

MECANISMOS DE TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇUCAR

Paula Caroline Silva Moura¹; Daniel Philipe Veloso Leal²; Tiara Moraes Guimarães¹; Fernanda Pacheco de Almeida Prado Bortolheiro¹ e Cláudio Hideo Martins da Costa¹

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Ciências Agrônômica. Departamento de Produção Vegetal. Fazenda Experimental Lageado - Caixa Postal 237, Rua José Barbosa de Barros, n°. 1780, Botucatu, SP. CEP: 18610-307. E-mail: paulacarol4@yahoo.com.br, tiguimaraes@hotmail.com, ferborto@yahoo.com.br, c_hideo@hotmail.com. ²Universidade de São Paulo – USP. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ – Av. Pádua Dias, n° 11, Piracicaba, SP. CEP: 13418-900. E-mail: daniel.pvelosoleal@yahoo.com.br.

RESUMO: A cana-de-açúcar é uma das principais culturas de exploração agrícola no Brasil por possibilitar ampla utilização em vários setores, por exemplo para a extração de sacarose, bagaço e/ou palha que são utilizados para a produção de açúcar, etanol e outros compostos energéticos. Outra característica que a torna importante no cenário agrícola, é a sua ampla adaptabilidade a diversas condições de cultivo, o que garante produção com manejos simples, mas que tende a aumentar na medida em que se melhora o nível de manejo adotado ao longo de todo o ciclo. Vários fatores interferem na produção e maturação da cultura da cana-de-açúcar, sendo os principais a disponibilidade de água, temperatura, luz e nutrientes, além do manejo da cultura e da variedade plantada. Dentre os fatores citados, o déficit hídrico é considerado como uma das principais causas da redução da produtividade nos canaviais e tal cultura desenvolve mecanismos de adaptação responsáveis pela plasticidade e adaptabilidade nas regiões produtoras. Nesta revisão de literatura, será abordado estes mecanismos, bem com a resposta de sua ativação ao longo do ciclo da cultura.

PALAVRAS-CHAVE: Adaptabilidade, plasticidade, respostas fisiológicas

TOLERANCE MECHANISMS TO WATER STRESS IN SUGARCANE

ABSTRACT: The sugarcane is an important crop farm in Brazil by allowing wide use in various sectors, eg for sucrose extraction, bagasse and / or straw are used for the production of sugar, ethanol and other compounds energy. Another feature that is important in the agricultural setting, is its broad adaptability to various cultivation conditions, which ensures simple production managements, but tends to increase as it improves the handling level used throughout the cycle. Several factors influence the production and maturation of the culture of sugarcane, the main water availability, temperature, light and nutrients, and the management of culture and planted variety. Among the aforementioned factors, drought is considered a major cause of reduced productivity in the cane fields and such a culture develops coping mechanisms responsible for plasticity and adaptability in the producing regions. In this review, we shall discuss these mechanisms, as well as the response of activation during the crop cycle.

KEY WORDS: Adaptability, plasticity, physiological responses

INTRODUÇÃO

A Cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, cultivada desde a época da colonização. A produção total na safra 2014/15 é estimada em 659,10 milhões de toneladas, com uma área plantada de 9.098,03 hectares, distribuídas entre os estados produtores. O Estado de São Paulo permanece como o maior produtor com 51,43% (4.678,8 mil hectares) da área plantada e destaca-se como um polo produtivo da Cana-de-açúcar (Conab, 2014).

A importância desta cultura pode ser atribuída à sua elevada capacidade de adaptação a diversos ambientes edafoclimáticos e, principalmente, à sua múltipla utilização. Dentre as diversas formas de emprego, a cana-de-açúcar pode ser usada in natura, como forragem para alimentação animal, como matéria-prima para fabricação de alimentos, fármacos, bebidas alcoólicas e combustíveis. A importância deste último item vem crescendo em todo o mundo devido à demanda por fontes alternativas de energia e, até mesmo, pelo esgotamento de recursos naturais não-renováveis como o petróleo e o carvão mineral (Silva, 2007).

A expansão das áreas cultivadas com cana-de-açúcar está ocorrendo em regiões onde a atividade canavieira não era comum. Os critérios para a ocupação dessas áreas vêm sendo a topografia plana para favorecer a mecanização e o baixo custo da terra, principalmente nas áreas de pastagens degradadas (Arantes, 2012). Em determinadas regiões de expansão, o déficit hídrico ocasionado pela irregularidade das chuvas, é caracterizado como um problema, pois em determinados estádios fenológicos da cultura, como a brotação e o perfilhamento, a restrição hídrica pode ocasionar prejuízos quanto ao desenvolvimento e a produtividade do canavial. A falta de regularidade com relação à precipitação preocupa os produtores de cana-de-açúcar, isso porque em algumas regiões de produção a disponibilidade de áreas para a uma nova expansão é escassa e isso demanda que novas formas de manejo sejam adotadas para que a produtividade venha aumentar cada vez mais (Oliveira et al., 2010).

A análise das condições das áreas de expansão canavieiras indica a necessidade de variedades desenvolvidas para o ambiente de produção que é encontrado no Cerrado, ou seja, variedades mais tolerantes à seca, para que o período de longa estiagem não seja prejudicial ao desenvolvimento e produtividade do canavial. Existe uma carência de informações sólidas do desenvolvimento da cultura nas principais áreas de expansão, pois a maioria das técnicas de manejo empregadas advém da região Sudeste.

O déficit hídrico é uma das principais causas da redução da produtividade nos canaviais, dessa forma é identificada a demanda de pesquisas para entender claramente os

mecanismos de respostas da cultura a esse tipo de estresse (Simit e Singels, 2006). Análises de características morfológicas e fisiológicas são ferramentas para verificar a resposta de diferentes variedades a irrigação plena e ao déficit hídrico, e dessa forma, é possível identificar e caracterizar determinados genótipos com relação à tolerância ou a sensibilidade à seca e a responsividade a irrigação.

Os mecanismos de adaptação da cana-de-açúcar, para suportar os períodos de menor disponibilidade hídrica são responsáveis pela plasticidade e adaptabilidade desta cultura nas regiões produtoras. Nesta revisão de literatura, será abordado estes mecanismos, bem com a resposta de sua ativação ao longo do ciclo da cultura.

IMPORTÂNCIA DO SETOR SUCROALCOLEIRO NO CENÁRIO BRASILEIRO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas de exploração agrícola, principalmente no Brasil por possibilitar a sua utilização em vários setores, uma vez que se utiliza á para a extração de sacarose, bagaço e/ou palha que são utilizados para a produção de açúcar, etanol e outros compostos energéticos. Outra característica que a torna importante no cenário agrícola, é a sua ampla adaptabilidade a diversas condições de cultivo, o que garante produção com manejos simples, mas que tende a aumentar na medida em que se melhora o nível de manejo adotado ao longo de todo o ciclo. Segundo o portal Nova Cana (2014) a cana-de-açúcar, dentre as culturas com passível extração de sacarose, tem o mais alto retorno para os agricultores por hectare plantado. O custo de produção do açúcar no país é baixo (inferior a US\$ 200/toneladas), podendo dessa maneira competir no mercado internacional.

Segundo a Conab (2014), em seu segundo levantamento anual, para a safra 2014/2015, a área cultivada com cana-de-açúcar será de aproximadamente 9.098,03 mil hectares, distribuídas em todos estados produtores, a citar, São Paulo como o maior produtor com 51,43% (4.678,8 mil hectares), seguido por Goiás com 9,85% (896,06 mil hectares), Minas Gerais com 8,8% (800,91 mil hectares), Mato Grosso do Sul com 7,63% (693,77 mil hectares), Paraná com 7,07% (642,98 mil hectares), Alagoas com 4,41% (401,34 mil hectares) e Pernambuco com 2,89% (263,03 mil hectares). Estes sete estados são responsáveis por 92,07% da produção nacional (Conab, 2014).

Ainda segundo a Conab (2014) o Brasil terá um acréscimo em área plantada estimado em 286,6 mil hectares na temporada 2014/15, equivalendo a 3,3%, em relação à safra 2013/14. São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Paraná e Minas Gerais foram os estados com maior acréscimo de áreas, com 126,73 mil hectares, 77,67 mil hectares, 39,27 mil hectares,

56,58 mil hectares e 21,08 mil hectares, respectivamente. Este crescimento ocorreu, principalmente, devido à expansão de novas áreas de plantio das novas usinas em funcionamento.

A produção total de cana-de-açúcar moída na safra 2014/15 é estimada em 659,10 milhões de toneladas, a produção de açúcar em 38,25 milhões de toneladas e a produção de etanol total em 27,62 bilhões de litros (Conab, 2014).

Outro aspecto importante a ser citado, é a utilização em combustíveis, em automóveis flex ou adicionados a gasolina. Esta forma de utilização incentiva a cadeia produtiva e é uma medida de sustentabilidade ambiental, sendo alternativa a utilização de combustíveis fósseis.

O Programa Nacional do Álcool ou *Proálcool* foi criado em 14 de novembro de 1975 pelo decreto nº 76.593, com o objetivo de estimular a produção do álcool, visando o atendimento das necessidades do mercado interno e externo e da política de combustíveis automotivos. De acordo com o decreto, a produção do álcool oriundo da cana-de-açúcar, da mandioca ou de qualquer outro insumo deveria ser incentivada por meio da expansão da oferta de matérias-primas, com especial ênfase no aumento da produção agrícola, da modernização e ampliação das destilarias existentes e da instalação de novas unidades produtoras, anexas a usinas ou autônomas, e de unidades armazenadoras (Nova Cana, 2014).

CARACTERÍSTICAS MORFOFISIOLÓGICAS DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene, da família *Poaceae*, com metabolismo fotossintético C4 que possui um grande armazenamento de sacarose nos tecidos dos colmos, tornando-a de extrema importância comercial (Tejera et al., 2007), nas lavouras canavieiras é cultivado um híbrido interespecífico que recebe a denominação *Saccharum* spp. (Ripolli et al., 2007).

Os estádios fenológicos da cana-de-açúcar podem ser separados em brotação e emergência, perfilhamento, crescimento dos colmos e maturação dos colmos (Gascho e Shih, 1983). A brotação e emergência se iniciam quando o broto rompe as folhas da gema e se desenvolve rumo à superfície do solo e de forma simultânea a esse processo surgem as raízes do tolete. A emergência do broto ocorre de 20 a 30 dias após o plantio (DAP) e trata-se de um caule em miniatura que surge acima da superfície do solo e também é denominado de colmo primário (Gascho e Shih, 1983; Barbosa, 2010).

O perfilhamento é o processo de emissão de colmos por uma mesma planta e esses são denominados perfilhos. Esse processo é regulado por hormônios e resulta no crescimento dos

brotos que vão em direção à superfície do solo e estes emergem de 20 a 30 dias após a emergência do colmo primário. É por meio desse processo de perfilhamento que é formada a touceira da cana e o perfilhamento máximo ocorre quando se observa total cobertura do solo pelas folhas dos colmos, fase na qual cada touceira possui o máximo de perfilhos.

O crescimento dos colmos ocorre a partir do máximo perfilhamento e este é estimulado pela luz, umidade e temperaturas mais elevadas. Os colmos que prosseguem o desenvolvimento, a partir do estágio em que é observado o máximo perfilhamento, continuam crescendo, desenvolvem-se em altura e iniciam o acúmulo de açúcar na base do colmo. Nessa fase, o crescimento do sistema radicular torna-se mais intenso tanto na superfície quanto nas camadas mais profundas do solo e também é nessa fase em que as folhas mais velhas começam a ficar amareladas e secam.

A maturação da cana-de-açúcar inicia-se junto com o crescimento intenso dos colmos, sobreviventes do perfilhamento da touceira, sendo que o excesso de açúcar permanece armazenado na base de cada colmo. Quando as touceiras atingem altura igual ou superior a dois metros, é possível observar amarelecimento e consequente seca das folhas que se encontram na altura mediana da planta, indicando que está sendo depositado açúcar nessa região.

O plantio da cana-de-açúcar é feito em duas épocas, dando origem à cana-planta de ano (12 meses) ou à cana-planta de ano e meio (18 meses) (Sugawara e Rudorff, 2011; Miranda, 2008), mas após o primeiro corte o ciclo de ambas é anual e ela recebe a denominação de cana soca (Barbosa, 2010). A cana de ano (12 meses), plantada em setembro-outubro, tem seu desenvolvimento máximo de novembro a abril, apresentando redução deste em determinados períodos, devido às condições climáticas adversas de inverno no Centro-Sul como a menor disponibilidade hídrica, baixas temperaturas e menores intensidades de radiação (Rodrigues, 1995).

A cana de ano e meio (18 meses), plantada de janeiro ao início de abril, apresenta taxa de crescimento mínimo, e em algumas situações extremas o desenvolvimento da cultura pode ser nulo. Essa queda expressiva do desenvolvimento da cultura é ocasionada pelo período de inverno na região Centro-Sul, em que as condições climáticas não são favoráveis. A fase de desenvolvimento mais acentuada da cana de ano e meio inicia-se com a retomada das precipitações regulares, aumento da intensidade luminosa e também da temperatura, e ocorre de outubro a abril, com pico de crescimento entre dezembro e abril (Rodrigues, 1995).

Vários fatores interferem na produção e maturação da cultura da cana-de-açúcar, sendo os principais a temperatura, luz, disponibilidade de água e nutrientes, além do manejo da cultura e da variedade plantada (Cesar et al., 1987). O período entre o outono e o inverno, em que ocorre a diminuição das chuvas e temperaturas mais baixas, existe maior atividade de maturação e menor atividade de crescimento, sendo que há intenso armazenamento de açúcar. O momento da colheita é definido em função da variedade, época de colheita, duração do ciclo, manejo da maturação e condições climáticas (Gascho e Shih, 1983; Barbosa, 2010).

A cana-de-açúcar é colhida de forma escalonada, conforme os diferentes estágios de maturação das variedades, o que permite uma melhor logística na colheita das áreas, que são bastante extensas (Miranda, 2008). A colheita do canavial é realizada anualmente e o aumento do número dos estágios de corte ocasiona uma perda gradativa de produtividade, quando a lavoura não for viável economicamente, com relação aos custos da colheita e o rendimento do canavial, a área é reformada com o plantio de novas mudas (Sugawara e Rudorff, 2011).

As características de cada genótipo é que determinam o número de colmos por planta, assim como a estatura e o diâmetro dos colmos, o comprimento e a largura das folhas, arquitetura da parte aérea, sendo que a expressão desses caracteres é muito influenciada pelo clima, pelo manejo e pelas práticas culturais utilizadas. As características das variedades determinam a eficiência fotossintética da cana-de-açúcar, além da influência das variações climáticas que prevalecem durante todo o desenvolvimento (Rodrigues, 1995; Barbosa, 2010). A disponibilidade de água e a temperatura são fatores que afetam muito o crescimento da cultura (Barbosa, 2010).

A demanda hídrica da cana-de-açúcar varia de acordo com os diferentes estágios fenológicos da cultura (Gava et al., 2011), ela também é influenciada pelas condições ambientais, manejo agrícola, período de plantio e variedade plantada; normalmente a demanda hídrica da cultura é reduzida com a sucessão dos ciclos de cultivo (Silva et al., 2012).

A cana-de-açúcar é uma cultura adaptada aos climas tropical e subtropical, e demanda um grande volume de água no seu sistema de produção, principalmente quando se encontra em pleno desenvolvimento vegetativo, sendo que a produção de biomassa pela cultura é bastante expressiva (Tejera et al., 2007), desde que o suprimento de água seja adequado a cultura (Silva et al., 2012).

A DEFICIÊNCIA HÍDRICA EM PLANTAS

A água é o principal constituinte vegetal, totalizando cerca de 90% da massa de matéria verde. Além disso, de todos os recursos de que a planta necessita para crescer e funcionar, a água é o mais abundante e, ao mesmo tempo, o mais limitante para produtividade agrícola, uma vez que constitui a matriz e o meio onde ocorre a maioria dos processos bioquímicos essenciais à vida (Taiz e Zeiger, 2004).

A disponibilidade hídrica tem sido a maior força seletiva na evolução das espécies. Assim, a habilidade para lidar com o déficit hídrico é um importante determinante na distribuição natural das plantas e na produtividade das culturas agrícolas. É continuamente perdida para atmosfera pelo processo de evapotranspiração e absorvida do solo pelas raízes, de forma que quando a perda decorrente da evapotranspiração excede a absorção pelas raízes, a planta entra em déficit hídrico. Devido à perda contínua de água para a atmosfera, as plantas raramente estão com plena hidratação (Taiz e Zeiger, 2004).

Em situações em que o déficit hídrico é leve, a redução na fotossíntese é ocasionada pelo aumento da resistência à difusão do CO₂ pelos estômatos e mesófilo (Beauclair et al., 2006). O aumento da resistência ocorre devido ao fechamento estomático, em resposta ao declínio no potencial de água na folha, ou à redução no teor de água no solo (Smit e Singels, 2006), ou até mesmo à elevada demanda atmosférica (Souza et al., 2005). Essa resposta é esperada em plantas submetidas ao déficit e é considerada uma das primeiras estratégias para impedir a desidratação excessiva das folhas (Beauclair et al., 2006).

Ainda de acordo com a via fotossintética, ocorrem diferenças no que diz respeito ao controle estomático de plantas submetidas ao estresse hídrico. Nessas condições, as plantas C4 são mais eficientes em economizar água, devido ao seu maior controle estomático, quando comparadas a plantas C3. Braga (2014), avaliando os efeitos da seca em genótipos de milho, cujo metabolismo fotossintético é do tipo C4, observou que já no início do estresse houve redução na condutância estomática, mesmo antes de haver qualquer mudança no potencial de água na folha. Segundo Arantes (2012), em casos de estresse leve a moderado, o fechamento estomático pode ser o indicador mais sensível do estresse que a perda no turgor.

Em condições mais severas de estresse hídrico, a redução da fotossíntese pode ser mais controlada pela eficiência dos cloroplastos em fixar CO₂ do que pelo aumento da resistência à difusão (Tavares et al., 2003).

Nesses casos, a taxa fotossintética é reduzida predominantemente por limitações ditas não estomáticas ou metabólicas (Souza et al., 2011), tais como a inibição da divisão celular e síntese de proteínas (Taiz e Zeiger, 2004).

Existe grande variabilidade no que diz respeito à tolerância ao déficit hídrico entre as espécies e, mesmo dentro de uma mesma espécie, entre variedades. Além disso, o estágio fenológico em que ocorre o estresse é crítico para a produtividade agrícola (Machado et al., 2009). Em plantas de milho, submetidas à seca, em diferentes fases de desenvolvimento, ocorre redução de mais de 60% na taxa fotossintética se a falta de água ocorrer na fase de pendoamento (Barros, 2010).

A velocidade de imposição do estresse hídrico às plantas é importante no que diz respeito aos seus efeitos no metabolismo vegetal. Quando ocorre rapidamente, os mecanismos morfofisiológicos são severamente afetados. Entretanto, quando o déficit hídrico é estabelecido gradualmente, ocorrem adaptações na planta, principalmente se ocorrer no início do ciclo. Redução no crescimento, diminuição no tamanho das folhas e senescência foliar são algumas das respostas das plantas que lhes conferem adaptação a essa condição, uma vez que são mecanismos que diminuem a perda de água para atmosfera (Tavares et al., 2010)

Nessas condições, mecanismos fisiológicos, como o ajuste osmótico, constituem uma estratégia adaptativa do vegetal aos múltiplos efeitos causados pelo estresse hídrico (Chaves et al., 2009). Neste mecanismo, há acúmulo de solutos nas células que mantém alta pressão de turgor e permitem a continuidade da expansão celular, apesar do declínio causado no potencial de água na folha, além de preservar a integridade celular de proteínas, enzimas e membranas (Taiz e Zeiger, 2004).

Parte das mudanças observadas na fotossíntese, em condições de estresse hídrico, pode ser atribuída aos efeitos secundários resultantes da superposição de outros estresses ambientais, dos quais a deficiência nutricional é frequente em regiões sujeitas à falta d'água, uma vez que o déficit hídrico afeta a absorção e assimilação de nutrientes, sendo que a última, por sua vez, afeta a fotossíntese (Pimentel, 1998).

ESTRESSE HÍDRICO POR DEFICIÊNCIA EM CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é considerada uma cultura adaptada, capaz de produzir biomassa em regiões tropicais, uma vez que as plantas possuem um controle estomático que possibilita maior economia de água e nitrogênio, recursos limitantes da produtividade das culturas nessas regiões.

Entretanto, para que a cultura expresse seu máximo potencial produtivo, depende de condições ambientais favoráveis, dentre as quais, destaca-se a disponibilidade de água durante o ciclo (Pincelli, 2010).

Nas diversas regiões do mundo onde a cana-de-açúcar é cultivada, principalmente nos trópicos, este é o fator que mais limita a produtividade, sobretudo onde o cultivo não é irrigado (Inman-Bamber e Smith, 2005). Nessas condições, períodos de déficit hídrico podem ocorrer durante todo o ciclo, mas seus efeitos sobre a produtividade variam em função da fase do ciclo fenológico da cultura, características varietais e intensidade do estresse (Silva et al., 2008).

Durante seu crescimento, a cana-de-açúcar passa por quatro estágios fenológicos distintos, denominados germinação, perfilhamento, intenso crescimento e maturação (Pincelli, 2010). A fase de perfilhamento, juntamente com a de intenso crescimento, conhecida como a fase de formação, tem sido identificada como a mais crítica no que diz respeito à demanda hídrica (Machado et al., 2009). Isso ocorre, principalmente, porque nessa fase são produzidos 70-80% de toda a biomassa acumulada durante o ciclo da cultura (Oliveira et al., 2010). Inman-Bamber (2004) relatou reduções na fitomassa da planta, da ordem de 35%, após a ocorrência de estresse nessa fase. Os efeitos da deficiência hídrica, durante o período de formação, foram citados por Pincelli (2010), que observaram reduções na condutância estomática, taxa de fotossíntese, número e tamanho dos perfilhos e acúmulo de biomassa.

Decréscimos na condutância estomática, transpiração e assimilação de CO₂ também foram constatados por Machado et al. (2009) na fase de máximo crescimento. Corrêa et al. (2010), avaliando a influência do estresse hídrico nas trocas gasosas da cana-de-açúcar durante a fase inicial de crescimento vegetativo, observaram que a taxa de assimilação líquida de CO₂ foi fortemente afetada. Pincelli (2010) afirma que a redução das trocas gasosas na cana-de-açúcar é influenciada, principalmente, pela diminuição da condutância estomática.

Dentre os processos afetados pelo déficit hídrico, o crescimento foliar da cana-de-açúcar é um dos mais sensíveis. Este processo é altamente dependente das relações de água na planta, de forma que já são observadas reduções da expansão foliar sob valores de potencial de água na folha abaixo de -0,2 MPa e praticamente não ocorre o crescimento quando os valores alcançam -0,7 MPa (Inman-Bamber e Jager, 1986).

Reduções no crescimento foliar foram observadas por Smit e Singels (2006), em condições de estresse hídrico, o que segundo os autores também promoveu aceleração da senescência das folhas velhas, causando diminuição significativa no Índice de Área Foliar (IAF). Beauclair (2006) relatam a redução no aparecimento de folhas verdes e aumento da senescência foliar, após um período de 40 dias de estresse, o que resultou em decréscimo do IAF de seis para dois. Souza et al. (2005) verificaram reduções de até 59% no IAF, devido a

ocorrência de estresse hídrico em plantas de cana-de-açúcar, e ainda decréscimo de cerca de 69% na biomassa de folhas verdes e aumento de 137% na biomassa de folhas mortas.

Algumas variedades de cana-de-açúcar, sob condições de estresse hídrico, enrolam as folhas para diminuir a superfície transpirante, que juntamente com a senescência foliar e redução na taxa de aparecimento foliar contribuem para redução do uso da água, e são considerados mecanismos de defesa da planta (Machado et al., 2009). À medida que a água torna-se limitante, reduções no aparecimento de novos perfilhos também são observadas. Souza et al. (2005) relatam diminuição na formação de perfilhos da ordem de 33 e 37% em dois anos consecutivos, decorrentes da imposição do estresse hídrico. Smit e Singels (2006) constataram decréscimo de 8,05 e 4,44 brotos m^{-2} , aos 40 dias após imposição do estresse, em cultivares consideradas suscetíveis e tolerantes à seca, respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2008), que observaram o efeito negativo do estresse hídrico no perfilhamento de variedades de cana-de-açúcar. Segundo Silva et al. (2008), a habilidade de perfilhamento nesta fase e a subsequente eficiência no crescimento determinam o rendimento de uma cultivar e são características favoráveis que podem ser utilizadas na seleção de genótipos tolerantes à deficiência hídrica. Associada à produção da cana-de-açúcar, tem-se que a dinâmica de crescimento dos colmos é outra variável que apresenta correlação positiva com o rendimento final da cultura, sendo significativamente afetada em condições de seca (Silva et al., 2008)

Silva et al. (2008) verificaram que tanto o tamanho como o peso dos colmos apresentam correlações positivas com a produtividade, que foi afetada pelo regime hídrico, cujas respostas foram variáveis em função do genótipo. Entretanto, os autores não observaram correlações da produtividade com o diâmetro do colmo em condições de déficit hídrico moderado, afirmando que, nessas condições, foram observados elevados valores de diâmetros, porém a produtividade foi reduzida devido ao menor tamanho dos colmos.

Quando submetida à falta de água, os fotoassimilados, que seriam requeridos para expansão foliar e do caule em condições adequadas de disponibilidade de água, são desviados para serem armazenados no caule. Assim, se esse estresse ocorre na fase de maturação, o rendimento de sacarose é aumentado. Esse fenômeno tem sido explorado por alguns produtores, que frequentemente submetem a cana-de-açúcar a estresse hídrico nessa fase, na tentativa de aumentar o conteúdo de sacarose no caule após a fase de formação (Inman-Bamber e Smith, 2005).

MECANISMOS DE TOLERÂNCIA AO ESTRESSE HÍDRICO POR DEFICIÊNCIA EM CANA-DE-AÇÚCAR

Análises biométricas da parte aérea da cana-de-açúcar permitem inferir a influência de fatores abióticos (adubação, irrigação, data de início e tipo do ciclo, clima, solo, variedade) e de fatores bióticos (doenças, pragas, entre outros) no rendimento final da cultura (Silva, 2012). A avaliação de algumas variáveis morfológicas como altura e diâmetro dos colmos, plantas m⁻¹ linear, área foliar e produtividade torna possível a identificação da capacidade produtiva de diferentes variedades (Sugawara e Rudorff, 2011).

A identificação das prováveis variações no desenvolvimento da cultura, que ocorrem durante o ciclo, é fundamental para que se possa modelar e quantificar o crescimento da cana-de-açúcar em diferentes ambientes de produção (Oliveira et al., 2010). A avaliação do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar permite identificar as fases de desenvolvimento da cultura nos diferentes ambientes de cultivo, proporcionando sua condução de forma que o máximo desenvolvimento coincida com os períodos de maior disponibilidade hídrica e radiação solar, o que leva a cultura a expressar todo seu potencial genético, além de permitir manejar diferentes formas de adubação e tratos culturais (Oliveira et al., 2010).

A cana-de-açúcar é uma cultura que perfilha de forma muito intensa na fase inicial do desenvolvimento, e com o passar do tempo, é possível observar o autossombreamento da cultura e este provoca alguns efeitos, induzindo a inibição do perfilhamento e a aceleração do desenvolvimento do colmo principal e dessa forma o crescimento em altura é contínuo até a ocorrência de alguma limitação no suprimento de água, ocorrência de temperaturas baixas ou ainda devido ao florescimento (Rodrigues, 1995).

O período de exposição à seca afeta de forma negativa o crescimento da parte aérea, principalmente o número de folhas verdes, devido à progressão da senescência foliar, o que pode ocasionar uma menor interceptação da radiação solar e conseqüente redução na eficiência de uso da água e na fotossíntese. Devido à menor interceptação da radiação solar, ocorre um aumento da radiação transmitida pelo solo (Inman-Bamber, 2004), além disso, a deficiência hídrica também pode ocasionar a inibição do surgimento de novas folhas. O grau de ocorrência dessas alterações é decorrente da intensidade do estresse hídrico e dependente do genótipo (Machado et al., 2009).

Segundo Inman-Bamber e Smith (2005), durante o período de estresse hídrico as folhas emergentes tendem a ficar acumuladas no cartucho da planta, isso porque o desenvolvimento é impedido pelo baixo potencial de água na planta e no solo. Quando o

adequado regime hídrico é retomado, essas folhas passam a se desenvolver de forma normal, sendo que após sete dias da retomada do suprimento hídrico adequado, as folhas da planta apresentam desenvolvimento parecido com o de plantas que não estavam sob nenhum tipo de estresse. O acúmulo das folhas no cartucho permite uma recuperação rápida e a retomada da expansão foliar quando o estresse é reduzido.

A redução do número de colmos e a formação de internódios menores são alterações morfológicas que podem ser observadas quando a cana-de-açúcar é submetida ao déficit hídrico (Pincelli, 2010). O diâmetro dos colmos também pode ser influenciado pelo regime hídrico que a planta está submetida, mas tal característica também depende da variedade plantada e do ciclo da mesma (Silva et al., 2008).

O peso e o crescimento dos colmos são afetados de forma muito intensa e negativa quando a cana-de-açúcar é submetida a condições de estresse hídrico (Silva et al., 2008), pois o crescimento das plantas é resultado da divisão e do alongamento celular e o estresse hídrico reduz diretamente o crescimento das plantas, diminuindo a assimilação de CO₂ e reduzindo a divisão e o alongamento celular (Pugnaire et al., 1993).

A formação da parte aérea da cultura desempenha papel muito importante no seu rendimento, interceptando a radiação solar, influenciando, sobretudo, nos processos fotossintéticos e de transpiração da cultura, além de evitar o aparecimento de ervas daninhas, sendo, portanto, fator crucial do rendimento da cultura (Barbosa, 2010). Além das avaliações biométricas, as análises fisiológicas podem auxiliar no processo de caracterização de uma variedade (Gava et al., 2001).

O metabolismo fotossintético da cana-de-açúcar é C₄, e por isso ela é considerada altamente eficiente na conversão de energia radiante em energia química, com taxas fotossintéticas calculadas em 100 mg de CO₂ fixado dm⁻² de área foliar por hora, mas essa intensa atividade fotossintética, não se correlaciona diretamente com a elevada produtividade de biomassa sendo que as características das variedades influenciam a eficiência fotossintética da cana-de-açúcar, além das condições climáticas que também são determinantes (Rodrigues, 1995).

As plantas expostas ao déficit hídrico alteram seu metabolismo, pela ativação de diferentes mecanismos de tolerância para se adaptarem a esse tipo de estresse, sendo que qualquer diminuição na disponibilidade de água pode afetar de forma imediata o crescimento das plantas, provocando efeitos em diversos processos fisiológicos da planta.

O déficit hídrico reduz de forma drástica a capacidade fotossintética da cana-de-açúcar, e afeta diversos processos fisiológicos. As respostas fisiológicas ao estresse hídrico ocorrem de forma rápida, e nesse processo de mudanças metabólicas, ocorre o fechamento dos estômatos, que gera uma série de alterações, como a redução do suprimento de CO₂ para a fotossíntese, aumentando a resistência difusiva ao vapor de água, reduzindo a transpiração, o que afeta a dissipação da energia térmica e o transporte de nutrientes por fluxo de massa, entre outros (Barros, 2010), e vários desses efeitos refletem nos mecanismos de adaptação das plantas ao ambiente (Barbosa, 2010).

Entre os fatores ambientais que mais influenciam na conversão de energia em açúcar na cultura da cana-de-açúcar pode-se citar a energia solar; a concentração de CO₂; a temperatura; a disponibilidade de água e de nutrientes (Gava et al., 2010; Oliveira et al., 2012). A conversão de energia solar em energia à base de carbono implica em perda de água, e esta é consideravelmente maior que o ganho de C. Em base molar, o gradiente de difusão do vapor de água para a atmosfera é mais intenso do que o gradiente de CO₂ da atmosfera para a folha (Pugnaire et al., 1993).

Existem algumas mudanças nos processos fisiológicos e na estrutura da planta em resposta ao estresse hídrico, como a mudança de seu comportamento na abertura e fechamento dos estômatos, menor volume celular, redução da área foliar, aumento da espessura foliar, folhas com a presença de tricomas, aumento do sistema radicular em área de alcance e em profundidade, além de muitas mudanças na produção e atividade de enzimas e hormônios (Pugnaire et al., 1993).

Respostas ao estresse hídrico como a aclimatação incluem o ajustamento do potencial osmótico pela acumulação de solutos, mudanças na elasticidade da parede celular e mudanças morfológicas. As respostas em longo prazo e adaptações à seca incluem mudanças morfológicas específicas, características geneticamente fixadas e sofisticados mecanismos fisiológicos (Pugnaire et al., 1993).

O fechamento dos estômatos, apesar de ser uma maneira eficaz de evitar a desidratação, pode reduzir a fotossíntese abaixo do ponto de compensação, especialmente em ambientes mais secos e pode ser por esse motivo que é ocasionado um desequilíbrio, porque ocorre a redução da taxa de transpiração e a fotoinibição (Pugnaire et al., 1993).

As adaptações metabólicas ao estresse hídrico podem explicar como as plantas, com diferentes formas de realizar a fotossíntese, diferem com relação à sensibilidade a umidade da atmosfera e ao gradiente resultante da pressão de vapor de água da folha para o ar e essas

adaptações estão associadas aos mecanismos que a planta possui para evitar a desidratação (Pugnaire et al., 1993).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

São diversos os mecanismos adaptativos desenvolvidos e ativados em situações estressantes pela cana-de-açúcar. De forma geral, esses mecanismos tratam de respostas metabólicas, fisiológicas e anatômicas que denotam alterações no ambiente externo, alteram as rotas bioquímicas e possibilitam que a planta sobreviva nesta situação. É cabível que em momentos em que o ambiente não apresenta as condições ideais, não se observe incrementos em biomassa ou produtividade, no entanto, pode haver a rustificação vegetal e a maior tolerância aos déficits ambientais.

REFERÊNCIAS

ARANTES, M. T. **Potencial de cultivares de cana-de-açúcar sob os manejos irrigado e sequeiro**. 2012. 65f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, UNESP, Botucatu, 2012.

BARBOSA, F. S. **Resistência á seca em cana-de-açúcar para diferentes níveis de disponibilidade hídrica no solo**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, ESALQ, Piracicaba, 2010.

BARROS, F.F.; MILAN, M. Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v.69, n.1, p.221-229, 2010.

BEAUCLAIR, E.G.F.; SCARPARI, M.S.; Noções fitotécnicas. In. RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, N.Y.; **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Barros e Marques Editoração Eletrônica, 2006.

BRAGA, G.N.M. **Preparo Profundo do Solo Beneficia a Cana-de-Açúcar**. Disponível em <<http://agronomiacomgismonti.blogspot.com.br/2012/04/preparo-profundo-do-solo-beneficia-cana.html>> Acesso em 24/05/15.

CESAR, M. A. A.; DELGADO, A. A.; CAMARGO, A. P. de; BISSOLI, B. M.; SILVA, F. C. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais em elevar o teor de fósforo no caldo de cana -de -açúcar (cana-planta), visando o processo industrial. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.6, p.32-38, 1987.

CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, Oxford, v.103, p.551-560, 2009.

COLETI, J.T.; STUPIELLO, J.J.; Plantio da cana-de-açúcar. In. SEGATO, S.V; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M.. Atualizações em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP2, 2006.

CORRÊA, J.B.D.; ANDRADE, L.A.B.; DIAS JÚNIOR, M.; ALVES, V.G. Efeitos da compactação de três tipos de solos no rendimento de matéria seca de duas variedades de cana-de-açúcar, em condições de casa de vegetação. **STAB – Açúcar, álcool e subprodutos**, v.18, n. 2, p. 32-34, 1999.

CONAB<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_08_07_08_58_49_boletim_cana_portugues_-_2o_lev_-_2014-15.pdf> Acesso em 26/05/2015.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEERE, I.D., PEET, M.M. **Crop-water relations**. New York: A Wirley Interscience, p. 445-479, 1983.

GAVA, G. J. de C.; SILVA, M. A.; SILVA, R. C.; JERONIMO, E. M.; CRUZ, J. C. S.; KÖLLN, O. T. Produtividade de três cultivares de cana-de-açúcar sob manejos de sequeiro e irrigado por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. Campina Grande, v.15, n.3, p. 250-255, 2011.

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**, Brasília, v.44, n. 12, p.1575-1582, 2009.

MIRANDA, J. R. **História da cana-de-açúcar**. Campinas: Komedi, 167p.2008.

NOVA CANA<<http://www.novacana.com/cana-de-acucar/sistemas-preparo-solo-plantio-da-cana>> (Acesso em 25/05/2015).

OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M. T.; FREIRE, F. J.; JÚNIOR, M. A. L.; MACHADO P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. Campina Grande, v.14, n. 9, p. 951-960, 2010.

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

PUGNAIRE, F. I.; ENDOLZ, L. S.; PARDOS, J. Constraints by water stress on plant growth. In: PESSARAKLI, M. **Handbook of plant and crop Stress**. p. 271 - 284.1993.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. 1995. 101f. Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 1995.

RIPPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C.; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**, 2ª ed. Piracicaba: T.C.C. Ripoli, 197 p .2007.

SILVA, M. A.; SOARES, R. A. B.; LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M.P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.3, p. 655-661. 2008.

SILVA, M. A.; JIFON, J. L.; SILVA, J. A. G.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.19, p.193-201, 2007.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; JÚNIOR, W. G. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v.16, n. 1, p. 64-71, 2012.

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

SOUZA, Z.M.; PRADO,R.M.; PAIXÃO,A.C.S.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, mar. 2005.

SUGAWARA, L. M.; RUDORFF, B. F. T. Acompanhamento do crescimento vegetativo da cana-de-açúcar por meio de séries temporais de NDVI do sensor Modis. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto- INPE, 15, p. 0391. Curitiba. **Anais...** 2011.

TAVARES, O.C.H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.32, n. 1, p. 61-68, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 719 p.2004.

TEJERA, N. A.; RODÉS, R.; ORTEGA, E.; CAMPOS, R.; LLUCH, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.102, p.64 - 72, 2007.