidos para as folhas (Figura 20 b). Entretanto, observando-se as figuras 20 a com 20 b observou-se que o comportamento dos

dados de N nos colmos das cultivares estudadas foram semelhantes ao de N nas folhas.

Nas cultivares cultivadas em Ψ_{SR} , a cultivar SP absorveu maior quantidade de N que a IAC e esta, mais que as da RB (Figura 20 c). Porém sob Ψ_S as cultivares não diferiram no acúmulo de N (Figura 20 c).

Sob Ψ_{SR} a cultivar RB apresentou a maior EUN, a cultivar SP comportamento intermediário e a cultivar IAC a menor EUN (Figura 20 d). Porém, sob Ψ_S as cultivares não apresentaram diferença ($p>0.05$) em NUE ($p>0.05$) (Figura 20 d).

As três cultivares estudadas não se diferenciaram ($p>0,01$) quanto ao teor de P nas folhas, quando cultivadas Ψ_{SR} e sob Ψ_S (Figura 21 a). Entretanto, os dados revelam claramente que o Ψ_S induz a redução de absorção de P nas folhas (Figura 21 a).

O acúmulo de P nas plantas foi menor nas plantas cultivadas sob Ψ_S (Figura 21 b). Os dados também revelaram que a cultivar SP foi a que mais acumulou P, a cultivar IAC foi a que apresentou o menor acúmulo e a cultivar RB acumulou uma quantidade de P intermediária em relação às demais quando cultivadas em Ψ_{SR} e sob Ψ_S (Figura 21 b).

As cultivares em EUP diferiram apenas sob Ψ_{SR} sendo a cultivar SP superior às cultivares RB e IAC (Figura 21 c).

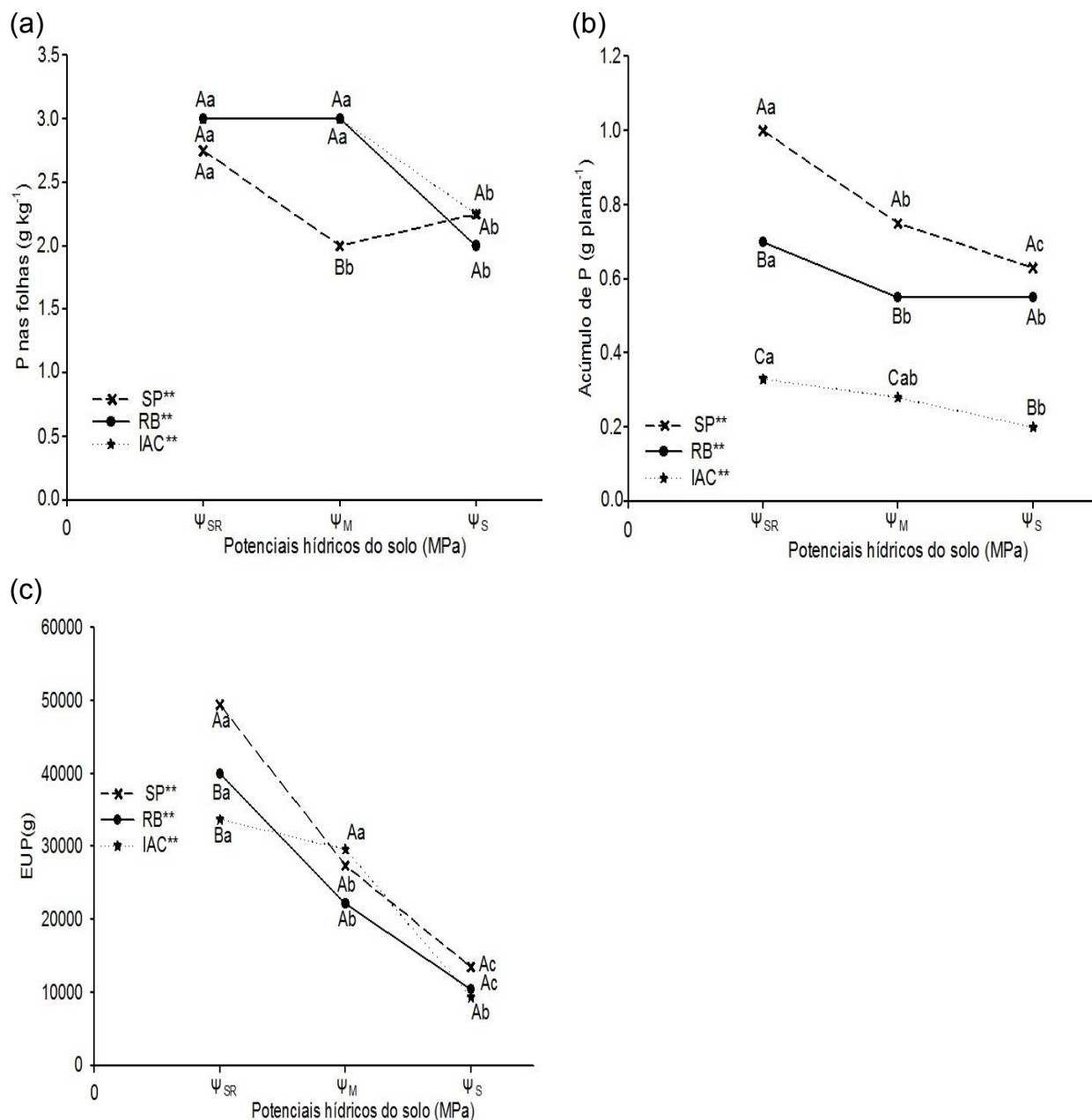


Figura 21. Teor de P na fitomassa de folhas (a), acúmulo de P na parte aérea (b) e eficiência de utilização de P (EUP) (c) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

A cultivar SP apresentou os maiores teores de K nas folhas das plantas cultivadas em Ψ_{SR} e os mesmos não variaram nas plantas sob Ψ_S , não diferindo,

porém, da cultivar RB sob Ψ_S (Figura 22 a). Ao contrário, a cultivar IAC apresentou teores de K nas folhas maiores nas plantas cultivadas sob Ψ_M e teores menores sob Ψ_S (Figura 22 a).

Nos colmos das plantas cultivadas sob Ψ_{SR} a cultivar RB apresentou os maiores teores de K (Figura 22 b). A cultivar SP valores de K nos colmos intermediários e a cultivar IAC valores de K nos colmos menores nas plantas cultivadas sob Ψ_{SR} (Figura 22 b). Quando as plantas foram cultivadas sob Ψ_S , a cultivar SP apresentou os maiores teores de K nos colmos (Figura 22 b). A cultivar RB valores de K nos colmos intermediários e cultivar IAC os menores valores de K nos colmos das plantas sob Ψ_S (Figura 22 b).

As plantas de todas as cultivares apresentaram menores acúmulos de K sob Ψ_S em relação às plantas sob Ψ_{SR} (Figura 22 c). As plantas da cultivar SP foram as que mais acumularam K, em comparação com as demais, nas plantas cultivadas sob Ψ_{SR} e sob Ψ_S (Figura 22 c). As plantas da cultivar IAC foram as que menos acumularam K nas plantas cultivadas sob Ψ_{SR} e sob Ψ_S (Figura 22 c). Por sua vez, as plantas da cultivar RB tiveram oscilação no acúmulo de K, sendo o acúmulo de K das plantas cultivadas sob Ψ_S semelhante ao das plantas sob Ψ_{SR} (Figura 22 c). A cultivar SP apresentou a maior eficiência de utilização de K (EUK) sob Ψ_{SR} em relação às cultivares RB e IAC (Figura 22 d). Mas, sob Ψ_S as cultivares não se diferenciaram ($p>0.05$) (Figura 22 d).

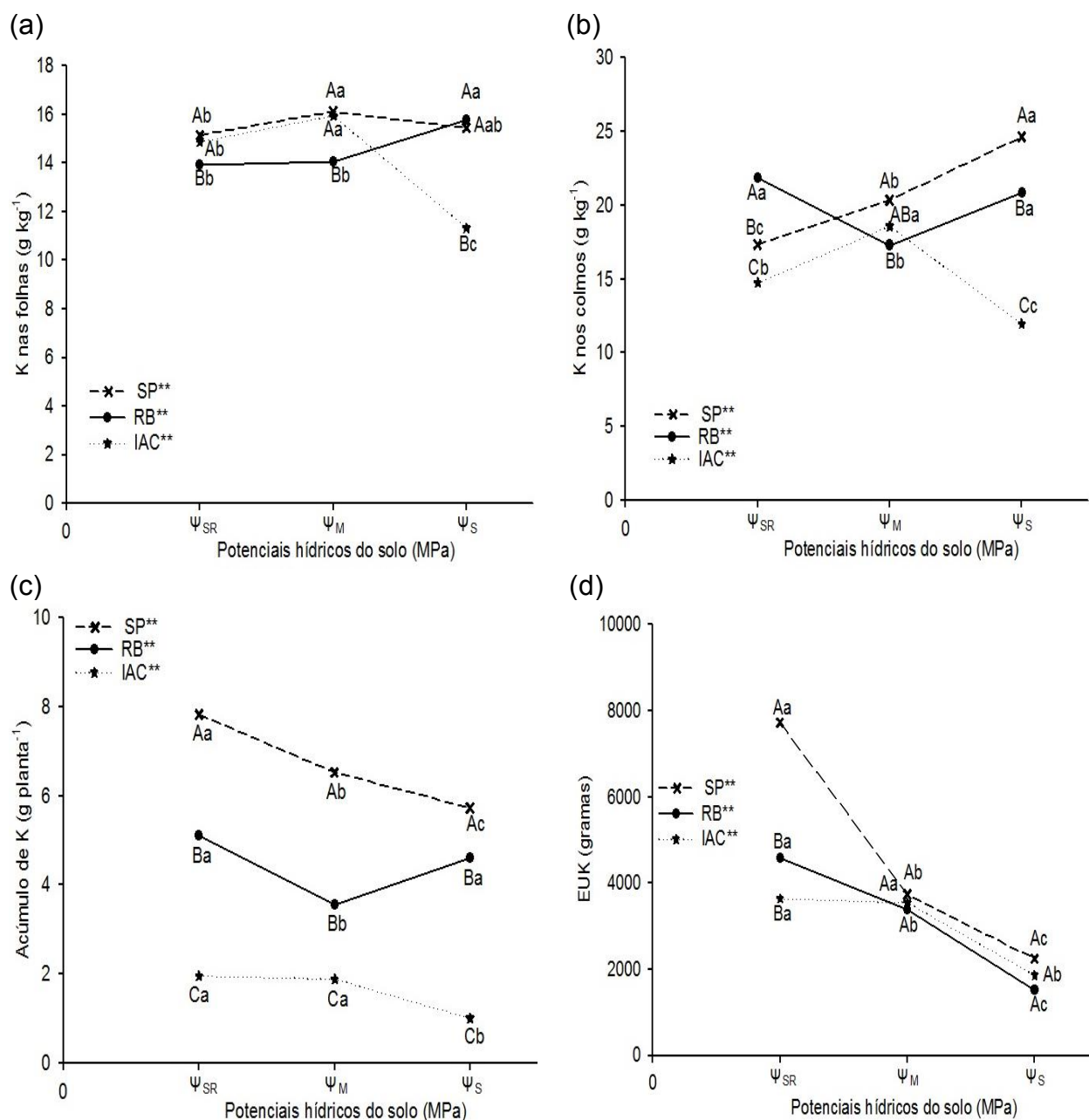


Figura 22. Teor de K na fitomassa de folhas (a) e colmos (b) e acúmulo de K na parte aérea (c) de três cultivares de cana-de-açúcar sob três potenciais hídricos do solo aos 90 dias após a imposição dos tratamentos. Letras maiúsculas comparam cultivares em um mesmo potencial hídrico do solo e letras minúsculas comparam potenciais hídricos do solo em uma mesma cultivar. ** – Significativo a 1% de probabilidade; Ψ_{SR} – potencial hídrico sem restrição; Ψ_M – potencial hídrico moderado; Ψ_S – potencial hídrico severo.

V. DISCUSSÃO

Sob potencial hídrico severo (Ψ_s) as plantas apresentaram menores número de folhas verdes (Figuras 2 a, 7 a e 13 a), área foliar (Figuras 2 b, 7 b e 13 b), altura da planta (Figuras 3 a, 8 e 14 a) e número de perfilhos (Figuras 9 b e 14 b) em comparação com as cultivadas em potencial hídrico sem restrição (Ψ_{SR}). A redução no crescimento de plantas sob Ψ_s tem sido relatada como uma estratégia para diminuir a superfície transpirante e o gasto metabólico para a manutenção dos tecidos (FARIAS et al., 2008; HOFFMANN, 2014; MACHADO et al., 2009).

Com o Ψ_s as plantas também apresentaram valores menores de potencial hídrico foliar (Figuras 4 b, 10 a e 15 a). Os resultados mostraram que a menor quantidade de água no solo refletiu em menor quantidade de água nas folhas (Figuras 4 b, 10 a e 15 a), pois o potencial hídrico foliar reflete as condições da dinâmica do processo de transporte no sistema solo-planta-atmosfera, constituindo-se no principal componente responsável pelo fluxo de água na planta (PINCELLI, 2010). Portanto, a perda de água nas folhas pode prejudicar os processos de crescimento vegetal, presumivelmente pelo prejuízo na expansão, divisão celular e fotossíntese (HOFFMANN, 2014). A menor quantidade de água apresentada nas folhas sob Ψ_s (Figuras 4 b, 10 a e 15 a) pode mesmo ter tido relação com o crescimento das cultivares, pois houve correlação positiva entre potencial hídrico foliar e as variáveis de crescimento aos 30 DAT, 60 DAT e 90 DAT (Tabelas 4, 5 e 6).

A média do índice SPAD das plantas sob Ψ_s foi 35 (Figuras 10 b e 15 b) e segundo Torres Neto et al. (2005), leituras SPAD inferiores a 40 indicam o início da deficiência de clorofila para cana-de-açúcar, o que afeta o processo fotossintético. Essa resposta está relacionada com o fato do potencial fotossintético ser diretamente proporcional à quantidade de clorofila presente no tecido foliar (SCHELEMMER et al., 2005). De fato o índice SPAD teve correlação positiva com a fotossíntese aos 60 DAT e 90 DAT (Tabelas 5 e 6).

A perda da capacidade fotossintética sob Ψ_s das plantas (Figuras 4 c, 11 a e 15 c) pode também ocorrer em decorrência de uma menor área foliar (Figuras 4 c,

11 a e 15 c), pois a fotossíntese da cultura depende diretamente da área foliar (FARIAS et al., 2008). Tendo a fotossíntese e área foliar uma correlação positiva aos 60 DAT e 90 DAT (Tabelas 5 e 6), esta pode ser a explicação da menor fotossíntese nas plantas sob Ψ_S (Figuras 4 c, 11 a e 15 c). Ainda, o decréscimo da área foliar nas plantas sob Ψ_S é uma das primeiras respostas ao déficit hídrico, podendo ser considerada uma primeira linha de defesa contra a seca; pois o déficit hídrico não só limita o tamanho de cada folha, mas também, diminui o surgimento de folhas novas e aumenta a abscisão foliar (FARIAS et al., 2008, SUN et al., 2013) e sequencialmente a fotossíntese, antes da condutância estomática.

Nas plantas sob Ψ_S a fotossíntese (Figuras 4 c, 11 a e 15 c) pode ter sido reduzida antes da redução da condutância estomática (Figuras 4 d, 11 c e 16 d) o que explica a maior concentração de CO_2 nas cultivares Ψ_S em relação às cultivares mantidas Ψ_{SR} (Figuras 11 d e 17 a). Também, Zhao et al. (2010) ao avaliarem a concentração interna de CO_2 em cana-de-açúcar submetida ao déficit hídrico, observaram aumento na C_i e consideraram este aumento às reduzidas atividades enzimáticas devido à reduzida fotossíntese. Ainda, Ashraf e Harris (2013) afirmam que o fechamento dos estômatos pode ter um efeito inibidor mais sobre a transpiração do que sobre a difusão de CO_2 nos tecidos foliares e inibir mais a base metabólica dos processos de fotossíntese e assim, consequentemente reduzir a EIC (Figuras 5 a, 12 b e 17 b).

A redução das trocas gasosas das plantas sob Ψ_S : transpiração (Figuras 11 b e 16 b), EIC (Figuras 5 a, 12 b e 17 b), EIUA (Figuras 5 b e 18 a) e EUA (Figuras 6, 12 c e 18 b) é uma resposta esperada em plantas sob déficit hídrico (FARIAS et al., 2008). Além disso, Hoffmann (2014) afirma que quando as plantas são expostas a situações de déficit hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam de modo indireto, na conservação de água no solo, como se estivessem economizando para períodos posteriores.

Segundo Ghotbi Ravandi et al. (2014) e Martínez Fernández et al. (2012) a diminuição de órgãos é uma estratégia de escape à seca e como o número de folhas verdes (Figuras 2 a, 6 a e 12 a), área foliar (Figuras 2 b, 6 b e 12 b) e número de perfilhos (Figura 13 b) foram reduzidos, este resultado indica que as cultivares utilizaram esta estratégia de escape. Porém, como a manutenção destas variáveis

de crescimento podem evitar a redução da transpiração e da fotossíntese (PINCELLI, 2010) estas variáveis são indicativos de um grau de tolerância ao déficit hídrico (SMIT; SINGELS, 2006). No presente estudo quanto ao crescimento a cultivar SP apresentou os maiores valores, a RB valores menores e a IAC valores intermediários (Figuras 2 a e b, 3 b, 7 a e b, 8, 9 a, 13 a e b, 14 a e b).

Como descrito acima nas variáveis de crescimento as cultivares parecem ter utilizado a estratégia de escape à seca, reduzindo o crescimento (GHOTBI RAVANDI et al., 2014; MARTÍNEZ FERNANDÉZ et al., 2012). Porém, em outras variáveis como: EIUA (Figura 5 b), fotossíntese (Figura 11 a), transpiração (Figura 11 b) e condutância estomática (11 c) a cultivar SP pode ter utilizado outra estratégia sob déficit hídrico, a de tolerância à seca. Nesta estratégia a cultivar SP mantém seu metabolismo, mesmo com a redução do potencial hídrico do solo (GHOTBI RAVANDI et al., 2014; MARTÍNEZ FERNANDÉZ et al., 2012; SUN et al., 2014; TARDIEU, 2005).

Para potencial hídrico foliar (Figuras 3 a, 8 c e 14 a) a cultivar SP apresentou os maiores valores em relação às cultivares RB e IAC, sendo válido destacar que o maiores valores indicam menor perda de água. Tal resultado pode ter sido obtido pelo fechamento parcial dos estômatos, reduzindo a transpiração e condutância estomática, o que evita a perda de água das folhas (MACHADO et al., 2009). Assim os resultados obtidos com potencial hídrico foliar (Figuras 3 a, 8 c e 14 a) indicam também, um resultado esperado para cultivares tolerantes.

Apesar da cultivar RB ter maior altura da planta (Figura 3 a) aos 30 DAT e de não ter se diferenciado da cultivar SP em altura da planta aos 60 e 90 DAT (Figuras 8 e 14 a), fotossíntese (Figura 4 c), EIC (Figuras 5 a e 17 b) e EIUA (Figura 5 b), esta parece que em crescimento (Figuras 2 a e b, 3 b, 7 a e b, 9 a, 13 a e b, 14 a), potencial hídrico foliar (Figuras 4 a, 10 a e 15 a), índice SPAD (Figuras 10 b e 15 b), fotossíntese (Figuras 11 a e 15 c), transpiração (Figura 11 b), condutância estomática (Figura 11 c) e EIC (Figura 12 a) ter sido afetada com maior intensidade com os dias de exposição ao déficit severo. Assim, pode-se estabelecer que esta cultivar tem um comportamento suscetível ao prolongado déficit hídrico.

Quanto a cultivar IAC esta manteve os valores sob Ψ_s em relação ao Ψ_{SR} em transpiração (Figura 11 b) e condutância estomática (Figura 11 c). Também, não

diferiu da cultivar SP em potencial hídrico foliar (Figura 4 c), fotossíntese (Figura 15 c), transpiração (Figura 16 a), condutância estomática (Figura 16 c), EIC (Figuras 5 a, 12 a e 17 b) e EIUA (Figura 5 b). Em crescimento a cultivar IAC foi inferior a SP e em algumas variáveis não diferiu da RB (Figuras 2 a e b, 3 a e b, 7 a e b, 8, 9 a, 13 a e b e 14 a e b). Como a cultivar IAC ora teve um comportamento semelhante a cultivar SP e ora da cultivar RB, esta teve um comportamento indeterminado.

Ao passar de 30 DAT para 60 DAT e 90 DAT ocorreram mais interações significativas entre cultivares x potenciais, como: número de perfilhos, potencial hídrico foliar e teor de clorofila (Tabelas 1, 2 e 3) e entre as variáveis (Tabelas 4, 5 e 6).

Aos 30 DAT as variáveis de crescimento (Figura 2) já foram influenciadas pelo Ψ_s . Estes resultados evidenciam que a primeira resposta das plantas ao déficit hídrico é a redução do crescimento (FARIAS et al., 2008). Consecutivamente, a fotossíntese foi afetada desde 30 DAT (Figura 4 a) e com o tempo de exposição das cultivares ao déficit hídrico, 60 DAT as trocas gasosas foram mais influenciadas pelo Ψ_s (Figura 11), podendo diferir nesta época um comportamento tolerante da cultivar SP e suscetível da RB.

Este resultado observado nas épocas de avaliação se deve ao fato de que o período de maior suscetibilidade da cultura ao déficit hídrico é a fase de alta demanda hídrica, que compreende os períodos de perfilhamento e de rápido crescimento e ocorre entre 50 e 150 dias após o plantio (OLIVEIRA et al., 2011; MACHADO et al., 2009). Este é o período em que as plantas apresentam grande área foliar e necessitam de maior quantidade de água para a realização de troca de gases com a atmosfera (MACHADO et al., 2009). Assim, no período de 60 DAT quando as plantas estavam com 120 dias de idade, as plantas foram mais afetadas nas trocas gasosas, onde se observa a maior diferença no grau de tolerância das cultivares (Figura 11).

Como estabelecido no objetivo do estudo de identificar as cultivares tolerantes e susceptíveis para assim determinar o comportamento dos nutrientes minerais, N, P e K, nestas cultivares pode-se estabelecer que as cultivares tiveram nas condições do estudo um comportamento tolerante, suscetível e indeterminado, respectivamente, para SP, RB e IAC.

A produção de fitomassa foi menor nas plantas mantidas sob Ψ_S em relação às sob Ψ_{SR} (Figura 19). A diminuição na fitomassa das plantas sob Ψ_S ocorreu devido a influência de processos fisiológicos e de crescimento da cana-de-açúcar, causados pela falta de água (MAHMOOD; ASHRAF; SHAHBAZ, 2009) e menores teores de N e P (Figuras 20 a e b e 21 a).

Os menores teores de N e P observados nas plantas sob Ψ_S em relação às plantas cultivadas em Ψ_{SR} (Figuras 20 a e b e 21 a) se devem ao processo de como estes nutrientes entram em contato com as raízes das plantas. Nestes processos, o N entra em contato com as raízes por fluxo de massa (BONFIM SILVA; ANICÉSIO; SILVA, 2013) e este processo depende das condições de transpiração, da concentração do nutriente na solução do solo e do teor de água no solo (NAVA, 2007). Quanto ao P seu suprimento para as raízes é efetuado principalmente pelo processo de difusão, o qual depende de umidade do solo e da superfície radicular (GAHOONIA; RAZA; NIELSEN, 1994). Por sua vez, a umidade do solo interfere diretamente no desenvolvimento radicular, influenciando direta ou indiretamente, no fornecimento de P para as plantas (MACKAY; BARBER, 1985). Portanto, tendo o potencial hídrico do solo reduzido (Ψ_S para Ψ_{SR}) os menores teores de N e P era esperado (Figura 20 a e b e 21 a). Também em outras culturas foram observados menores teores de N e P na parte aérea de plantas de canola, soja e trigo submetidas ao déficit hídrico (ASHRAF; SHAHBAZ; ALI, 2013; MAUAD; CRUSCIOL; GRASSI FILHO, 2011; MIN et al., 2012).

A maior redução na absorção de N nas folhas e colmos (Figura 20 a e b) em relação à redução na absorção de P nas folhas (Figura 21 a) pode ser devido ao processo de transpiração, pois, a taxa transpiratória é responsável pela regulação do processo de fluxo de massa, preferencialmente utilizado pelo N para entrar em contato com as raízes das plantas (BONFIM SILVA; ANICÉSIO; SILVA, 2013). Assim, os níveis de água do solo baixos reduzem a transpiração e, consequentemente, mais os teores de N do que os de P. A absorção de P não depende preferencialmente do fluxo de massa, depende mais do processo de difusão (CRUSCIOL et al., 2013). Como a taxa transpiratória foi 55% menor nas plantas sob Ψ_S em relação às sob Ψ_{SR} (Figura 16 b), esta pode ter reduzido o fluxo de massa e mais a absorção de N do que a de P (Figura 20 a e b e 21 a).

A resposta dos maiores teores de K nas folhas e nos colmos da cultivar tolerante (SP) das plantas sob Ψ_S em relação às plantas mantidas em Ψ_{SR} (Figura 22 a e b) era esperada, uma vez que a literatura explica que o K está envolvido no fechamento dos estômatos (CATUCHI et al., 2012). Assim, sob Ψ_S a cultivar tolerante (SP) pode ter acentuado os teores de K (Figura 22 a e b) para induzir o fechamento dos estômatos, reduzindo a transpiração (Figura 16 b) e assim a perda de água.

Os maiores teores de K (Figura 22 a e b) na cultivar tolerante (SP) sob Ψ_S podem ter contribuído também, para o decréscimo do potencial osmótico que resulta em aumento do potencial hídrico foliar (ANDRADE, 2011). De fato, o aumento dos teores de K (Figura 22 a e b) possivelmente influenciaram o maior potencial hídrico foliar na cultivar tolerante (Figura 15 a).

Os teores de N nas folhas e colmos sob Ψ_S também foram maiores na cultivar tolerante (SP) em relação à RB e IAC (Figura 20 a e b). As diferenças na absorção de nutrientes entre as cultivares se deve a fatores genéticos das plantas, pois as cultivares possuem diferentes enzimas carregadoras de íons, que atuam na absorção de nutrientes, com diferentes velocidades de absorção (km) para cada cultivar (COLODETE, 2013). Estes fatores genéticos influenciaram nos maiores teores de N e K na cultivar tolerante (SP) em relação às cultivares susceptível (RB) e indeterminada (IAC) (Figuras 20 a e 22 a e b) e consequentemente em maior fitomassa na cultivar tolerante (Figura 19).

Observou-se maior produção de fitomassa na cultivar tolerante (SP) em relação às cultivares susceptível (RB) e indeterminada (IAC) nas plantas mantidas sob Ψ_{SR} e sob Ψ_S (Figura 19). Sob déficit hídrico, Pincelli e Silva (2012), também obtiveram resultados semelhantes para as cultivares SP e RB para produção de fitomassa (Figura 19).

Os resultados de absorção de nutrientes (Figuras 20 a e b, 21 a e 22 a e b) e fitomassa (Figura 19) refletiram em menor acúmulo de nutrientes (Figuras 20 c, 21 b e 22 c). Porém, a cultivar tolerante (SP) mesmo quando mantida sob Ψ_S manteve maiores acúmulos de P e K em relação às cultivares RB e IAC (Figuras 21 b e 22 c).

O acúmulo de N sob Ψ_S não diferiu nas cultivares estudadas (Figura 20 c) podendo as respostas observadas estarem relacionadas a contribuição do N dos

toletes de plantio (mudas) (URQUIAGA et al., 2011) e a fixação biológica de N (SCHULTZ et al., 2012).

Estes resultados indicaram que o melhor desenvolvimento da cultivar SP em relação as outras cultivares foi devido aos maiores teores de N e K nas folhas e colmos (Figuras 20 a e b e 22 a e b) e maior acúmulo de P e K (Figuras 21 b e 22 c). A cultivar RB apresentou um crescimento intermediário entre as cultivares e isto ocorreu porque ora esta cultivar obteve maiores valores em acúmulo de P e teor de K nas folhas (Figuras 21 b e 22 a) e ora menores valores como em teor de N nas folhas e colmos (Figura 20 a e b). Quanto a cultivar IAC a menor fitomassa se deve aos menores teores de K nas folhas e colmos e menores acúmulos de P e K (Figuras 21 b e 22 a, b e c).

V. CONCLUSÕES

A análise de número de folhas verdes, área foliar, número de perfilhos, altura da planta, potencial hídrico foliar, índice SPAD, fotossíntese, transpiração, condutância estomática e eficiência instantânea de carboxilação aos 60 dias de imposição dos tratamentos podem ser usadas para diferenciar as plantas das cultivares de cana-de-açúcar quanto a sua tolerância ao déficit hídrico.

As variáveis analisadas indicam que as plantas da cultivar SP são tolerantes em até 60 dias de exposição ao déficit hídrico severo. As plantas da cultivar RB apresentam um comportamento suscetível e as da IAC não apresentam comportamento bem definido.

Não há diferença entre as plantas das cultivares no acúmulo de N, P nas folhas, eficiência de utilização de nitrogênio, eficiência de utilização de fósforo e eficiência de utilização de potássio, sob déficit hídrico severo.

Sob déficit hídrico severo as plantas da cultivar tolerante apresentam maiores teores de N e K nas folhas e colmos e maior acúmulo de P e K sob déficit hídrico severo.

As plantas da cultivar suscetível apresentam maior acúmulo de P e K nas folhas.

VI. REFERÊNCIAS

ALVIM, M.J.; BOTREL, M.A. Efeitos de doses de nitrogênio na produção de leite em pastagem de coast-cross. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.3, p.577-583, 2001.

ANDRADE, M.A.F. **Relações hídricas e crescimento de plantas jovens de café sob diferentes regimes hídricos e doses de N e K**. 2011. 55f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2011.

ANGELOCCI, L.R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera**: introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: Edição do autor. 2002. 272p.

ASHRAF, M.; HARRIS, P.J.C. Photosynthesis under stressful environments: Na overview. **Photosynthetica**, v.51, n.2, p.163-190, 2013.

ASHRAF, M.; SHAHBAZ, M.; ALI, Q. Drought-induced modulation in growth and mineral nutrients in canola (*Brassica napus* L.). **Pakistan Journal of Botany**, v.45, n.1, p.93-98, 2013.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.V.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).

BERGONCI, J.I.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; SANTOS, A.O. Potencial da água na folha como um indicador de déficit hídrico em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.8, p.1531-1540, 2000.

BOMBARDI, R.J.; CARVALHO, L.M.V. Variabilidade do regime de monções sobre o Brasil: o clima presente e projeções para um cenário com 2 x CO₂ usando o modelo MIROC. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, p.58-72, 2008.

BOMFIM SILVA, E.M.; ANICÉSIO, E.C.A.; SILVA, T.J.A. Características morfológicas de cultivares de trigo submetidas à compactação do solo. **Conhecer**, v.9, n.17, p.559-569, 2013.

CAMPBELL, W.H. Nitrate reductase and its role in nitrate assimilation in plants. **Physiologia Plantarum**, v.74, p.214-219, 1988.

CANABRAVA, A.P. **História econômica: estudos e pesquisas**. São Paulo: UNESP, 2005. 320p.

CAPONE, A.; LUI, J.J.; SILVA, T.R.; DIAS, M.A.R.; MELO, A.V. Avaliação do comportamento de quinze cultivares de cana-de-açúcar na Região Sul do Tocantins. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v.2, n.3. p.72-80, 2011.

CATUCHI, T.A.; GUIDORIZZI, F.V.C.; GUIDORIZZI, K.A.; BARBOSA, A.M.; SOUZA, G.M. Respostas fisiológicas de cultivares de soja à adubação potássica sob diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.4, p.519-527, 2012.

CHAU, S.; KIRDMANEE, C. Proline accumulation, photosynthetic abilities and growth characters of sugarcane (*Saccharum officinarum* L) plantlets in response to iso-osmotic salt and water-deficit stress. **Agricultural Sciences in China**. Beijing, v.8, n.1, p.51-58, 2009.

COLODETE, C.M. Fluxo molecular e iônico das proteínas de transporte em membranas. **Perspectivas Online: Biologia & Saúde**, v.11, n. 3, p.43-52, 2013.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Perspectivas para a agropecuária**. Safra 2014/2015. Brasília: Conab, 2014. v.2. p.55-62.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Cana-de-açúcar: Safra 2011/2012**. Acompanhamento da safra brasileira. Brasília: Conab, 2011. v.3. 20p.

CRUSCIOL, C.A.C.; NASCENTE, A.S.; MAUAD, M.; SILVA, A.C.L. Desenvolvimento radicular e aéreo, nutrição e eficiência de absorção de macronutrientes e zinco por cultivares de arroz de terras altas afetadas pela adubação fosfatada. **Semina**, v.34, n. 5, p.2061-2076, 2013.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Humberto Gonçalves dos Santos, 3.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013. 353p.

ESPOSTI, M.D.D.; SIQUEIRA, D.L.; PEREIRA, P.R.G.; VENEGAS, V.H.A.; SALOMÃO, L.C.C.; MACHADO FILHO, J.A. Assessment of nitrogenized nutrition of citrus rootstocks using chlorophyll concentrations in the leaf. **Journal of Plant Nutrition**, v.26, n.6, p.1287-1299, 2003.

FARIAS, C.H.A.; FERNANDES, P.D.; AZEVEDO, H.M.; DANTAS NETO, J. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.4, p.356-362, 2008.

FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, p.1039-1042, 2011.

FRITSCH NETO, R.; DOVALE, J.C.; CAVATTE, P.C. Melhoramento para tolerância a estresses ou para eficiência no uso de recursos? In: FRITSCH NETO, R.; BORÉM, A. (Eds.). **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde de Rio Branco: Suprema, 2011. p.29-38.

FUKAMI, J.; CEREZINI, P.; SOUZA, D.I.; PÍPOLO, A.E.; HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M.A. Teores de nutrientes e parâmetros fotossintéticos em genótipos de soja com diferentes níveis de tolerância à restrição hídrica. In: FERTBIO, 30., 2012, Maceió. **Resumos...** Maceió: SBCS, 2012. p.1-4.

GAHOONIA, T.S.; RAZA, S.; NIELSEN, N.E. Phosphorus depletion in the rizosfera as influenced by soil moisture. *Plant and Soil*, v.159, p.213-218, 1994.

GEE, G.W; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.). **Methods of soils analysis**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986, v.1, p.383-411.

GHOTBI RAVANDI, A.A.; SHAHBAZI, M; SHARIATI, M.; MULO, P. Effects of mild and severe drought stress on photosynthetic efficiency in tolerant and susceptible Barley (*Hordeum vulgare* L.) Genotypes. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.200, n.6, p.403-415, 2014.

GONÇALVES, E.R.; FERREIRA, V.M.; SILVA, J.V.; ENDRES, L.; BARBOSA, T.P.; DUARTE, W.G. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.378-386, 2010.

HAUPT, H.S.; FOCK, H.P. Exchange of oxygen and its role in energy dissipation during drought stress in tomato plants. **Physiologia Plantarum**, v.110, p.489-495, 2000.

HENDRY, G.A.F.; PRICE, A.H. Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. In: HENDRY, G.A.F.; GRIME, J.P. (Ed.). **Methods in comparative plant ecology**. London: Chapman & Hall, 1993. p.148-152.

HERMANN, E.R.; CÂMARA, G.M.S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Alcool e Subprodutos**, v.17, p.32-34, 1999.

HERNANDÉZ, F.B.T.; GOMES, D.R.; VANZELA, L.S. Características químicas do solo sob condições irrigadas e de sequeiro na cultura da acerola. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 15., 2005, Teresina. **Resumos...** Teresina: CNID, 2005. p.1-6.

HOFFMANN, C.M. Adaptive responses of *Beta Vulgaris* L. and *Cichorium Intybus* L. and leaf forms to drought stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.200, p.108-118, 2014.

HOFFMANN, H.P.; SANTOS, E.G.D.; BASSINELLO, A.I.; VIEIRA, M.A.S. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. Araras: Editora UFSCAR, 2008. 30p.

HOLANDA, L.A. **Resposta varietal da cana-de-açúcar à deficiência hídrica, durante o desenvolvimento inicial em um Latossolo Vermelho distrófico**. 2012. 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2012.

INMAM BAMBER, N.G.; SMITH, D.M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v.92, n.2, p.185-202, 2005.

INMAM BAMBER, N.G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v.89, n.1, p.107-122, 2004.

INMAM BAMBER, N.G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. **Field Crops Research**, v.36, p.41-51, 1994.

JONES, H.G. **Plant and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology**. 2.ed. Cambridge: University Press, 1992. 429p.

KLAR, S.R. Transpiração. In: KLAR, S.R. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo: Nobel, 1984. p.347-385.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: Klute A (Ed.). **Methods of soil analysis**. **Agronomy**, p.635-662, 1986.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos Avançados**, v.24, n.68, p.223-253, 2010.

KRAMER, P.J. Drought, stress, and the origin of adaptations. In: TURNER, N.C.; KRAMER, J.P. (Ed.). **Adaptation of plants to water and high temperature stress**. New York: Wiley, 1980. p.7-20.

LACERDA, C.F. **Relações solo-água-planta em ambientes naturais e agrícolas do nordeste brasileiro**. Recife, 2007. 79p. (Apostila).

LANDELL, M.G.A.; CAMPANA, M.P.; FIGUEIREDO, P.; XAVIER, M.A.; VASCONCELOS, A.C.M; BIDOIA, M.A.P.; SILVA, D.N.; ANJOS, I.A.; PRADO, H.; PINYI, L.R.; SOUZA, S.C.D; SCARPARI, M.S.; ROSA, V.E.; MIRANDA, L.L.D.; AZANIA, C.A.M. **Boletim Técnico: Variedades de cana-de-açúcar para o centro sul do Brasil**. Campinas: IAC. 2007. (Boletim Técnico IAC 201).

LAWLOR, D.W. Photosynthesis, productivity and environment. **Journal of Experimental Botany**, v.46, p.1449-1461, 1995.

LU, D.; ZHANG, J. Effects of water stress on photosystem II photochemistry and its thermostability in wheat plants. **Journal of Experimental Botany**, v.50, n.336, p.1199-1206, 1999.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.

MACKAY, A.D.; BARBER, S. Soil moisture effect on root growth and phosphorus uptake by corn. **Agronomy Journal**, v.77, p.519-523, 1985.

MAHMOOD, T.; ASHRAF, M.; SHAHBAZ, M. Does exogenous application of glycinebetaine as a pre-sowing seed treatment improve growth and regulate some key physiological attributes in wheat plants grown under water deficit conditions? **Pakistan Journal of Botany**, v.41, n.3, p.1291-1302, 2009.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: colheitas econômicas e máximas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1993. 210p.

MANSUR, R.J.C.N.; BARBOSA, D.C.A. Comportamento fisiológico em plantas jovens de quatro espécies lenhosas da caatinga submetidas a dois ciclos de estresse hídrico. **Phyton**, n.68, p.97-106, 2000.

MARENCO, R.A.; GONÇALVES, J.F.C.; VIEIRA, G. Leaf gas exchange and carbohydrates in tropical trees differing in successional status in two light environments in Central Amazonia. **Tree Physiology**, v.21, n.18, p.1311-1318, 2001.

MARIN, F.R; NASSIF, D.S.P. Mudanças climáticas e a cana-de-açúcar no Brasil: fisiologia, conjuntura e cenário futuro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.232-239, 2013.

MARIN, F.R. **Variedades**. Agência Embrapa Informação Tecnológica. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar.html>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

MARTÍNEZ FERNÁNDEZ, D.; WALKER, D.J.; ROMERO, P.; MARTÍNEZ BALLESTA, M.C.; CORREAL, E. The response of the leguminous fodder plant *Bituminaria bituminosa* to water stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.198, p.442-451, 2012.

MAUAD, M.; CRUSCIOL, C.A.C.; GRASSI FILHO, H. Produção de massa seca e nutrição de cultivares de arroz de terras altas sob condições de déficit hídrico e adubação silicatada. **Semina: Ciências Agrárias**, v.32, n.3, p.939-948, 2011.

MIN, S.; GAO, Z.Q.; YANG, Z.P.; HE, L.H. Absorption and accumulation characteristics of nitrogen in different wheat cultivars under irrigated and dryland conditions. **Australian Journal of Crop Science**, v.6, n.4, p.613-617, 2012.

MONTEIRO, F.C. **Produtividade de matéria seca, estrutura e composição químico-bromatológica de estilosantes Campo Grande sob diferentes teores de água no solo**. 2009. 56f. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2009.

NAVA, G. **Nutrição e rendimento da macieira em resposta às adubações nitrogenada e potássica e ao déficit hídrico**. 2007. 113f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Escola Superior "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2007.

NOODÉN, L.D.; GUIAMET, J.J.; JOHN, I. Senescence mechanism. **Physiology Plant**, v.101, p.746-753, 1997.

NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Nutrição Mineral do Eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Eds.). **Relação solo eucalipto**. Viçosa: Folha de Viçosa, 1990. p.25-91.

OLIVEIRA, E.C.A.; FREIRE, F.J.; OLIVEIRA, A.C.; SIMÕES NETO, D.E.; ROCHA, A.T.; CARVALHO, L.A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.6, p.617-625, 2011.

PIMENTEL, C. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. Seropédica: EDUR, 1998. 150p.

PINCELLI, R.P. **Tolerância à deficiência hídrica em cultivares de cana-de-açúcar avaliada por meio de variáveis morfofisiológicas**. 2010. 65f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2010.

PINCELLI, R.P.; SILVA, M.A. Alterações morfológicas foliares em cultivares de cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. **Bioscience Journal**, v.28, n.4 p.546-556, 2012.

PRADO, R.M. **Nutrição de plantas**. São Paulo: Editora Unesp, 2008. 407p.

PRISCO, J.T. Possibilidades de exploração de lavouras xerófilas no semi-árido brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.21, n.4, p.333-342, 1986.

RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade do solo**. Campinas: Instituto Agrônomo. 285p., 2001.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy & Crop Science**, v.185, p.83-89, 2000.

RÊGO, G.M.; POSSAMAI, E. **Avaliação dos teores de clorofila no crescimento de mudas de Jequitibá- Rosa (*Cariniana legalis*)**. Colombo: Embrapa, 2004. (Comunicado Técnico, 128).

RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroenergético. **Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar**. Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro: Curitiba, 2010.

SANDOVAL, S.S.; GENÔ, K.C.A. Comportamento e controle da *Diatraea saccharalis* na cultura da cana-de-açúcar. **Nucleus**, v.7, n.1, p.243-258, 2010.

SANDRAS, V.O.; MILROY, S.P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: a review. **Field Crop Research**, v.47, p.253-266, 1996.

SASSAKI, R.M.; MACHADO, E.C. Trocas gasosas e condutância estomática em duas espécies de trigo em diferentes teores de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.9, p.1571-1579, 1999.

SAUSEN, T.L. **Respostas fisiológicas de *Ricinus communis* à redução na disponibilidade de água no solo**. 2007. 61f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SCHLEMMER, M.R.; FRANCIS, D.D.; SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. **Agronomy Journal**, v.97, p.106-112, 2005.

SCHULTZ, N.; MORAIS, R.F.; SILVA, J.A.; BATPTISTA, R.B.; OLIVEIRA, R.P.; LEITE, J.M.; PEREIRA, W.; CARNEIRO JÚNIOR, J.B.; ALVES, B.J.R.; BALDANI, J.I.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S.; REIS, V.M. Avaliação agronômica de variedades de cana-de-açúcar inoculadas com bactérias diazotróficas e adubadas com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, n.2, p.261-268, 2012.

SHAFI UR, R.; HARRIS, J.P.C.; ASHRAF, M. Stress environments and their impact to crop production. In: ASHRAF, M.; HARRIS, P.J.C. 2005. **Abiotic stress**: plant resistance through breeding and molecular approaches. New York: Food Products Press. 725p.

SILVA, M.A.; SANTOS, C.M.; ARANTES, M.T.; BRUNELLI, M.C.; HOLANDA, L.A. Respostas fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica e a reidratação. **Revista Caatinga**, v.26, n.3, p.28-35, 2013.

SILVA, P.A.D. **Estudo do fenômeno de barreira capilar: modelagem numérica e experimentação física**. 186f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte , 2011.

SILVA, D.K.T.; DAROS, E.; ZAMBON, J.L.C; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFFELLATO RIBAS, K.C.; KOEHLER, H.S.; OLIVEIRA, R.A. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana-soca no nordeste do Paraná na safra de 2002/2003. **Scientia Agraria**, v.6, n.1, p.47-53, 2005.

SILVEIRA, J.A.G.; VIÉGAS, R.A.; ROCHA, I.M.A.; MOREIRA, A.C.O.M. MOREIRA, R.A. Proline accumulation and glutamine synthetase activity increased by salt-induced proetolysis in cashew leaves. **Journal of Plant Physiology**, v.160, p.115-123, 2003.

SIMÕES NETO, D.E. Variedades de cana-de-açúcar no estado de Pernambuco contribuição do melhoramento clássico da Ridesa-UFRPE. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica**, v.5-6, p.125,146, 2008-2009.

SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R.A.; PERDOMO, R.E.; SHINE JÚNIOR, J.M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf área development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, p.171-178, 2004.

SINHA, S.K.; NICHOLAS, D.J.D. Nitrate Reductase. In: PALEG, L.G.; ASPINALL, D. (Ed.). **The physiology and biochemistry of drought resistance in plants**. Academic Press, p.145-168, 1981.

SMITH, M.A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, v.98, p.91-97, 2006.

SODEK, L. Metabolismo do nitrogênio. In: KERBAUY, G.B. (Ed.). **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan, 2004, p.94-113.

SOUZA, R.P.; RIBEIRO, R.V.; MACHADO, E.C.; OLIVEIRA, R.F.; SILVEIRA, J.A.G. Photosynthetic responses of Young cashew plants to varying environmental conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.735-744, 2005.

SUN, Y.; LIU, F.; BENDEVIS, M.; SHABALA, S.; JACOBSEN, S.E. Sensitivity of two Quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) varieties to progressive drought stress. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.200, p.12-23, 2013.

SYSTAT SOFTWARE. **SigmaStat**: advisory statistics for scientists, version 1, San Jose, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

TARDIEU, F. Plant tolerance to water déficit: physical limits and possibilities for progress. **Comptes Rendus Geoscience**, Paris, v.337, n.1, p.57-67, 2005.

TASSO JÚNIOR, L.C.; SILVA NET, H.F.; MARQUES, M.O.; CAMILOTTI, F. Desempenho de cultivares de cana-de-açúcar nas condições de cana-planta de ano e meio (safra 2008/2009). **Ciência e Tecnologia**, v.2, n.1, p.14-26, 2011.

TAVARES, A.C.S. **Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) ao excesso de água no solo**. 2009, 220f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

TEZARA, W.; MITCHELL, V.J.; DRISCOLL, S.D.;LAWLOR, D.W. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling fator and ATP. **Nature**, v.401, p.914-917, 1999.

TORRES NETO, A.; CAMPOS TRINI, E.; OLIVEIRA, J.G.; BRESSAN SMITH, R.E. Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. **Scientia Horticulturae**, v.104, n.2, p.199-209.

URQUIAGA, S.; XAVIER, R.P.; MORAIS, R.F.; BATISTA, R.B.; SCHULTZ, N.; LEITE, J.M. SÁ, J.M.; BARBOSA, K.P.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M. Evidence from field nitrogen balance and ¹⁵N natural abundance data of the contribution of biological N₂ fixation to Brazilian sugarcane varieties. **Plant and Soil**, v.1, 2011.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J.C. Sugarcane response to water-deficit stress during early growth on organic and sand soils. **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v.5, n.3, 2010.