UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP CÂMPUS DE JABOTICABAL

ÍNDICES DE ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR NAS DIFERENTES FASES DE DESENVOLVIMENTO

Rodrigo Garcia Brunini

Engenheiro Agrônomo

2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP CÂMPUS DE JABOTICABAL

ÍNDICES DE ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR NAS DIFERENTES FASES DE DESENVOLVIMENTO

Rodrigo Garcia Brunini

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

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)

2017

Brunini, Rodrigo Garcia
B896i Índices de estresse hídrico em cana-de-açúcar nas diferentes fases de desenvolvimento / Rodrigo Garcia Brunini. – – Jaboticabal, 2017
v, 97 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017
Orientador: José Eduardo Pitelli Turco
Banca examinadora: Anaira Denise Caramelo, Antônio Carlos Barreto, David Luciano Rosalen, José Renato Zanini
Bibliografia

1. Déficit hídrico. 2. *Saccharum officinarum* L. 3. Termometria a infravermelho. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 632.11:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ÍNDICES DE ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR NAS DIFERENTES FASES DE DESENVOLVIMENTO

AUTOR: RODRIGO GARCIA BRUNINI
ORIENTADOR: JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. ANTONIO CARLOS BARRETO
Departamento de irrigação e drenagem / IFTM - Uberaba,MG

Profa. Dra. ANAIRA DENISE CARAMELO
Departamento de Engenharia Rural / UNIARA - Araraquara/SP

Prof. Dr. JOSÉ RENATO ZANINI
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. DAVID LUCIANO ROSALEN
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 29 de setembro de 2017

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Rodrigo Garcia Brunini, nascido em 02 de Janeiro de 1989 na cidade de Jaboticabal, SP, é Engenheiro Agrônomo e Mestre em Ciência do Solo pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias FCAV - UNESP. Desenvolve pesquisas com Engenharia de água e solos, manejo de bacias hidrográficas, energização rural, instrumentação agrícola, manejo e uso sustentável da água para irrigação, termografia e termometria ao infravermelho, e índices de estresse hídrico das culturas.

“Nem todos que procuram estão perdidos”.

- J.R.R. Tolkien

Dedico ao meu Orientador e amigo, Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco, por ter me dado a possibilidade de encontrar a estrada correta nesta jornada.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por acreditarem.

A minha mãe por nunca ter questionado meus sonhos, os mais absurdos que fossem.

A todos os amigos e colegas que acompanharam essa trajetória até aqui.

Aos meus professores dentro e fora de aula.

Ao Prof. Dr. Rinaldo César de Paula, por todo o apoio e esclarecimento de dúvidas.

A William de Mello Magnabosco pela ajuda nas análises.

Ao universo por ter me proporcionado todas as dificuldades, conflitos e caos, pois sem isso eu não estaria preparado para a próxima fase de minha vida.

Para Cíntia, que ensinou-me a andar sobre esta linha tênue, existente, entre ciência, paixão e arte.

SUMÁRIO

Página

RESUMO ..... **x**

ABSTRACT ..... **xi**

LISTA DE TABELAS ..... **xii**

LISTA DE FIGURAS ..... **xiii**

1. INTRODUÇÃO **1**

2. REVISÃO DE LITERATURA **3**

2.1. A CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum officinarum* L.) 3

2.2. DESENVOLVIMENTO DA PLANTA 4

2.3. IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DO SETOR 9

2.4. DÉFICIT E ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR 13

2.5. CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA 16

2.6. EXPOSIÇÃO SOLAR E DECLIVIDADE DO TERRENO 21

2.7. TERMOMETRIA A INFRAVERMELHO 24

2.7.1. A TECNOLOGIA E O USO NA AGRICULTURA 24

3. MATERIAL E MÉTODOS **30**

3.1. ÁREA EXPERIMENTAL 30

3.2. DADOS METEREOLOGICOS 32

3.3. USO E MANEJO DA IRRIGAÇÃO 32

3.4. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO - IEH 35

3.5. ANÁLISES MORFOFISIOLÓGICAS 37

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO **42**

5. CONCLUSÕES **65**

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **65**

ÍNDICES DE ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR NAS DIFERENTES FASES DE DESENVOLVIMENTO

RESUMO – O Brasil é lider mundial na produção de açúcar e etanol, devido ao intenso cultivo da cultura de cana-de-açúcar principalmente na região Sudeste do país. No entanto sua expansão em outras áreas vem ganhando força nos últimos anos, o que tem acarretado variações significativas nas safras devido aos problemas relacionados ao clima da região e caracterísiticas topográficas do terreno. A limitação hídrica e as altas temperaturas do ar podem gerar danos irrerversíveis às plantas e impactos ao produtor final. O uso de índices de estresse hídrico nas fases de desenvolvimento da cultura pode atuar como uma ferramenta essencial no manejo da irrigação, prevenindo os efeitos negativos desencadeados pelo estresse hídrico nas plantas. Objetivou-se com este trabalho determinar índices de estresse hídrico em cana-de-açúcar nas diferentes fases de desenvolvimento. Para isso avaliaram-se os índices de estresse hídrico nas diferentes fases de desenvolvimento das plantas, o potencial de água no solo, o potencial matricial de água, a taxa fotossintética e o índice do conteudo de clorofila das folhas e a condução do sistema produtivo no período de coleta de dados. A pesquisa foi desenvolvida na área experimental do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, denominada “Bacia Hidrográfica Experimental”, utilizando superfícies caracterizadas como H1 (superfície horizontal na capacidade de campo) e H2 (superfície horizontal, sob déficit hídrico induzido), 20N e 40N (superfícies com 20 e 40% de declividade e exposição norte, sob déficit hídrico induzido), 20S e 40S (superfícies com 20 e 40% de declividade e exposição sul, sob déficit hídrico induzido), 20E e 40E (superfícies com 20 e 40% de declividade e exposição leste, sob déficit hídrico induzido) e 20 e 40W (superfícies com 20 e 40% de declividade e exposição oeste, sob déficit hídrico induzido). As análises foram realizadas *in loco* e em laboratório. Os resultados indicaram que o momento de irrigar difere para cada fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar, em uma faixa entre 2,0°C até 5,0°C, sendo crítica a fase de perfilhamento. Verificou-se inclusive que a topografia do terreno teve influência na quantidade de radiação solar nos tratamentos. A superfície H1 mantida na capacidade de campo obteve menor índice de estresse hídrico e maior produtividade (124,0 Mg ha^{-1}), diferindo estatisticamente dos demais tratamentos.

Palavras-Chave: manejo de água e solo, déficit hídrico, termometria a infravermelho, irrigação, *Saccharum officinarum* L.

WATER STRESS INDEX IN THE CULTIVATION OF SUGARCANE IN DIFFERENT DEVELOPMENT STAGES

ABSTRACT - Brazil is the world leader in the production of sugar and ethanol, due to the intense cultivation of sugarcane cultivation mainly in the Southeast region of the country. However, its expansion in other areas has been gaining strength in the last years, which has caused significant variations in the harvests due to problems related to the climate of the region and topographic characteristics of the terrain. Water limitation and high air temperatures can generate irreversible damage to the plants and impacts the final producer. The use of water stress indices in the development stages of the crop can act as an essential tool in the management of irrigation, preventing the negative effects triggered by water stress in the plants. The objective of this work was to determine water stress indexes in sugarcane at different stages of development. For this, the water stress indexes were evaluated in the different phases of plant development, soil water potential, water matrix potential, photosynthetic rate and index of leaf chlorophyll content and the conduction of the productive system in the soil. period of data collection. The research was developed in the experimental area of the Department of Rural Engineering of the FCAV / UNESP, denominated "Experimental Hydrographic Basin", using surfaces characterized as H1 (horizontal surface in the field capacity) and H2 (horizontal surface, under induced water deficit), 20N and 40 N (surfaces with 20 and 40% slope and northern exposure, under induced water deficit), 20S and 40S (surfaces with 20 and 40% slope and south exposure, under induced water deficit), 20E and 40E (surfaces with 20 and 40% slope and east exposure, under induced water deficit) and 20 and 40W (areas with 20 and 40% slope and west exposure, under induced water deficit). The analyzes were performed in loco and in the laboratory. The results indicated that the time of irrigation differs for each phase of development of sugarcane, in a range between 2.0 ° C and 5.0 ° C, and the tillering phase is critical. It was also verified that the topography of the terrain influenced the amount of solar radiation in the treatments. The H1 surface maintained in the field capacity obtained lower index of water stress and higher productivity (124.0 Mg ha^{-1}), differing statistically from the other treatments.

Keywords: water and soil management, water deficit, infrared thermometry, irrigation, *Saccharum officinarum* L.

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1. Área Total de Cana-de-açúcar no Estado com Precipitação Inferior e Superior à 1.200 mm, Estado de São Paulo, safra de 2014/2015. 18

Tabela 2. Características físico-hídricas médias e constantes da equação de Van Genuchten (1980), para as camadas de 0 – 0,20 e 0,20 – 40 m de profundidade do solo da área experimental. 34

Tabela 3. Valores do coeficiente da cultura de cana-de-açúcar (Kc) para cultura de cana-de-açúcar.....35

Tabela 4. Lâmina d´água mensal recebida pela cultura em cada tratamento e a precipitação em mm, ocorridas durante o desenvolvimento do experimento. Jaboticabal, SP, 2015/2016. 43

Tabela 5. Índices de Estresse Hídrico, em °C, nas superfícies estudadas, para as diferentes fases de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar. 47

Tabela 6. Temperatura máxima da cobertura vegetal, em °C, dos tratamentos H1, H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W, nas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e a Radiação Solar Global incidente acumulada, em MJ m^{-2} ano^{-1}. Jaboticabal, SP, 2015/2016.....51

Tabela 7. Médias da Taxa de perfilhamento; Área foliar; Massa de matéria seca; Altura da planta e Diâmetro do colmo, para as superfícies estudadas durante o período. 58

Tabela 8. Produtividade média de cana-de–açúcar (Mg ha^{-1}), Jaboticabal, SP, 2015/2016.....63

LISTA DE FIGURAS

Página

Figura 1. Desenvolvimento da cana-de-açúcar. Fonte: adaptado Senamhi, 2015. 6
Figura 2. Produção total de cana-de-açúcar por país em 2014. Fonte: Adaptado de FAO, 2016. 10
Figura 3. Principais Usinas de cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: Adaptado de UDOP, 2016. 12
Figura 4. Índice de seca (spi) nas regiões do Brasil, para os anos de 2015/2016. Fonte: adaptado de Embrapa Agritempo 2016. 14
Figura 5. Déficit/Excesso hídrico, em mm, para as regiões do Brasil nos primeiros meses de desenvolvimento da cana-de-açúcar em 2015. Fonte: Adaptado Inmet, 2016. 17
Figura 6. Regiões no Brasil com maior potencial de produção de cana-de-açúcar sem irrigação. Fonte: Adaptado de CGEE, 2007. 19
Figura 7. Municípios no Estado de São Paulo com plantio de cana-de-açúcar acima de 12% de declividade. Fonte: Adaptado de GITE, 2014. 22
Figura 8. Esquema do espectro infravermelho do termômetro manual. Fonte: Adaptado de Infratemp (2010) e Gascho e Shih (1983). 25
Figura 9. Nível de Estresse Hídrico para agricultura e população humana, nos diferentes países. Fonte: Adaptado de Growing Blue®, 2017. 28
Figura 10. Nível de Estresse Hídrico para agricultura e população humana, nos diferentes países. Fonte: Adaptado de Growing Blue®, 2017. 29
Figura 11. Bacia Hidrográfica Experimental, Jaboticabal-SP. Foto: Rodrigo Garcia Brunini, 2015. 31
Figura 12. Termômetro infravermelho portátil, FLUKE, modelo 62 MAX (A) e determinação do índice de estresse hídrico diário das plantas. Foto: Rodrigo G. Brunini, 2015. 36
Figura 13. Calibração do termômetro de infravermelho. Laboratório de Instrumentação, Aquisição e Processamento (LIAP). Foto: Rodrigo G. Brunini 2015. 37
Figure 14. Sistema de numeração de folhas, Kuijper (1915). 38

Figura 15. Fluorômetro Portátil para medição da eficiência fotoquímica (A) e clipes específicos para medição (B), na cultura de cana-de-açúcar. Foto: Rodrigo G. Brunini 2015. 39
Figura 16. Clorofilômetro portátil para medição da clorofila na cana-de-açúcar. Foto: Rodrigo Garcia Brunini 2015. 40
Figura 17. Método de medição do potencial hídrico foliar (Ψw) da cana-de-açúcar por meio da câmara de Scholander. Foto; Rodrigo Garcia Brunini 2015. 41
Figura 18. Colheita das parcelas (A) e pesagem (B) da cana-de-açúcar. Foto: Rodrigo G. Brunini 2015. 42
Figura 19. Índice de estresse hídrico, em °C, para os tratamentos H1, H2, 20N, 20S (A), 40N, 40S (B), 20E, 20W (C), 40E e 40W (D), na cultura de cana-de-açúcar. Jaboticabal-SP, 2015/2016. 45
Figura 20. Valores médios de água disponível no solo até 0,40 m de profundidade, durante os períodos de estresse hídrico induzido na cana-de-açúcar para os tratamentos (H1, H2. 20N. 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W). 49
Figura 21. Potencial hídrico foliar (ψw), em MPa, para os tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey (P < 0,05). *CV = 9,8%. **CV = 9,1%. ***CV = 9,0%. 52
Figura 22. Eficiência fotoquímica máxima do FII (Fv/Fm), dos tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), durante as fases de desenvolvimento para cultura de cana-de-açúcar. Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey (P < 0,05). *CV = 1,09%. **CV = 0,83%. ***CV = 0,83%. 54
Figura 23. Índice do conteúdo de clorofila (ICC), dos tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), durante as fases de desenvolvimento para cultura de cana-de-açúcar. Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey (P < 0,05). *CV = 4,80%. **CV = 6,34%. ***CV = 10,74%. 55

Figura 24. Taxa de perfilhamento, perfilhos por m^2, para os tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), para a cultura de cana-de-açúcar. 57
Figura 25. Altura das plantas, em cm (A), Diâmetro dos colmos, em mm (B), Índice de área foliar, em cm^2 (C) e Massa de matéria seca, em g cm^{-2} (D), nos tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), para a cultura de cana-de-açúcar. 60
Figura 26. Produtividade de cana-de-açúcar, em Mg ha^{-1} e IEH máximo, em °C, nas superfícies estudadas. Jaboticabal, SP, 2015/2016. 62

1. INTRODUÇÃO

As plantas sofrem diversos tipos de estresse que podem ser resultantes do manejo antrópico e também do efeito do próprio ambiente. Os efeitos do estresse em plantas colocam em evidência a resposta da cultura para uma dada situação, os pois vegetais podem responder por exemplo a deficiência de algum nutriente no solo por meio de sintomas visuais, bem como com a diminuição da produção final.

De acordo com Soares e Machado (2007), a planta estressada manifesta uma série de efeitos fisiológicos, que podem estar ligados, desde a modificações na manifestação dos genes e reações metabólicas incompletas até a instabilidade no desenvolvimento das células e efeito negativo na produção de matéria prima vegetal.

Avaliar todos os potenciais fatores que causam estresse em uma planta é uma tarefa praticamente inexequível, pois são muitas as variáveis capazes de induzir uma planta a algum tipo de estresse no campo e uma grande parte delas está ligada a falta ou excesso de substancias essenciais ao desenvolvimento vegetal, como por exemplo a radiação solar, a água, nutrientes e o solo propriamente dito.

Áreas agricultáveis onde ocorre a falta ou limitação hídrica às culturas, uma condição conhecida como déficit hídrico, podem ser consideradas potenciais zonas propícias ao estresse hídrico. Esta carência de água nas plantas responsável por gerar os efeitos do estresse é manifestada como todo o conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do padrão de água substancial exibido no estado de maior hidratação (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Sabe-se que o estresse hídrico é um condicionante que reduz o desenvolvimento e potencial de produção das plantas, estando diretamente relacionado a locais com ocorrência de veranicos, ou seja, de baixa precipitação e elevada temperatura e radiação solar, bem como, ausência no manejo da irrigação (HOLANDA et al. 2015).

Atualmente no Brasil as regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar apresentam potencias áreas para a ocorrência de estresse hídrico na cultura, condição que pode limitar a produção de açúcar e etanol

Segundo Silva, Borges e Albuquerque (2014), a evapotranspiração é o principal fator de perda de água para a atmosfera dentro de um balanço hídrico, que é a relação entre os parâmetros climáticos e o potencial de água no solo. García-Tejero et al. (2011) e Zarco-Tejada et al. (2012) evidenciam que a principal resposta das plantas ao déficit hídrico do solo é o fechamento dos estômatos e a redução da transpiração foliar, fato no qual condiciona ao aumento gradativo da temperatura foliar.

A temperatura do dossel vegetativo atua como um bom indicador do status hídrico da planta, sendo esta variável diretamente proporcional à topografia e declividade do terreno e influenciando no metabolismo hídrico das plantas (WANG et al., 2010). O método denominado de Índice de Estresse Hídrico das Culturas (Crop Water Stress Index – CWSI), proposto por Idso et al. (1981) e Jackson (1982), possibilita encontrar de forma prática índices de estresse hídrico para as culturas, através do uso da termometria a infravermelho.

Com base em trabalhos apresentados por Garcia (2000); Silva et al. (2008), Fernandes (2010), García-Tejero et al. (2011), Zarco-Tejada et al. (2012) e Mazaron (2013), para a cana-de-açúcar e outras culturas, é possível determinar índices de estresse hídrico em diferentes cenários produtivo. O uso de índices de estresse é capaz de influenciar a tomada de decisão do produtor e indicar qual o melhor momento para o manejo da irrigação, tecnologia efetiva para diminuir os efeitos do déficit hídrico nas plantas.

A investigação de índices de déficit hídrico através das respostas da cultura aos diferentes cenários de topografia e exposição solar investigados, é peça chave na busca por respostas que diminuam os efeitos do estresse hídrico nos vegetais. Interpretar as diversas variáveis relacionadas a esta ciência é essencial para o planejamento e manejo da irrigação das culturas, aumentando a eficiência da água no campo e também tornando possível a exploração agrícola em áreas com elevado potencial ao déficit hídrico.

Diante da importância e necessidade de disponibilizar informações científicas e técnicas sobre o déficit hídrico e o manejo da irrigação, objetivou-se com esta

pesquisa determinar tais índices de estresse hídrico, nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. A CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum officinarum* L.)

A cultura da cana-de-açúcar, pertencente à família Poaceae, cujo gênero é denominado de *Saccharum* é uma planta do tipo “C4” cujo processo de fotossíntese é responsável pela formação de compostos orgânicos com quatro carbonos em sua cadeia, fato que implica num elevado potencial fotossintético e a eficiência no uso e resgate do CO_2 da atmosfera.

A cana-de-açúcar apresenta como principais características morfológicas inflorescências em forma de espiga, crescimento do caule em colmos, folhas com lâminas de sílica (SiO_2) em suas bordas e bainhas abertas.

O plantio no campo pode ser realizado através dos colmos ou pelo sistema de mudas pré-brotadas (MPB), sendo que ambos utilizam as gemas para propagação, sendo que estas passam pelo processo de brotação que constitui a primeira fase fisiológica da cultura. O mecanismo de transição da gema do estado de dormência para o de crescimento ativo é um fenômeno complexo, desencadeado por enzimas e hormônios reguladores do crescimento e sendo sensível a diversas variáveis ambientais (SILVA, CARLIN, PERECIN, 2004; LANDELL et al., 2012).

O ciclo da cultura é considerado como semiperene e as plantas perfilham de forma abundante durante a fase inicial de estabelecimento no campo, sendo adaptadas a uma variedade de climas subtropicais e tropicais, apresentando um vasto potencial de cultivo em diversas regiões do Brasil. As variáveis climáticas que mais afetam o potencial produtivo da cana-de-açúcar são a temperatura (16ºC a 33ºC), alta incidência de radiação solar e disponibilidade de água no solo, ou seja, ela é considerada uma planta essencialmente tropical (CONAB, 2015).

O desenvolvimento da planta dá-se através de touceiras devido ao intenso perfilhamento. No campo a taxa de brotação e perfilhamento sofre influência direta do ambiente, por meio de fatores, tais como radiação solar, temperatura, precipitação e

macro e micronutrientes, que são essenciais para o manejo da cana-de-açúcar (ALEXANDER, 1973; SCARPARI e BEAUCLAIR, 2004).

A cana-de-açúcar é uma cultura que demanda intenso volume de água durante seu ciclo, destaca-se que cerca de 30% de sua massa total é representada pela matéria seca e 70% pela água, variando de acordo com o estádio fenológico.

Suas raízes e rizomas responsáveis pela absorção de água também são ricos em reserva nutritiva, providos de nós e entrenós, crescendo horizontalmente no solo. As raízes são fasciculadas, podendo chegar a profundidades acima de quatro metros no solo, no entanto sabe-se que 85% destas raízes acumulam-se em uma faixa de 0,5 m da superfície (SEGATO, MATTIUZ, MOZAMBANI, 2006).

Os colmos são compostos por nós e entrenós bem marcados e localizam-se acima do solo, tendo como principais funções a sustentação das folhas e das panículas, condução de água, nutrientes e o armazenamento de açúcares. O crescimento dos colmos pode sofrer limitação devido à falta de água, variações na temperatura, ou ainda, devido ao florescimento, conforme as diferentes condições do ambiente produtivo (MOZAMBANI et al., 2006; VALSECHI, 2008; DIOLA; SANTOS, 2010).

As folhas da cana-de-açúcar são definidas como completas, ou seja, apresentam bainha, colar e lâmina foliar, com inserções bem definidas e alternadas no colmo. A lâmina foliar é alongada e relativamente plana, com comprimento que varia entre 0,5 e 1,5 m e largura variando de 0,025 a 0,1 m, após estar totalmente expandida (SCARPARI, BEAUCLAIR, 2004).

De acordo com Azevedo et al. (2002) e Marafon (2012), todos os estudos que abordam a respeito das principais partes da planta de cana-de-açúcar, tais como brotação, perfilhamento, altura do colmo e área foliar são de extrema importância para avaliar parâmetros relevantes, tais como, crescimento, atividade metabólica, taxa fotossintética, evapotranspiração e acúmulo de sacarose. Tais pesquisas auxiliam pesquisadores e produtores a melhorarem o cultivo da cultura no campo e maximizarem a produção de produtos e subprodutos oriundos da cana-de-açúcar.

2.2. DESENVOLVIMENTO DA PLANTA

O desenvolvimento da cana-de-açúcar apresenta diferentes fases bem definidas, sendo elas: brotação, perfilhamento, crescimento, maturação e florescimento. Cada uma destas fases é responsável por conferir à planta alterações morfofisiológicas que lhe atribuem mudanças na altura e tamanho dos colmos, na massa de matéria seca ou no volume total da planta, ou de qualquer órgão dela em função do tempo (TERUEL, BARBIERI, FERRARO JÚNIOR, 1997).

É de extrema importância realizar estudos que avaliem as modificações morfofisiológicas nos diferentes estádios de desenvolvimento da cana-de-açúcar durante o ciclo produtivo. Tais pesquisas resultam em melhoria das técnicas produtivas e eficiência no manejo da cultura no campo (BATALHA, 2011; MARAFON, 2012).

Devido ao intenso e abundante perfilhamento na fase inicial, os perfilhos da cana-de-açúcar, acabam gerando uma competição intraespecífica por radiação fotossinteticamente ativa (auto-sombreamento), dificultando o máximo desenvolvimento de novos brotos e perfilhos, o que resulta no intenso crescimento dos colmos principais (MAGALHÃES, 1987).

Diversas variáveis no ambiente produtivo, tais como a temperatura, os nutrientes, a disponibilidade hídrica e a radiação solar, apresentam resposta direta no metabolismo da cana-de-açúcar, afetando de maneira positiva ou negativa a eficiência energética da cultura. Realizar uma minuciosa exploração a respeito das respostas encontradas em campo sobre o desenvolvimento da cultura, contribue de forma significativa para que pesquisadores e profissionais da área possam identificar em quais cenários produtivos e estádios do ciclo são mais limitantes e sensíveis as variações hídricas e de radiação solar.

O desenvolvimento produtivo da cana-de-açúcar é representado em quatro estádios fenológicos (Figura 1).

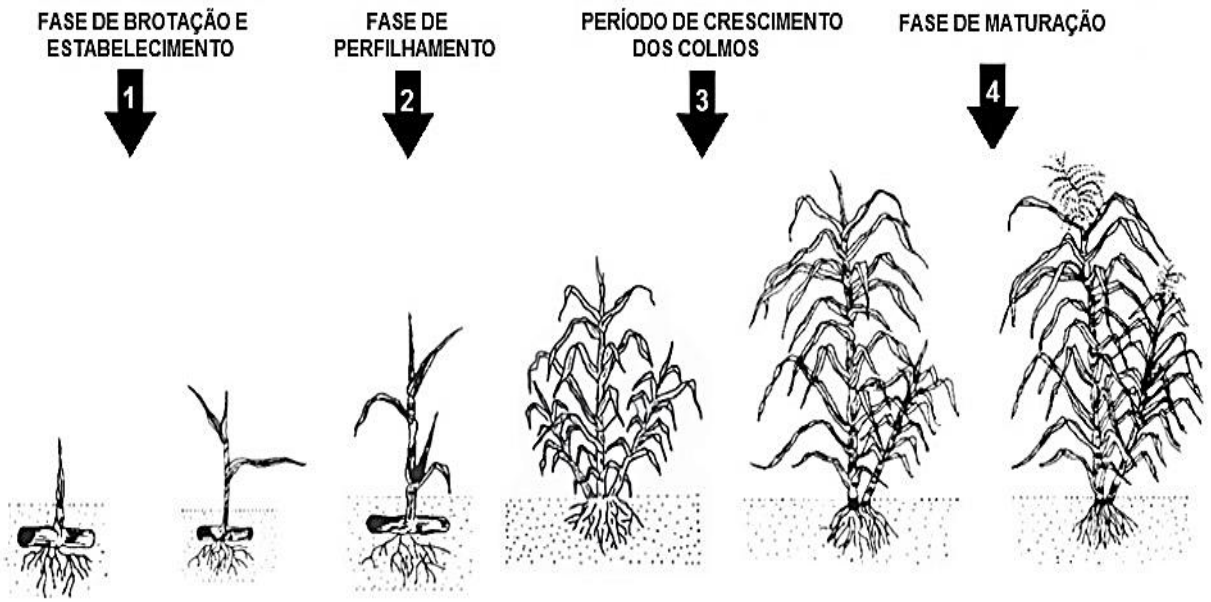

Figura 1. Desenvolvimento da cana-de-açúcar. Fonte: adaptado Senamhi, 2015.

De acordo com a Figura 1, a fase de brotação e estabelecimento tem como principal característica o crescimento lento com aproximadamente 20 a 30 dias para a ocorrência da brotação, influenciada diretamente pela umidade do solo e temperatura ambiente, variando em uma faixa adequada entre 28 e 30ºC (LIU, KINGSTON e BULL,1998).

A fase de perfilhamento indicada na Figura 1, dá-se em torno de 40 dias após a emergência, podendo estender-se até 120 dias, sendo e também susceptível às variações de temperatura e umidade. Períodos de limitação hídrica durante a fase de perfilhamento resultam na diminuição da emissão de novos perfilhos, podendo cessar a divisão celular e impedindo a diferenciação e o crescimento dos tecidos que darão origem às novas estruturas dos perfilhos (BEZUIDENHOUT et al., 2003).

A partir dos 120 dias após a emergência até cerca de 270 dias, ocorre a fase de crescimento dos colmos. Considera-se o período de crescimento dos colmos como o estádio de desenvolvimento mais importante na cana-de-açúcar, devido a captação da radiação solar pela planta e sua conversão em matéria seca total (aproximadamente 75%). Destaca-se que fatores como a temperatura e a radiação solar são os principais responsáveis pelo desenvolvimento do dossel (SINGELS, DONALDSON, SMIT, 2005).

A fase de maturação dos colmos e florescimento da cultura, tem seu início dos 270 a 360 dias após o plantio aproximadamente, podendo estender até 6 meses, dependendo do manejo adotado. Neste período observa-se acentuado incremento da área foliar e crescimento da planta, no entanto ao longo dos dias, a capacidade fotossintética decresce e verifica-se diminuição na taxa de desenvolvimento da planta e consequente acúmulo de açúcares (DIOLA e SANTOS, 2010).

O florescimento da cultura é induzido por um ambiente propício quanto ao foto período (de 11,5 a 12 horas de luz por dia) e temperaturas ideais, sendo que temperaturas máximas de 32ºC durante a iniciação floral são deletérias para o processo de florescimento (BERDING e MOORE, 2001).

Para Marafon (2012) a análise e interpretação das diferentes fases do desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar resulta na compreensão detalhada dos fatores que mais influenciam a planta durante seu ciclo, sendo:

- Sabe-se que na formação da planta há uma forte dependência metabólica das reservas nutricionais encontradas nos toletes, pois os nutrientes necessários serão os responsáveis por dar suporte na produção e propagação de seus diferentes órgãos ativos.
- Quando bem formadas, as novas folhas de cana têm por objetivo contribuirem na interceptação da radiação solar (luz) e no aumento da taxa de crescimento.
- Durante o desenvolvimento do sistema radicular e a expansão foliar, a planta começa então a retirar água e nutrientes do solo, onde se iniciam os processos metabólicos dependentes da fotossíntese. É nesta fase que observa-se um maior acréscimo na taxa de matéria seca, pois as folhas vão gradualmente auto sombreando o próprio dossel vegetativo e ocorre um aumento exponencial do índice de área foliar.
- Ao atingir o tamanho estável, a planta entra para a fase de senescência foliar e maturação dos colmos, período onde ocorre a translocação de açúcares para os órgãos de armazenamento até o ponto de colheita.

O Brasil é o único país no mundo com duas colheitas anuais de cana-de-açúcar, e isto ocorre devido a suas duas estações distintas durante o ano. De setembro a abril nas regiões Norte-Nordeste e de maio a dezembro nas regiões Centro-Sul. Portanto a colheita é definida em função da variedade, época de plantio, manejo da maturação e condições climáticas no ambiente (RODRIGUES, 1994).

A duração do ciclo está ligada ao tipo de cana e planejamento da época de plantio. A cana de ano e meio (14 a 22 meses), plantada de janeiro ao início de abril, apresenta taxa de crescimento mínimo de maio a setembro, com pequena disponibilidade hídrica no solo ou até mesmo déficit hídrico, com baixas temperaturas e menores intensidades de radiação já a cana de 1 ano (12 meses), plantada em setembro-outubro, tem seu desenvolvimento máximo de novembro a abril e diminui depois devido às condições climáticas adversas do período de inverno no centro sul; a cana soca desenvolve-se pelo período de 12 meses, e enquanto que a cana de inverno desenvolve-se pelo período de 12 a 16 meses (CTC, 2015).

A meteorologia do local de cultivo da cultura é a peça chave que limita as condições ambientais adequadas, determinada principalmente pela interação do solo, planta e atmosfera. As condições climáticas têm influência direta nos tratos culturais e manejo da cultura, como por exemplo a época de colheita e o número programado de cortes (GEMENTE et al., 1986).

Diversos trabalhos na literatura evidenciam algumas variáveis climáticas, tais como temperatura, radiação fotossinteticamente ativa e umidade relativa do ar, sendo qualificadas como elementos meteorológicos relevantes, já que controlam e podem até limitar o crescimento e desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar (HUMBERT, 1968).

A variável ambiental de radiação solar, que tem como principal função manter a taxa de temperatura do meio e responsável por controlar diversos aspectos fisiológicos e físico-químicos das plantas, tais como crescimento, desenvolvimento e regime térmico, influenciando diretamente na produção de material vegetal e no condicionamento da evapotranspiração. A radiação disponível, denominada de “radiação líquida”, resulta do balanço energético existente no ambiente e é a variável de maior uso para se estimar a demanda hídrica das plantas (TRENTIN et al., 2011).

Em determinados momentos no campo, devido a fatores ambientais e fisiológicos da planta, ocorre a diferença de temperatura entre as folhas e o ar. Fato este que associa-se ao processo de transpiração, pois à medida que as plantas aumentam a transpiração, ocorre redução equivalente na temperatura foliar devido à dissipação de energia pela água na forma de calor latente, fazendo com que a

temperatura foliar fique com valor inferior à temperatura do ar. A este processo dá-se o nome de evapotranspiração (VIEIRA et al., 2014).

Quanto maior a capacidade de uma planta em captar radiação solar, maior será a sua taxa fotossintética. Ambas são diretamente proporcionais, assim como a capacidade da planta em metabolizar açúcares, o que pode afetar sua produtividade. Fatores intrínsecos do clima, como temperatura, intensidade luminosa e umidade atuam durante o ciclo produtivo no metabolismo da cultura de cana-de-açúcar (planta C4), a qual apresenta alta eficiência energética em regiões quentes e ensolaradas, condições climáticas existentes na região sudeste do Brasil, mais especificamente no interior do Estado de São Paulo (BRUNINI, 2008).

No entanto, consequentes aumentos gradativos da temperatura e restrição na disponibilidade hídrica evidentes nas últimas safras, estão reduzindo o processo de crescimento da cana-de-açúcar e produtividade das lavouras na região (CTC, 2015; IEA, 2015).

2.3. IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DO SETOR

Cerca de 79 países e territórios espalhados pelo globo produzem comercialmente a cultura de cana-de-açúcar, somando-se uma área total que supera 12 milhões de hectares, conforme pode ser verificado na Figura 2, com destaque para o Brasil, Cuba, Índia, México, China, Filipinas, Austrália, África do Sul, Estados Unidos da América (principalmente Havaí), República Dominicana e Formosa (TAVARES, 2009).

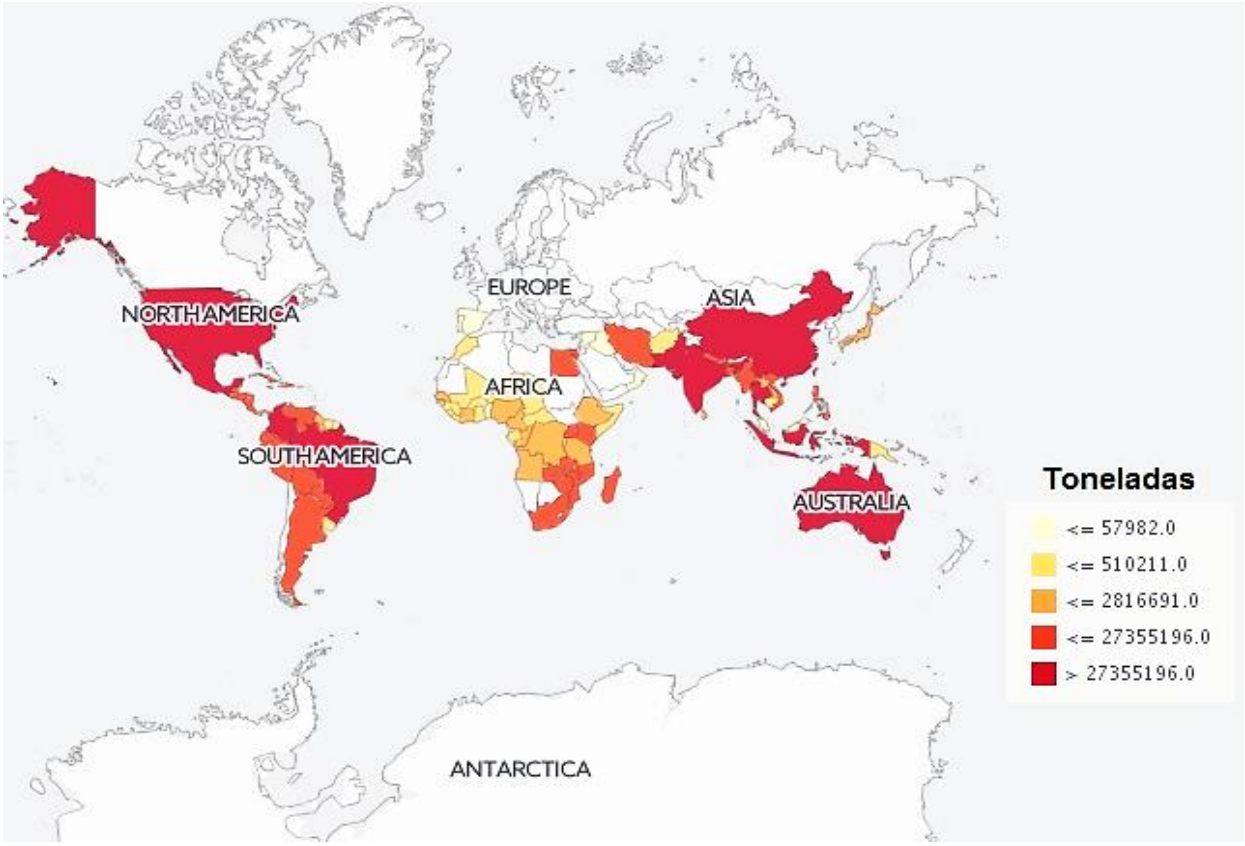

Figura 2. Produção total de cana-de-açúcar por país em 2014. Fonte: Adaptado de FAO, 2016.

Os principais produtos gerados pelo setor sucroenergético da cana-de-açúcar são: açúcar através da sacarose e o álcool (etanol), além de subprodutos como torta de filtro e vinhaça, resíduos orgânicos utilizados nos canaviais e a palha como matéria prima na geração de energia elétrica, suprindo as necessidades da própria agroindústria (RODRIGUES, 1994; BATALHA, 2011).

Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e exportador de açúcar. A participação brasileira no volume total comercializado de etanol atinge de forma direta 53% da quantidade total vendida. O país não importa açúcar e etanol, já que é responsável por 61,8% das exportações de açúcar de cana no mundo (MAPA, 2015).

A cultura apresenta um importante papel ambiental, devido ao etanol ser um combustível cuja produção e uso ajudam a diminuir os gases causadores do efeito estufa. De acordo com pesquisas, a queima do etanol como substituto dos combustíveis fósseis reduz cerca de 70% das emissões de CO_2 na atmosfera. O Brasil

emerge como o país pioneiro na liderança do mercado mundial de energia limpa e renovável, fato que se consolida cada vez mais devido ao crescente aumento na produção de veículos e motores flex (biocombustíveis). De acordo com indicies da indústria automobilística brasileira, estima-se que 74% dos veículos vendidos no Brasil sejam desse tipo em 2017 (BARBOSA et al., 2014; CONAB, 2015; MAPA, 2015).

O país colhe cerca de 741,0 milhões de toneladas, em uma área de aproximadamente de 10,0 milhões de hectares, porém estes valores encontram-se abaixo do esperado devido as constantes variações ambientais ocorridas nos últimos anos que veem impactando significativamente o setor (AGRIANUAL, 2015; IEA, 2015, FAO, 2016).

A indústria sucroenergética, representa 2% das exportações nacionais, além de reunir 6% dos empregos agroindustriais brasileiros e contribuir de maneira efetiva para o crescimento do mercado interno de bens de consumo. Destaque para o Estado de São Paulo, com a maior área e produção no país, com cerca de 5,45 milhões de hectares e 404 milhões de toneladas, respectivamente. Sua participação gira em torno de 56,2% da produção nacional de cana-de-açúcar, 50,6% da produção de etanol (13,9 bilhões de litros) e 63,5% da produção do açúcar (23,9 milhões de toneladas). As maiores regiões produtoras são Barretos, Orlândia e Ribeirão Preto (CONAB, 2015).

Destaca-se que no Estado de São Paulo concentram-se 42,4% das usinas produtoras de açúcar e álcool do pais, de acordo com a Figura 3.

Figura 3. Principais Usinas de cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: Adaptado de UDOP, 2016.

Na safra de 2015/2016 o Brasil produziu aproximadamente 650 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em pouco mais de 9 milhões de hectares. Um considerável aumento de 3,1% em relação à safra de 2014/2015, no entanto, só não foi maior, porque o aumento na área plantada no país continua relativamente pequeno (0,7%) e a produtividade nos canaviais de São Paulo, se recuperam de um impacto hídrico da safra passada (MAPA, 2015).

Mesmo com o intenso crescimento do setor sucroenergético brasileiro, parte das áreas de cultivo de cana-de-açúcar em expansão ainda apresentam grandes restrições ambientais, o que tem limitado significativamente o crescimento e desenvolvimento da cultura. Grande parte dessas limitações deve-se aos impactos que ocorrem devido às variáveis climáticas que ocorrem nas regiões produtoras, tais

como intensos períodos de seca e aumento acumulativo das temperaturas nestas regiões demandam do produtor o uso de tecnologias capazes de gerar rápidas respostas aos efeitos climáticos adversos. Tais como drenagem, irrigação, fertilização, calagem e o preparo periódico do solo (BARBIERI e VILLA NOVA, 1977).

O investimento e manejo adequado da cultura de cana-de-açúcar resulta em um processo de planejamento eficiente dos produtores de açúcar e álcool. Afim de alcançar um maior incremento na produção de sacarose e demais subprodutos, é essencial que o profissional no campo mantenha o sistema produtivo de cana-de-açúcar em condições climáticas ideais, fazendo o uso correto dos métodos à sua disposição, garantindo o melhor desenvolvimento durante a fase vegetativa e o enriquecimento de sacarose até o corte (HUMBERT, 1968; ALFONSI et al., 1987; VAREJÃO-SILVA e CEZAR-BARROS, 2001).

O setor sucroenergético brasileiro proveniente da cana-de-açúcar é expressivo nos cenários internacional e nacional, tanto para impulsionar a economia do país, gerando serviços direta e indiretamente. Contudo, apesar do país destacar-se no cenário internacional por ter a tecnologia empregada nas diferentes etapas da produção, a pesquisa científica deve continuar progredindo, para superar os futuros impactos ambientais e aperfeiçoar o processo produtivo, desde o cultivo até a indústria, de forma cada vez mais eficiente e sustentável (DE OLIVEIRA, BRAGA e SANTOS, 2014).

2.4. DÉFICIT E ESTRESSE HÍDRICO EM CANA-DE-AÇÚCAR

O cultivo de cana-de-açúcar no Brasil avança cada vez mais em diversas regiões do pais, ocupando áreas cujo clima e atributos do solo variam consideravelmente, fatores que acabam influenciando diretamente no manejo da cultura e resultam em diversos cenários produtivos passivos de problemas na produção final. Grande parte dessas regiões encontra-se principalmente no Centro-Oeste, Norte e Nordeste, áreas denominadas como “fronteiras agrícolas” e ocorrem cada vez mais devido a imensa demanda de seus produtos gerados no campo.

No entanto estas regiões de expansão apresentam graves problemas nas propriedades físicas dos solos e variações na precipitação, fatores que acabam

influenciando na limitação do armazenamento de água para a cana-de-açúcar (Figura 4).

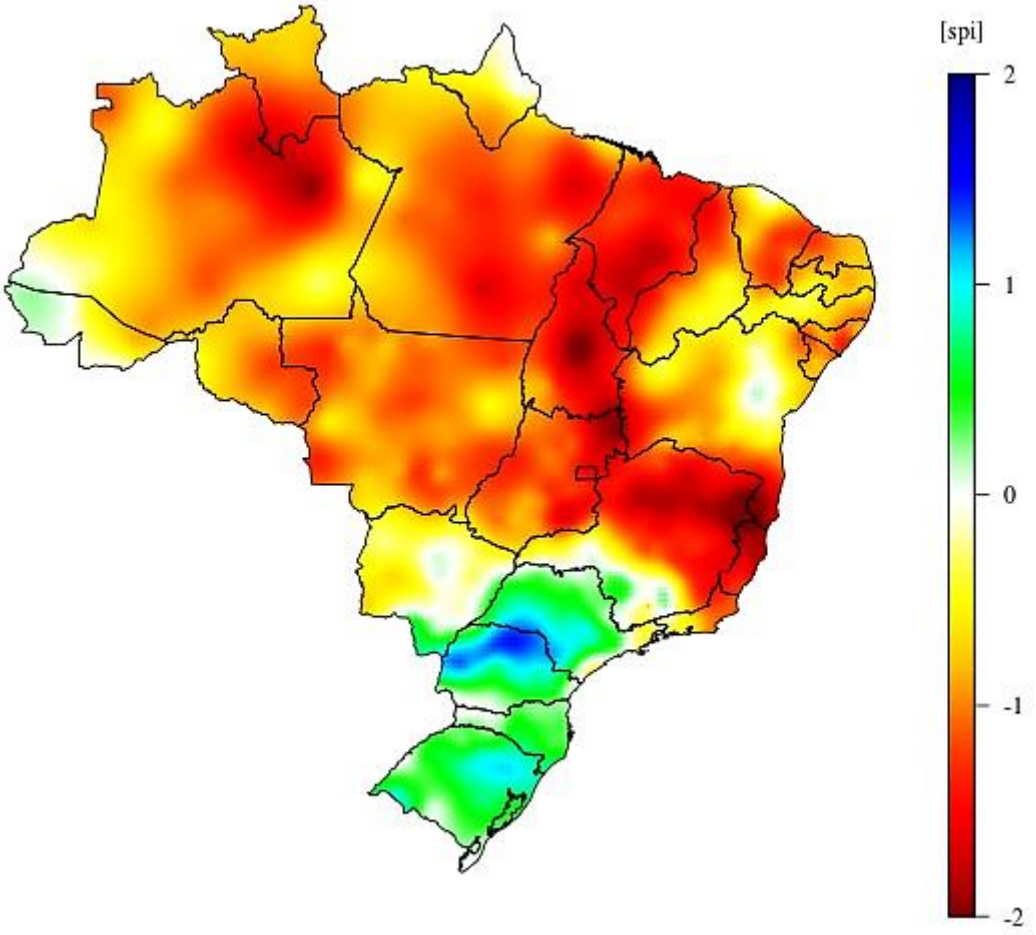

Figura 4. Índice de seca (spi) nas regiões do Brasil, para os anos de 2015/2016. Fonte: adaptado de Embrapa Agritempo 2016.

De acordo com a Figura 4, observam-se maiores índices de seca, faixa em vermelho e amarelo (-2 a -1 spi), nas regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar. Sabe-se que dentre os recursos naturais, pode-se destacar a disponibilidade de água no solo como sendo aquele que mais impacta na produção da cultura e um dos principais fatores limitantes para o desenvolvimento das plantas no campo. Expandir o cultivo da cana-de-açúcar para regiões com elevado potencial para problemas de seca, variações drásticas na temperatura e má estruturação dos solos, pode significar ao produtor um risco significativo na tomada de decisão para com o produto final.

O solo é um conjunto de agregados rochosos e compostos orgânicos e inorgânicos, os quais formam uma estrutura essencial, a qual tem a capacidade de abranger em sua composição um emaranhado de partículas, com caraterísticas bióticas e abióticas, unidas por uma rede complexa de parâmetros e atributos físicos e químicos com importante papel de poder fornecer às plantas, principalmente o suporte físico, água e nutrientes (HAMBLIN, 1985).

As condições físico-químicas do solo são fatores de grande importância para o crescimento das plantas. Em locais cujo o clima é adverso e o solo não apresenta atributos físicos que facilitem a disponibilidade hídrica e de nutrientes às raízes, é possível verificar diferenças morfofisiológicas no dossel da cultura, principalmente devido ao sistema radicular dispor de mecanismos capazes de detectar essas condições adversas do meio e enviar sinais à parte aérea, como alerta para controlar o crescimento e a expansão foliar (DAVIES, ZHANG, 1991).

Em ocasiões nas quais o volume de água no solo não atende às necessidades hídricas das plantas, principalmente na fase de crescimento das culturas, desenvolve-se um estresse hídrico, contribuindo para uma rápida resposta morfofisiológica da planta que acarreta no impedimento das trocas gasosas pelos estômatos e no cessamento da fotossíntese (TAIZ, ZEIGER, 2004).

O déficit hídrico nos solos não restringe-se apenas às regiões áridas e semiáridas, conforme a Figura 4 já que mesmo em regiões úmidas, com distribuição irregular das chuvas e solos cujas características físicas podem limitar o armazenamento de água, o crescimento e a produção final das culturas podem ser impactados de forma significativa (INMAN-BAMBER, SMITH, 2005).

Com a limitação de água no solo e dependendo da fase fenológica da cultura, o déficit hídrico poderá causar um estresse ainda maior na cultura de cana-de-açúcar. Plantas sob estresse hídrico acabam tendo decréscimo acentuado na produção de fitomassa, tanto da parte aérea como de raízes, chegando a atingir valores maiores que 35% em perdas na cultura de cana-de-açúcar, caso ocorram períodos de intenso estresse hídrico nas fases iniciais de desenvolvimento e crescimento dos colmos, causando perdas também na matéria prima final (INMAN-BAMBER, SMITH, 2005).

Nestas condições, o estudo e análise de parâmetros pertinentes ao estudo conjunto do déficit hídrico e consequente estrese hídrico para A cultura de cana-de-

açúcar, podem vir a contribuir de forma significativa para melhorar e desenvolver técnicas cujo objetivo seja de contribuir para a diminuição dos riscos devido às limitações do armazenamento de água no solo.

2.5. CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA

É fundamental que a cultura de cana-de-açúcar disponha de água durante as diferentes fases de seu ciclo produtivo, principalmente no início do seu desenvolvimento. A cultura tem necessidade hídrica em média de 1.500 a 2.500 mm de chuva (dependendo da variedade e região de cultivo ao redor da Terra), os quais devem ser subdivididos de acordo com a demanda durante o crescimento. Por dia, o consumo pode variar em torno de 2,0 a 6,0 mm de água, nas principais regiões produtoras, podendo divergir entre as variedades utilizadas e o estágio de desenvolvimento da cultura (BERNARDO, 2006).

O volume de água ideal no solo garante que a cultura tenha seu pleno desenvolvimento vegetativo e variações bruscas na precipitação, como períodos de escassez ou excessiva demanda hídrica afetam diretamente no crescimento e desenvolvimento correto da área foliar (MAULE, MAZZA, MARTHA, 2001).

Em áreas produtivas de cana-de-açúcar, na carência de água no solo ou valor abaixo do da quantidade ideal, as plantas passam a sofrer os efeitos da privação hídrica, fato que contribui para o desenvolvimento do estresse hídrico, no qual causa o fechamento dos estômatos e a diminuição da fotossíntese, uma adaptação evolutiva das plantas em resposta a limitação ou escassez de água no solo, que a longo prazo acaba afetando negativamente o crescimento e rendimento final da produtividade. A Figura 5, apresenta a ocorrência do déficit e ou excesso hídrico nas diferentes regiões do país para os primeiros meses de cultivo de cana-de-açúcar.

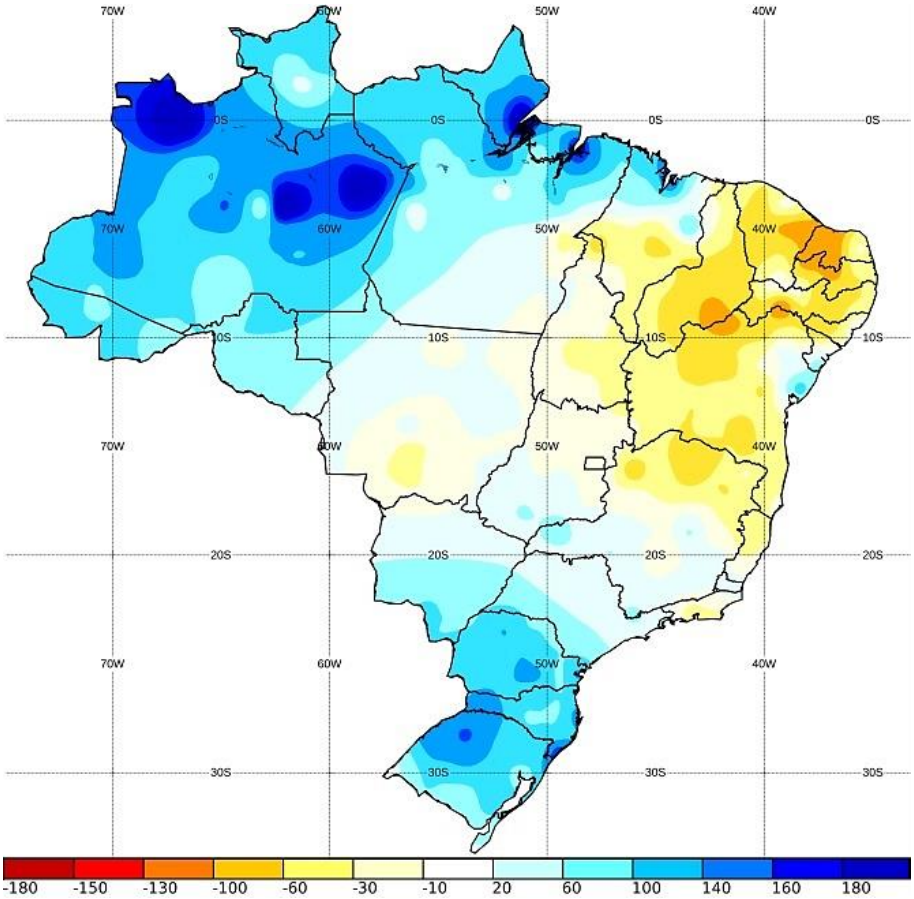

Figura 5. Déficit/Excesso hídrico, em mm, para as regiões do Brasil nos primeiros meses de desenvolvimento da cana-de-açúcar em 2015. Fonte: Adaptado Inmet, 2016.

De acordo com a Figura 5, para os primeiros meses (março, abril e maio), o desenvolvimento da cana-de-açúcar na safra de 2015, apresentou ocorrência de déficit hídrico (-10 a – 60 mm) nas principais regiões de expansão da cultura.

O déficit hídrico de plantas de cana-de-açúcar pode ocorrer nas mais variadas regiões de plantio da cultura e contrário ao senso comum, o déficit hídrico não limita-se somente em regiões áridas e semiáridas. Tem-se na literatura, uma série de trabalhos identificando que regiões consideradas úmidas, com a distribuição irregular das chuvas e altas temperaturas podem limitar o crescimento das culturas, provocando a redução das folhas e o acúmulo de substancias indesejáveis para as plantas, tais como enzimas oxidativas, impactando a produção final (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Segundo dados apresentados pelo IEA (2015) e CATI (2015), para o estado de São Paulo, região mais produtiva da cultura, na safra de 2014/2015, aproximadamente 80% da área total cultivada apresentou precipitações abaixo dos 1.200 mm esperados, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Área Total de Cana-de-açúcar no Estado com Precipitação Inferior e Superior à 1.200 mm, Estado de São Paulo, safra de 2014/2015.

Descrição	Área Total	Participação
	(ha)	(%)
Área plantada com cana-de-açúcar com precipitação < 1.200 mm/ ano	4.855.328,6	80
Área plantada com cana-de-açúcar com precipitação > 1.200 mm/ ano	1.211.777,6	20
Área total plantada no estado	6.067.106,3	100

Fonte: Adaptado de IEA, 2015.

Segundo pesquisas realizadas por Silva et al. (2008) em cana-de-açúcar, os autores observaram que na existência de um estresse hídrico, a cultura manifesta diversas mudanças específicas e morfofisiológicas, tais como a diminuição na altura das plantas, redução no diâmetro de colmos, queda de folhas verdes, porcentagem diminuta da área foliar, dentre outras.

Algumas das modificações ocorridas devido ao déficit hídrico são mecanismos de defesa da planta, que quando em estresse, podem apresentar o fechamento dos estômatos, fenômeno que evita a perda de água para a atmosfera, que nada mais é que uma resposta evolutiva da planta, visando evitar ou retardar a sua morte no campo.

Plantas de cana-de-açúcar que sofrerão algum estresse hídrico durante as primeiras fases de seu desenvolvimento, acabam apresentando limitações nos processos fisiológicos, tais como um decaimento na taxa de divisão celular e alongamento das células, diminuição na massa e acúmulo de matéria seca das plantas, e crescimento em altura e índice de área foliar limitados.

É necessário que em áreas de cultivo com potencial para a ocorrência de déficit hídrico, o produtor realize técnicas de manejo em conjunto com sistema de irrigação na cultura de cana-de-açúcar (Figura 6).

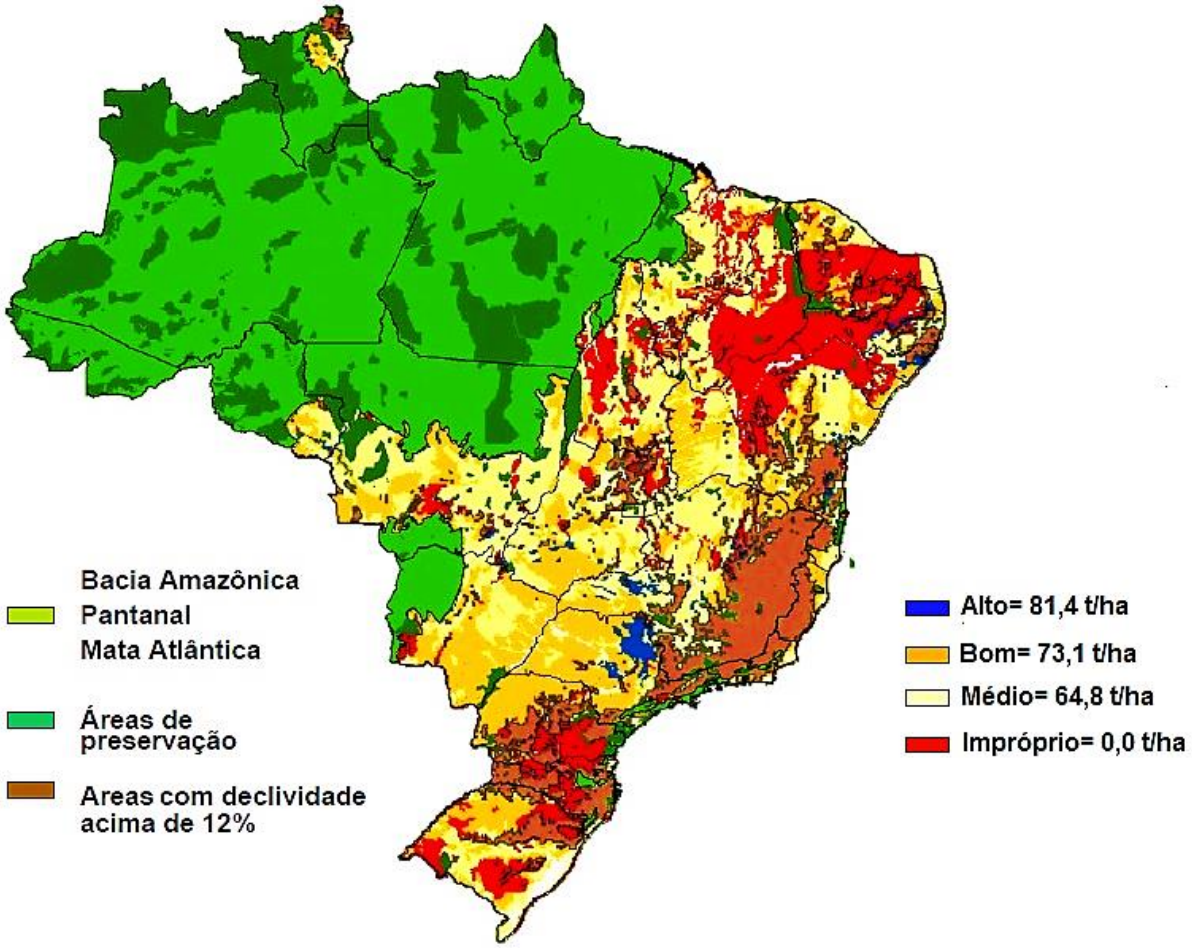

Figura 6. Regiões no Brasil com maior potencial de produção de cana-de-açúcar sem irrigação. Fonte: Adaptado de CGEE, 2007.

Observa-se na Figura 6 que a maior parte das regiões no País onde se produz a cultura de cana-de-açúcar poderia apresentar alto desempenho de produtividade se fossem utilizadas técnicas de manejo e controle da irrigação.

Diversos estudos indicam que irrigar a cana-de-açúcar no momento ideal é a chave para proteger as plantas dos possíveis danos causados pelo estresse hídrico, além de permitir ampliar o tempo de exploração da planta no campo, aumentando o número de colheitas e tornando o rendimento do ponto de vista econômico mais eficiente, principalmente nas fases de brotação, perfilhamento e alongamento dos colmos, fase em que ocorre o enriquecimento em sacarose (TRINTINALHA et al., 2004; INMAN-BAMBER e SMITH, 2005, DALRI et al., 2008).

De acordo com Gava et. al. (2011), é possível verificar respostas positivas na produtividade final da cana-de-açúcar irrigada, por meio da análise de um conjunto de

fatores, tais como a quantidade de água e fertilizantes aplicados, manejo de irrigação, idade de corte e do tipo de solo e clima. Entender as variáveis ambientais que mais afetam no desenvolvimento da cultura ao produtor de cana-de-açúcar possibilidade a execução de um planejamento técnico de quanto e quando irrigar.

Para Leão et al. (2005), o monitoramento da umidade no solo permite obter maior controle do volume de água a ser irrigado, enquanto que o monitoramento do estresse hídrico possibilita definir o momento ideal para se realizar a irrigação. Controlar estas duas variáveis é importante para minimizar os danos causados pelo déficit e limitação hídrica na cultura, seja por excesso ou escassez de água.

O fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera proveniente de processos artificiais como a irrigação ou de forma natural como a precipitação é cometido pela evapotranspiração (ET_0), definida como a perda por evaporação do solo e consequentemente transpiração das plantas para o ambiente. O transporte de água nas plantas proveniente da diferença entre o potencial de água no solo e na atmosfera tem influência na irrigação das culturas e relaciona-se com a capacidade do solo em reter água, podendo ser estimado através da medição direta ou indireta da umidade, com o uso de modelos de balaço hídrico, dos quais relacionam a temperatura do dossel e o potencial de água no solo (SILVA, BORGES e ALBUQUERQUE, 2014).

O estudo do balanço hídrico é de extrema importância para o entendimento detalhado entre os processos de entrada (precipitação/irrigação), saída (evaporação/transpiração) e a conservação de água no solo. A evapotranspiração pode atingir níveis críticos para as plantas de cana-de-açúcar, normalmente quando a cultura encontra-se na fase de crescimento vegetativo, ou seja de, de alongamento dos colmos (KEATING et al., 1999; SANTOS, SUZUKI e SATIKA, 2008).

Hartl (1939) efetuou estudos na cultura de cana-de-açúcar cultivada sobre regime controlado de irrigação e utilizou a evapotranspiração como princípio fundamental no manejo. As respostas obtidas pelo autor revelaram que a cana-de-açúcar sob regime controlado de irrigação foi capaz de sintetizar cerca de dez vezes mais sacarose, em relação às plantas não irrigadas, sendo um dos efeitos causados pela deficiência hídrica.

Diversos autores na literatura efetuaram pesquisas complexas envolvendo a cana-de-açúcar, seus estádios de desenvolvimento e o manejo empregado na cultura.

Os resultados indicam que as plantas apresentam resposta extremamente positiva à irrigação, sendo uma das respostas fisiológicas o aumento no comprimento médio das plantas irrigadas, chegando a atingir o dobro de comprimento do que em plantas sob regime de sequeiro (COELHO, BARBOSA e MARCIEL, 2002; DANTAS NETO et. al., 2006; DE OLIVEIRA, BRAGA e SANTOS, 2014).

A irrigação complementar ou suplementar da cana-de-açúcar é uma ferramenta que vem cada vez mais sendo utilizada para promover a verticalização da produção canavieira, principalmente devido à incorporação de novas áreas agrícolas em crescente expansão, sobremaneira as que apresentam maiores variações ambientais, como a deficiência hídrica, fato este que acaba influenciando na produtividade e qualidade das lavouras.

2.6. EXPOSIÇÃO SOLAR E DECLIVIDADE DO TERRENO

A produção de cana-de-açúcar no Brasil abrange extenso território onde ocorrem as mais diversas variáveis ambientais. A particularidade entre o tipo de solo e os fatores climáticos que ocorrem nas regiões produtivas da cultura acabam gerando inúmeros cenários produtivos, onde cada parâmetro do ambiente de produção acaba interferindo diretamente na tomada de decisão do produtor rural (DIAS, 1997).

Toda a esfera que compreende o processo produtivo de cana-de-açúcar deve ser observada, pois o sistema “solo-planta-atmosfera” sofre também influência da topografia do terreno. Áreas cuja característica principal é a declividade do terreno variam em relação à radiação total recebida durante um ciclo produtivo, devido a forma como estão expostas aos pontos cardeais terrestres e ao movimento da Terra em relação ao sol.

Para Coan et al. (2012), superfícies com diferentes exposições em relação ao sol (norte-sul, leste-oeste) e declividades do terreno, divergem entre si nas quantidades recebidas de radiação solar, a qual é o fator primário que condiciona os elementos climatológicos e fisiológicos relacionados ao crescimento e estabelecimento das culturas. Somente o Estado de São Paulo, maior região produtora de cana-de-açúcar do Brasil, ocupa um território maior que 360 mil hectares com áreas cujo o declive supera 12% (Figura 7).

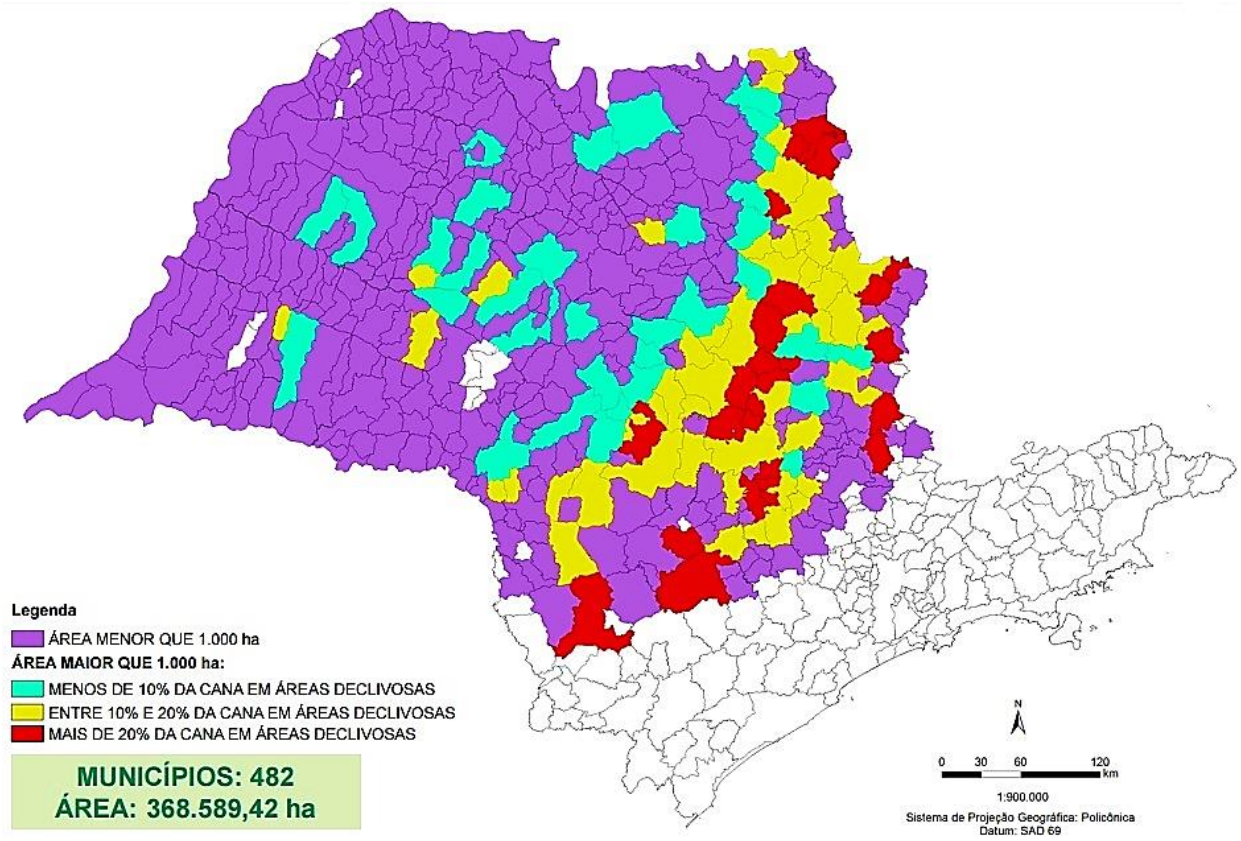

Figura 7. Municípios no Estado de São Paulo com plantio de cana-de-açúcar acima de 12% de declividade. Fonte: Adaptado de GITE, 2014.

De acordo com trabalhos realizados por Braunbeck e Oliveira (2008) e Júnior, Abrahão e Tereso (2013), atualmente a tendência dos produtores rurais é de administrar áreas produtivas de cana-de-açúcar com declividade de terreno superior a 10%. Portanto, a indústria de máquinas agrícolas vem desenvolvendo equipamentos de plantio, manejo fitossanitário e colheita capazes de operar em terrenos declivosos.

O acúmulo da radiação incidente em diversos cenários produtivos e a avaliação técnica sobre seu efeito no funcionamento de processos fisiológicos das plantas são de caráter fundamental no aprimoramento de novas ferramentas, das quais apresentam potencial necessário para aprimorar os sistemas produtivos e auxiliar o produtor rural na melhor tomada de decisão, utilizando a topografia do terreno como uma ferramenta capaz de melhorar a produtividade final da cultura.

Em uma bacia hidrográfica ocorre uma infinidade de elevações e depressões no terreno. A geografia desuniforme promove à bacia uma característica

extremamente importante, que é o direcionamento da água dos pontos de maior altitude para os de menores. Estas mudanças nas superfícies dos terrenos são responsáveis por afetarem diretamente na evapotranspiração potencial e nas temperaturas médias ao longo da bacia, sendo diretamente proporcionais a declividade e exposição do relevo (VIANA, GONÇALVES e ROTUNNO FILHO, 2013).

Diversos projetos de irrigação e drenagem são dimensionados principalmente de acordo com os valores de evapotranspiração da área e através de estudos que envolvem a variabilidade topográfica como fonte de dados para dimensionar modelos preditivos sobre o balanço hídrico de regiões específicas. Tais métodos são de extrema importância para gerar índices de zoneamento climático que ajudem a melhorar o potencial de produtividade das culturas cultivadas em superfícies irregulares do terreno (BENINCASA, 1976; CARAMORI e ARITA, 1988; TURCO et al., 1997; TURCO, MILANI e FERNANDES, 2012).

O cultivo de cana-de-açúcar sofre interferência direta das variáveis ambientais que ocorrem ao longo da superfície e subsuperfície do terreno. O ciclo da cultura, assim como os processos fisiológicos, sofrem influência direta do clima (precipitação, radiação solar e temperatura) e dos parâmetros físico-químicos do solo (disponibilidade hídrica e nutrientes), fatos que geram dados capazes de correlacionarem irregularidades na forma do terreno com produtividade agrícola da cana-de-açúcar. O estudo da cultura em ambientes com disponibilidade específica de recursos (água, solo e radiação solar), pode gerar enorme quantidade de informações para adequar o melhor manejo e cultivo, sendo possível explorar ao máximo o local de produção para promover o melhor rendimento e consequentemente maior lucratividade ou competitividade para os produtores de cana-de-açúcar (CESAR et al.,1987; DIAS et al.,1999; MAULE, MAZZA e MARTHA, 2001).

Para Sanchez et al. (2012), utilizar as relações do solo com a topografia da área produtiva torna-se uma ferramenta base na identificação e mapeamento de zonas de manejo específico, modelando a variabilidade do terreno e dando respostas mais precisas ao longo que o terreno diverge. Estas técnicas são capazes de promoverem ao produtor rural a capacidade de tomar a melhor decisão sobre o manejo de uma área.

Em resposta à análise e interpretação dos dados da variabilidade espacial do terreno, o produtor de cana-de-açúcar poderá elaborar a melhor tomada de decisão e realizar um manejo preciso em locais onde o potencial produtivo é limitante ou ocioso.

2.7. TERMOMETRIA A INFRAVERMELHO

2.7.1. A TECNOLOGIA E O USO NA AGRICULTURA

Em diversas áreas da ciência, tais como engenharias (civil, elétrica, mecânica e Aeronáutica) e na medicina, a temperatura é uma das grandezas físicas mais estudadas, cuja variação ocorre de acordo com características particulares do sistema estudado ou devido ao tempo. Utilizar a temperatura no estudo de fatores bióticos e abióticos é de fundamental importância para avaliar-se as condições de qualidade e integridade de um produto, equipamento, elemento e processos. Na área da biologia e ciências agrárias o uso da temperatura pode indicar diversos fatores relacionados ao habitat das culturas, fatores como densidade de população, estresses bióticos e abióticos, assim como caracteres genéticos evolutivos.

No início dos anos 70, com o desenvolvimento de termômetros a infravermelho portáteis e de baixo custo, foram acrescentadas pesquisas sobre o uso de sensores remotos para medição da temperatura do dossel vegetativo, utilizadas em estudos de relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera. É uma ferramenta de fácil utilização e rápida resposta na detecção da ocorrência de estresse hídrico (WANJURA e UPCHURCH, 1991; FERNANDES, 2010; TRENTIN et al., 2011).

O uso de índices de estresse hídrico somente tornou-se possível com o advento da termometria infravermelha, um método que possibilita a medição da temperatura da porção superior do dossel vegetativo sem a necessidade de contato físico com as folhas (Figura 8).

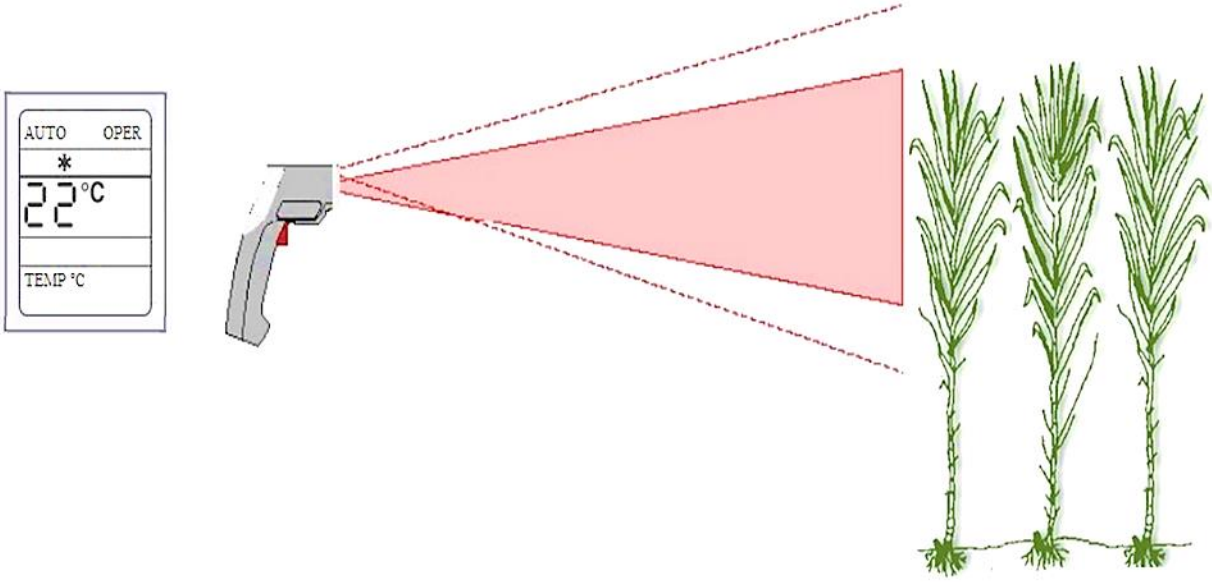

Figura 8. Esquema do espectro infravermelho do termômetro manual. Fonte: Adaptado de Infratemp (2010) e Gascho e Shih (1983).

O valor obtido corresponde à média da temperatura medida dentro do campo de abrangência do sensor. A temperatura relativa de um alvo é obtida pelo sensor que capta uma amostra da radiação térmica infravermelha, convertendo-a em um sinal elétrico, cuja voltagem é proporcional à radiação captada, emitida pela folha, caracterizando-se por estar composta principalmente pela parte infravermelha do espectro, enquanto que sua magnitude depende da temperatura (SANMARTIN e ACEVEDO, 2001).

De acordo com Campbell e Norman (1998), radiômetros que operam na faixa do infravermelho são comumente utilizados na medição de temperaturas nesta faixa de energia radiativa e são chamados de termômetros a infravermelho, já que são projetados para estimar a temperatura da superfície, sendo pouco influenciados pela intervenção atmosférica.

Autores como Lebourgeois et al. (2010) e Batalha (2011), discutem o surgimento de numerosos índices de estresse hídrico que ao longo do tempo foram investigados com o aparecimento de sensores a infravermelho. No entanto estes índices levam em consideração diversos fatores intrínsecos e condições meteorológicas específicas, necessitando de grande quantidade de tempo, excessiva

mão-de-obra e onerosos aparatos tecnológicos por parte do produtor rural para a determinação dos dados nas condições de campo.

As principais vantagens da termometria infravermelha, sobre técnicas convencionais de detecção do estresse hídrico (sintomas visuais, condutância estomática, fluxo de seiva, balanço de água no solo), são a facilidade e a rapidez com que as medidas de temperatura do dossel vegetativo podem ser obtidas.

Stockle e Dugas (1992) observaram que quando uma cultura como a cana-de-açúcar começa a sofrer estresse por falta de água, a condutância dos estômatos e a troca de calor latente são reduzidas, o efeito de resfriamento da evaporação diminui e as folhas apresentam-se com maior temperatura em relação a uma cultura não estressada. Esta diferença na temperatura do dossel vegetativo pode ser facilmente captada com o uso da termometria a infravermelho, e posteriormente utilizada como ferramenta para o manejo da irrigação.

Segundo pesquisas realizadas por Jones et al., (2002), Suarez et al. (2008) e García-Tejero et al. (2011) nas culturas da uva, citros e morango, respectivamente, os autores destacam que com a saída de água pelo processo de transpiração foliar, o calor latente de evaporação sobre a superfície da folha é dissipado, e consequentemente há redução da temperatura da folha. As culturas quando em escassez ou déficit hídrico no solo, apresentam como resposta fisiológica a diminuição da condutância estomática e fechamento dos estômatos. Este reflexo de sobrevivência da planta tem por objetivo diminuir ou cessar a transpiração até que as condições ambientes voltem a ficar adequadas para a planta.

Em culturas cuja área produtiva apresenta limitações hídricas, as plantas entram em estresse, e uma das consequências dessa limitação hídrica é a elevação da temperatura do dossel. Uma analogia direta nos permite dizer que as plantas também sofrem de um tipo de “hipertermia”, assim como animais em diversas situações de estresse fisiológico, sinalizando que algo está errado naquele organismo.

O uso de termômetros e sensores a infravermelho no monitoramento da temperatura do dossel das plantas é capaz de gerar respostas rápidas e não destrutivas, sinalizando ao operador o nível de estresse, o índice de estresse hídrico e a taxa de evapotranspiração da plantas.

Para Wang et al. (2010), em estresse hídrico as plantas respondem fisiologicamente aumentado sua temperatura, o que torna esta resposta ao ambiente um excelente índice do status hídrico da cultura em determinado momento, podendo-se dizer que a temperatura do dossel das plantas é uma variável de fundamental importância na avaliação e monitoramento do estresse hídrico.

Através de pesquisas realizadas por Idso et al. (1981) e Jackson (1982), foi constatado que a investigação do aumento da temperatura das plantas em relação a temperatura do ambiente natural é de fundamental importância para criar uma ferramenta capaz de monitorar o Índice de Estresse Hídrico das Culturas (Crop Water Stress Index – CWSI). A correlação entre temperatura do ar (Tar) e temperatura da cultura (Tc), responde a uma pergunta fundamental para a agricultura. É possível estimar o estresse hídrico das plantas de forma rápida e sem que haja interferência direta? A resposta é que sim, e através desta ferramenta sabe-se que a temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor apresentam relações lineares específicas.

O Índice de Estresse Hídrico (IEH) das Culturas também é uma tecnologia capaz de proporcionar ao operador uma resposta rápida e precisa, ou seja, a taxa e o padrão de estresse hídrico ao longo dos dias ou em algum dia específico para as culturas, inclusive a cana-de-açúcar. Com esse método o produtor pode avaliar em qual momento no campo a cultura sofre mais com o estresse hídrico, determinar através de índices de temperatura o instante exato para realizar o manejo da irrigação e evitar que ocorram danos as plantas.

Adaptar o método do IEH, em diferentes cenários produtivos, onde há variação abrupta da exposição do terreno à radiação solar, de acordo com cada período de desenvolvimento da cultura é de fundamental importância para gerar dados de pesquisa, técnicas e modelos preditivos de manejo, para cana-de-açúcar e para outras culturas irrigadas (GARCIA, 2000; SILVA et al. 2008; MAZARON, 2013).

Jackson (1982) e Marchiori (2004), relatam a importância do monitoramento da radiação solar para as culturas, pois o saldo de radiação incidente nas plantas afetam diretamente o crescimento, desenvolvimento e regime térmico, sendo de caráter fundamental na taxa de evaporação e eficiência da produção agrícola (fotoperíodo crítico). Um fator importante para a agricultura irrigada é o uso da variável radiação solar incidente, proveniente do balanço energético, como parâmetro importante na

mensuração da demanda hídrica disponível, pois de acordo com a escassez de água no solo, o processo de transpiração é reduzido e ocorre acúmulo de energia na forma de calor na superfície das folhas.

Dados apresentados por Pfister, Koehler e Hellweg, (2009) e Growing Blue®, (2017), revelam o nível médio de estresse hídrico para cada país, sendo que quanto mais próximo de 1,0 maior é o nível de estresse hídrico (Figura 9).

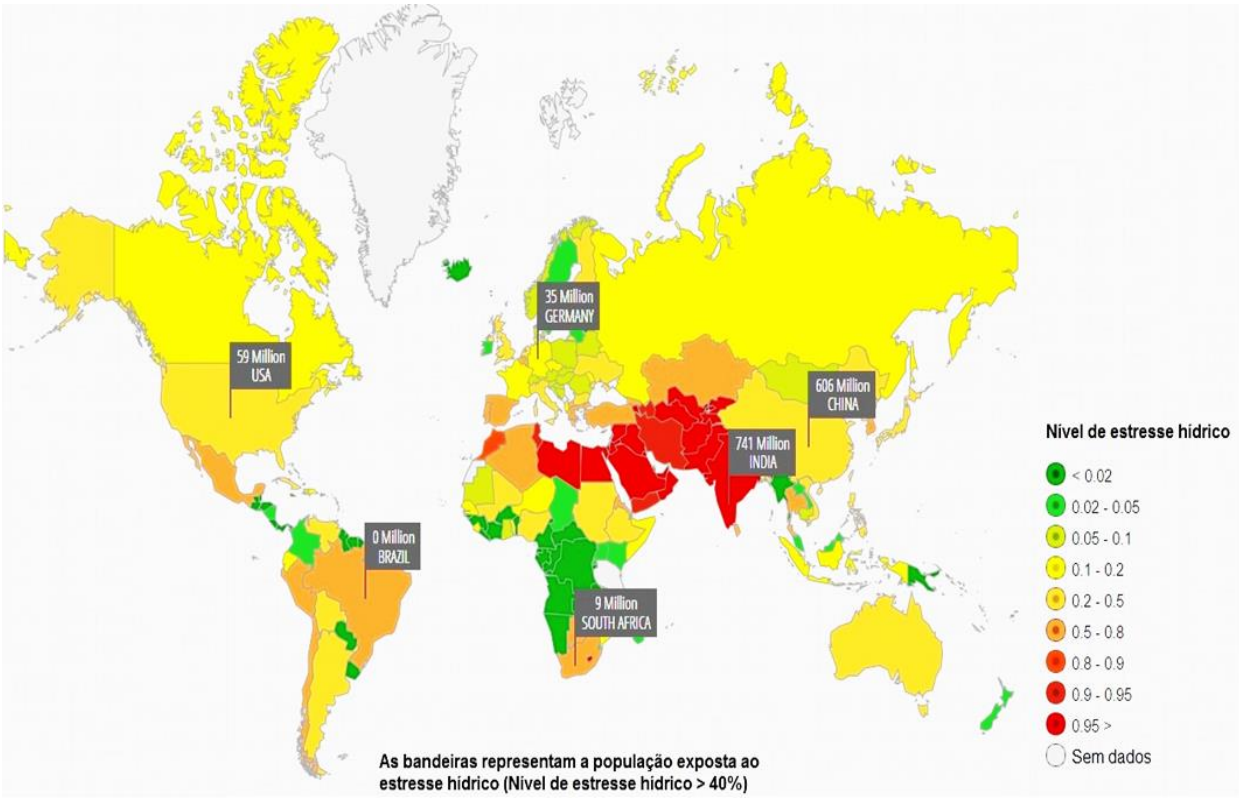

Figura 9. Nível de Estresse Hídrico para agricultura e população humana, nos diferentes países. Fonte: Adaptado de Growing Blue®, 2017.

De acordo com os dados apresentados na Figura 9, o Brasil encontra-se com nível de estresse hídrico médio de aproximadamente 0,65, ainda não atingindo diretamente a agricultura e população brasileira, como ocorre por exemplo na Alemanha, Estados Unidos e China, países cujo nível de estresse hídrico é menor que o do Brasil. Isso destaca a importância de realizar cada vez mais pesquisa na área, pois o nível de estresse hídrico poderá no futuro afetar diretamente a população e a agricultura brasileira.

No Brasil, para as safras de 2013/2014 na cana-de-açúcar, ocorreu um déficit hídrico severo aliado a uma anomalia climática que aumentou cerca de 5,5% na temperatura do ar e os resultados desse fenômeno meteorológico foram quedas na produção de cana-de-açúcar nas principais regiões mais produtivas no Estado de São Paulo (Figura 10).

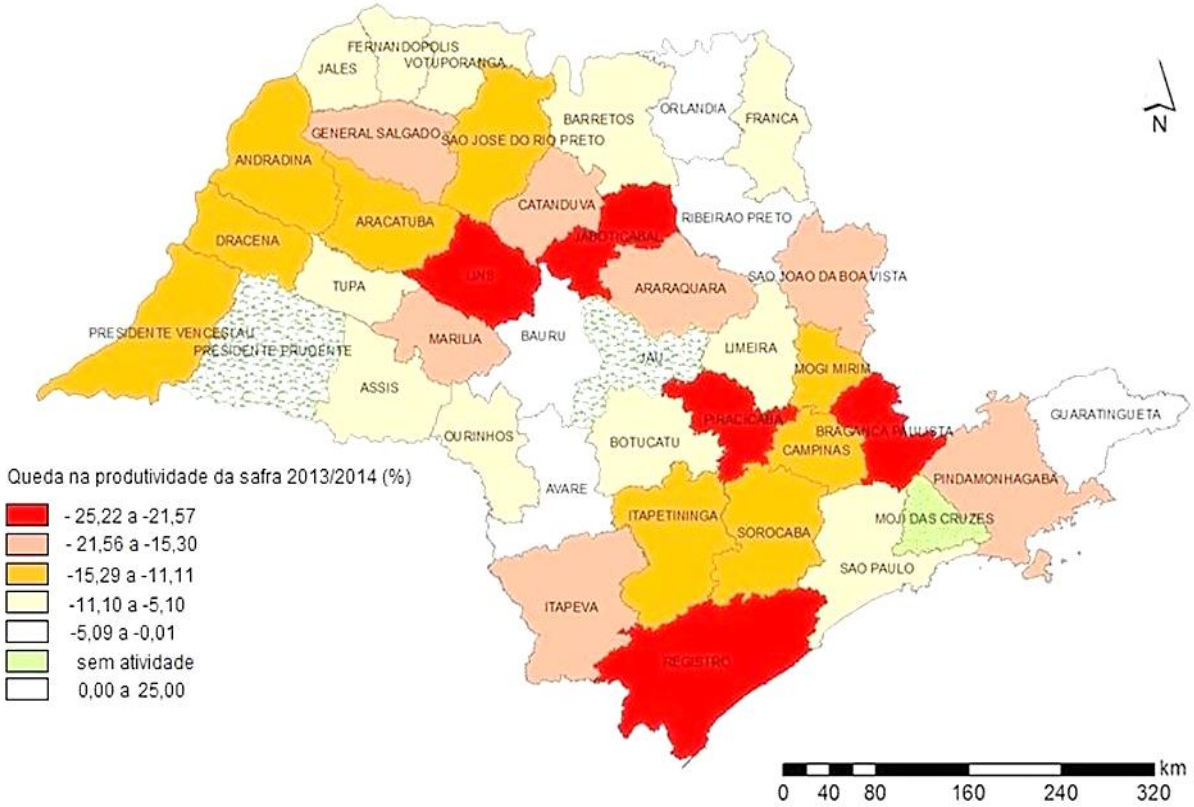

Figura 10. Nível de Estresse Hídrico para agricultura e população humana, nos diferentes países. Fonte: Adaptado de Growing Blue®, 2017.

O déficit hídrico durante as safras, descritas na Figura 10, desencadeou um significativo estresse hídrico nos canaviais paulistas e gerando perdas na ordem de 25% para os produtores de açúcar e álcool, com destaque para os municípios de Piracicaba, Jaboticabal, Bragança Paulista, Lins e Registro (CTC, 2015; IEA, 2015).

Diversos autores trabalhando com culturas irrigadas destacam a importância de se utilizar o método de determinação do estresse hídrico a partir da termometria infravermelha, pois esta é uma técnica cujo uso pode ser pontual, através de

termômetros manuais, ou remoto, por meio de aeronaves remotamente tripuladas (Drones), aviões e plataformas orbitais, permitindo desta forma a medição de grandes áreas cultivadas, como no caso da cultura de cana-de-açúcar (ZARCO-TEJADA et al. 2012).

Tais métodos são de extrema importância para gerar respostas sobre as condições hídricas do solo através das culturas e os resultados obtidos garantem ao produtor rural uma maior eficácia na utilização de técnicas agronômicas como o controle da irrigação, o estresse induzido para melhorar a concentração de açúcares em frutos e até mesmo em métodos de fenotipagem de plantas.

O uso correto da temperatura no monitoramento dos aspectos morfofisiológicos das culturas pode contribuir para a melhor tomada de decisão do produtor, impactando diretamente na qualidade do produto final e consequente eficiência no campo, gerando lucros às empresas. A ciência que envolve o estudo da termometria a infravermelho é capaz de explorar diversas áreas dentro da agropecuária e seu uso como ferramenta no monitoramento de grandes culturas como a cana-de-açúcar, podendo contribuir para a prevenção de danos pela falta de água e consequentemente aumento na matéria prima final.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi desenvolvida em área experimental do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal, SP, situada a 21˚ 14’ 05” de latitude Sul, 48° 17’ 09” de longitude Oeste e altitude de 614 m, em uma estrutura denominada “Bacia Hidrográfica Experimental”, com superfícies de 10 m^2 (3,5 m x 3,0 m), feitas de alvenaria no seu contorno, (Figura 11A e B) descrita com detalhes por Turco et al. (1997).

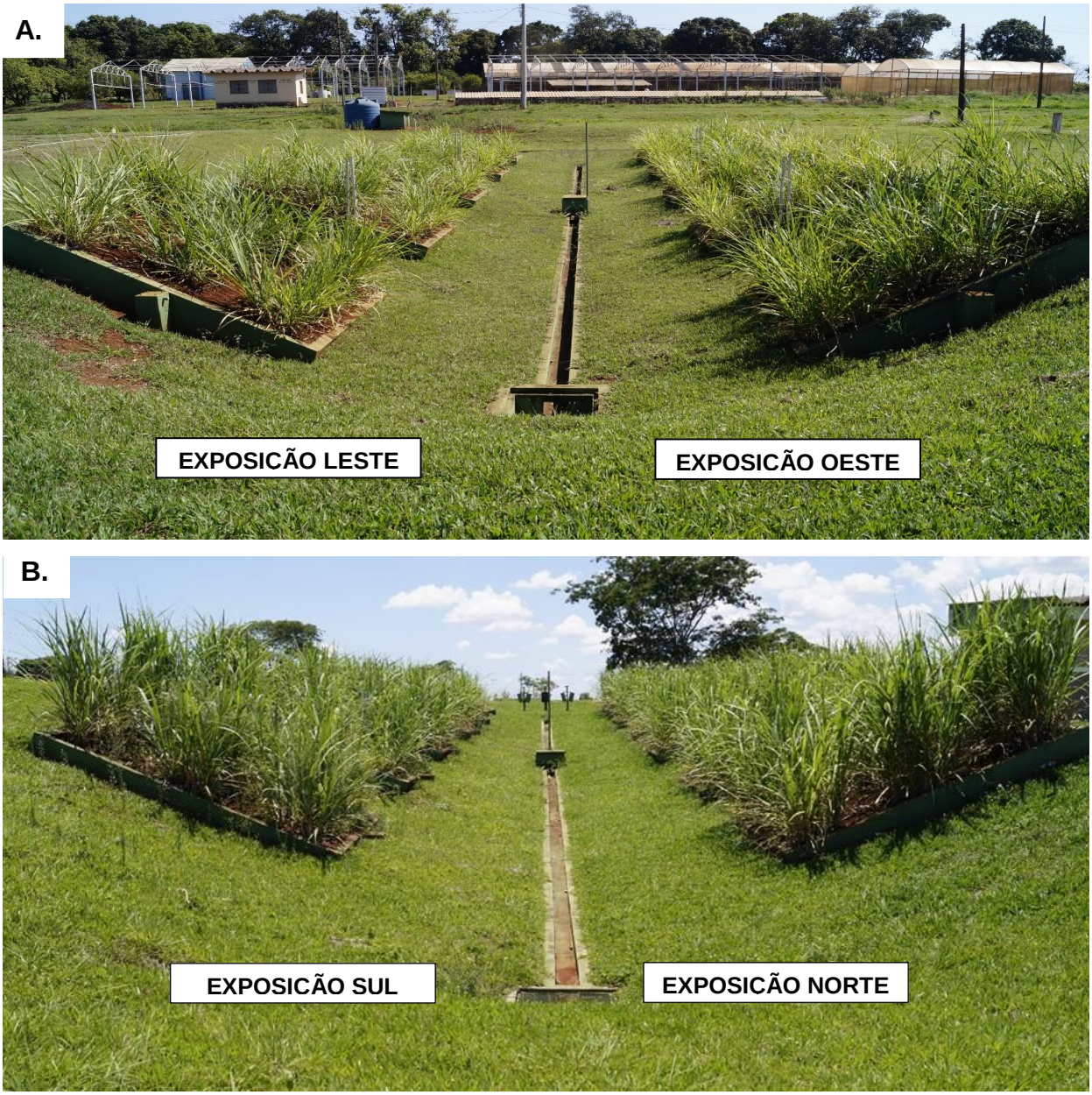

Figura 11. Bacia Hidrográfica Experimental, Jaboticabal-SP. Foto: Rodrigo Garcia Brunini, 2015.

Todas as superfícies foram preenchidas com solo convenientemente homogeneizado do tipo Latossolo Vermelho Escuro, Eutrófico (Embrapa 2013). O clima para a região de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Cwa, precipitação média anual de 1.400 mm, temperatura média anual de 22 °C e umidade relativa média do ar de 70% (ANDRIOLI e CENTURION 1999).

O experimento foi realizado, no período de 08/04/2015 a 06/04/2016 (com vistas a abranger as fases de perfilhamento, crescimento e maturação da cultura), na

qual foram utilizadas dez superfícies que simulam terrenos com exposições e declividades caracterizadas como H1 (horizontal sem déficit hídrico), H2 (horizontal sob déficit hídrico), 20N (20% de declividade, exposição norte sob déficit hídrico), 20S (20% de declividade, exposição sul sob déficit hídrico), 40N (40% de declividade, exposição norte sob déficit hídrico), 40S (40% de declividade, exposição sul sob déficit hídrico), 20E (20% de declividade, exposição leste sob déficit hídrico), 20W (20% de declividade, exposição oeste sob déficit hídrico), 40E (40% de declividade, exposição leste sob déficit hídrico) e 40W (40% de declividade, exposição oeste sob déficit hídrico). Em todas as superfícies foi cultivada a variedade de cana-de-açúcar RB855453, com profundidade de sulco de 0,30 m, em seis linhas de plantio com espaçamento de 1 m entre linhas e 0,30 m entre plantas (RIDESA 2010).

3.2. DADOS METEREOLOGICOS

Os dados meteorológicos referentes ao período de implantação e condução do experimento foram fornecidos pela Estação Meteorológica Automatizada da marca Davis Instruments do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, com abrangência do ciclo da cultura de cana-de-açúcar. A estação encontra-se equipada com um sistema de aquisição de dados (Vantage Pro Plus Wireless), onde foram medidas a radiação solar global (sensor Standart- modelo 6450); a temperatura e umidade relativa do ar (sensor externo – modelo 7859); a velocidade do vento (anemômetro Standart – modelo 7911), e a precipitação pluviométrica (pluviômetro – modelo 7852, Rain Collector).

3.3. USO E MANEJO DA IRRIGAÇÃO

No centro de cada superfície, foram instalados três tensiômetros a 0,20 m e três tensiômetros a 0,40 m de profundidade, respectivamente, para monitorar o comportamento do potencial de água no solo. A superfície H1 foi mantida na capacidade de campo, sem ocorrência de déficit hídrico induzido na condução do experimento, as demais superfícies (H2, 20N, 20S, 20E, 20W, 40N, 40S, 40E e 40W) foram irrigadas quando a capacidade de água disponível do solo, que é a reserva

utilizável em mm, atingisse o valor de 50%. Para determinar quando o solo atingiu esta condição foi realizado o seguinte procedimento:

A determinação do potencial matricial da água no solo (umidade crítica do solo) se deu pela seguinte Equação 1.

$$\Psi_m = -12{,}6h + h_1 + h_2 \quad (1)$$

Em que:

Ψ_m - potencial matricial da água no solo (cmca);

h - altura da coluna de mercúrio (cm);

h1 - altura da cuba de mercúrio em relação a superfície do solo (cm);

h2 - profundidade de instalação do tensiômetro (cm).

Para as profundidades de 0,20 e 0,40 m o potencial matricial da água no solo foi convertido em umidade utilizando a seguinte expressão matemática desenvolvida por Van Genuchten (1980), descrita por Dourado Neto et al. (1995) equação 2, considerando que para a umidade de capacidade de campo (θ_{cc}) a tensão da água no solo é 103,32 cmH_2O e umidade atual (θ_A) obtida diariamente com a tensão da água a partir das leituras dos tensiômetros.

$$\theta_A = \theta r \frac{(\theta s - \theta r)}{[1+(\alpha * |\Psi_m| n]m} \quad (2)$$

Em que:

Θ_A – umidade atual (cm^{-3} cm^{-3});

Θ_r – umidade residual (cm^{-3} cm^{-3});

Θ_S – umidade do solo saturado (cm^{-3} cm^{-3});

Ψ_m – potencial matricial da água no solo (cmca);

α, n e m – coeficientes de ajustes gerados pelo modelo de Van Genuchten (1980).

Os valores das constantes empíricas da equação 2 e as demais características físico-hídricas do solo da área, como valores médios para as camadas de 0 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m de profundidade, podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Características físico-hídricas médias e constantes da equação de Van Genuchten (1980), para as camadas de 0 – 0,20 e 0,20 – 0,40 m de profundidade do solo da área experimental.

Profundidade (m)	Θcc	θc	θpmp	Ds (g cm³)	A (cm^{-1})	n	m	θs	Θr
	---- (cm^3 cm^{-3}) -----							--- (cm^3 cm^{-3}) ---	
0,00 – 0,20	0,38	0,339	0,30	1,13	0,0178	12,7127	0,1383	0,539	0,297
0,20 – 0,40	0,27	0,239	0,21	1,04	0,0182	17,7713	0,1432	0,506	0,209

θcc – umidade do solo à capacidade de campo; θc – umidade crítica do solo; θpmp – umidade do solo no ponto de murcha permanente; ds – densidade do solo; θs – umidade do solo saturado; θr – umidade residual do solo; A, n e m – coeficientes de ajuste gerados pelo modelo (Van Genuchten 1980).

Foram determinadas a capacidade de água disponível no solo (CAD, em mm), a água facilmente disponível no solo (AFD, em mm) e a reserva de água disponível no solo (RAD_f, mm) pelas seguintes Equações:

$$\mathrm{CAD} = (\theta\mathrm{cc} - \theta\mathrm{pmp}).\mathrm{Z} \quad (3)$$

$$\mathrm{AFD} = 0{,}5.\mathrm{CAD} \quad (4)$$

$$\mathrm{RADf} = (\mathrm{CAD} - \mathrm{AFD}) \quad (5)$$

onde:

$\theta\mathrm{cc}$ - umidade do solo cm^3 cm^{-3} à capacidade de campo (potencial de – 103,32 cmH_2O);

$\theta\mathrm{pmp}$ - umidade do solo cm^3 cm^{-3} no ponto de murcha permanente para o potencial mátrico de 15498.41 cmH_2O;

Z - profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (0,35 - 0,40 m) (PIRES et al 2001).

Para determinar quando irrigar em cada superfície, foi utilizado o método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) e corrigido para cada superfície, utilizando-se a metodologia descrita por Turco, Milani e Faria (2012), com o uso do coeficiente da cultura (Kc) de cana-de-açúcar (Tabela 3).

Tabela 3. Valores do coeficiente da cultura de cana-de-açúcar (Kc) para cultura de cana-de-açúcar.

Período de desenvolvimento	Dias do ciclo	Coeficiente (Kc) da cultura
Do plantio até 25% de cobertura	30 a 60dias	0,40 a 0,60
De 25 a 50% de cobertura	30 a 40 dias	0,75 a 0,85
De 50 a 75% de cobertura	15 a 25 dias	0,90 a 1,00
De 75% a cobertura completa	45 a 55 dias	1,00 a 1,20
Utilização máxima	180 a 330 dias	1,05 a 1,30
Início da senescência	30 a 150 dias	0,80 a 1,05
Maturação	30 a 60 dias	0,60 a 0,75

Fonte: Adaptado de Doorenbos & Kassam (1994).

A irrigação do tipo gotejamento em cada superfície foi realizada por meio da instalação de seis mangueiras de 3,5 m de comprimento, com gotejadores a cada 20 cm, em toda a sua extensão. O conjunto possuía uma vazão de 90 L h^{-1}. Na superfície H1 a irrigação foi efetuada sempre quando a umidade do solo atingisse o valor de capacidade de campo (θcc), mantendo o solo em cerca de 25% de umidade (Faria et al., 2012).

3.4. DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE ESTRESSE HÍDRICO - IEH

A fim de avaliar o índice de estresse hídrico (IEH) da cana–de–açúcar em cada superfície, realizou-se medições entre 11 e 13 horas de acordo com o déficit hídrico induzido, efetuando-se 10 leituras em cada parcela, com a medição da temperatura da cobertura vegetal e da temperatura do ar ambiente, ao mesmo tempo, com o uso do termômetro de infravermelho, do tipo portátil, FLUKE, modelo 62 MAX, e do termômetro de mercúrio (precisão ± 0,1 °C), respectivamente (FERNANDES, 2010), (Figuras 12A e B).

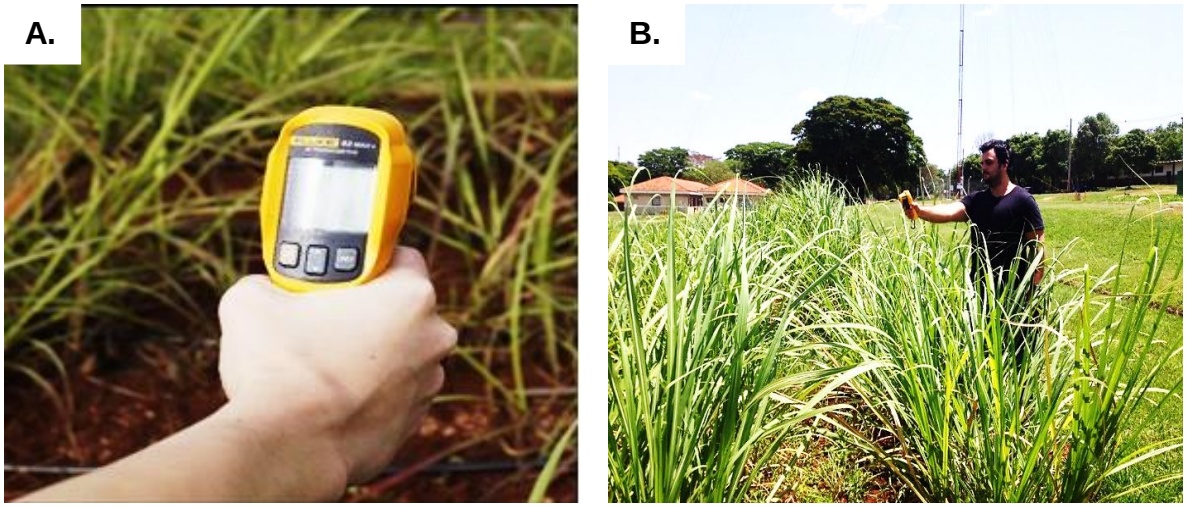

Figura 12. Termômetro infravermelho portátil, FLUKE, modelo 62 MAX (A) e determinação do índice de estresse hídrico diário das plantas. Foto: Rodrigo G. Brunini, 2015.

Para o cálculo do IEH efetuou-se a diferença entre as temperaturas médias da cobertura vegetal e a temperatura do ar conforme Idso, Jackson e Reginato (1977), que propuseram a seguinte Equação:

$$IEH = Tc - Ta \quad (6)$$

onde:

IEH – Índice de Estresse Hídrico Diário, em °C;

Tc – temperatura da cobertura vegetal, em °C; e

Ta – temperatura do ar, em °C.

Valores positivos do IEH indicam que a cultura encontra-se em estresse (FERNANDES, 2010).

Sendo assim, com o intuito de evitar possíveis erros amostrais, as leituras foram efetuadas com o sensor do aparelho posicionado em direção oposta ao sol, e o ângulo de inclinação de aproximadamente 30° com a horizontal (FERNANDES e TURCO, 2001).

A calibração do termômetro de infravermelho (±1°C) foi realizada no Laboratório de Instrumentação, Aquisição e Processamento (LIAP), do Departamento

de Engenharia Rural da FCAV/UNESP, utilizando-se um banho maria para Laboratório e fazendo-se variar sua temperatura de 0 - 60ºC. A temperatura da água era lida com termômetro de mercúrio de fundo de escala de 60°C, precisão ±0,1°C e com o termômetro infravermelho, simultaneamente, Figura 13.

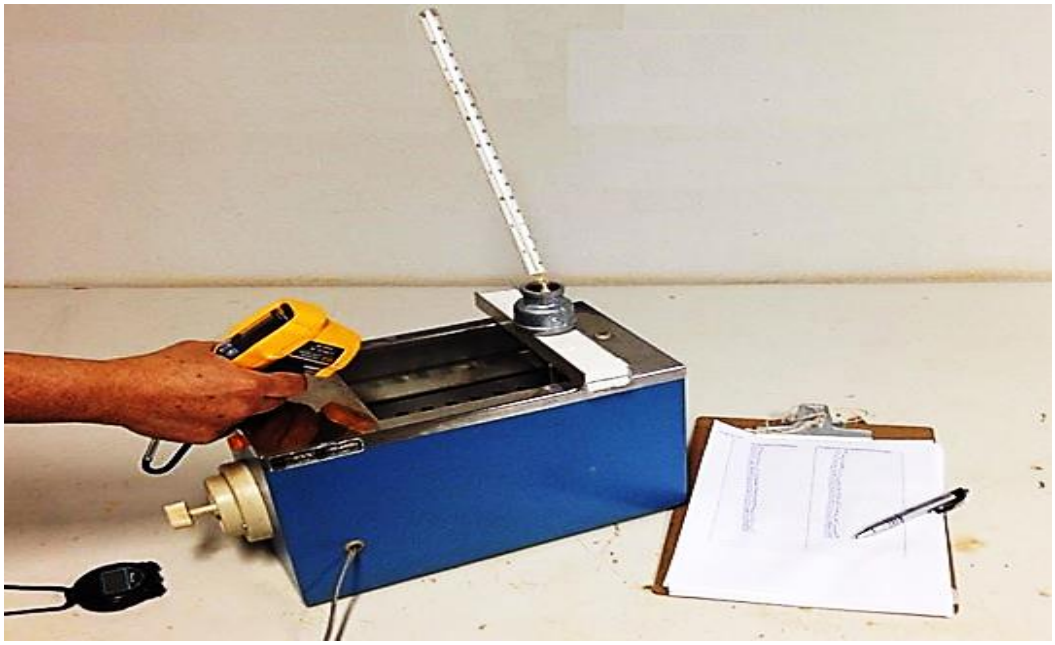

Figura 13. Calibração do termômetro de infravermelho. Laboratório de Instrumentação, Aquisição e Processamento (LIAP). Foto: Rodrigo G. Brunini 2015.

Com os valores obtidos efetuou-se uma correlação entre a temperatura do termômetro infravermelho e a do termômetro de mercúrio, corrigindo-se os valores obtidos após cada leitura efetuada no campo.

Caso as amostragens fossem realizadas imediatamente após cada irrigação ou precipitação, o valor acumulado do índice de estresse hídrico seria considerado zero, devido ás condições hídricas do solo serem favoráveis a cultura (BAVARESCO,1995).

3.5. ANÁLISES MORFOFISIOLÓGICAS

As variáveis morfológicas e fisiológicas foram determinadas por meio de coletas periódicas nas fases de perfilhamento, crescimento e maturação da cana-de-açúcar na linha central de todas as superfícies em três plantas, com três repetições. Foi

utilizado como bordadura a primeira linha em cada lateral e 0,50 m na entrada da linha analisada.

A escolha da folha a ser usada na mensuração, seguiu sistema de numeração proposto por Kuijper (1915) que consiste em designar como +1 a primeira folha de cima para baixo, que se apresenta inserida com a aurícula (colarinho) bem visível (Figura 14). As folhas de baixo passariam a receber a numeração +2, +3, etc.

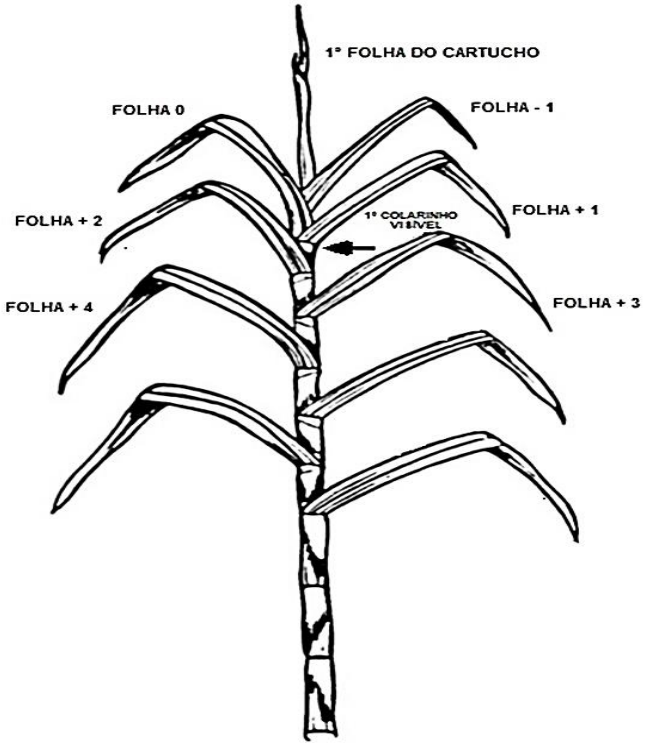

Figura 14. Sistema de numeração de folhas, Kuijper (1915).

Para estimar a taxa de perfilhamento da cultura, foi realizada dos 22 aos 70 d.a.e (fase de perfilhamento), a amostragem do número de perfilhos de maneira direta, em um metro linear, na linha central e no centro da parcela, em cada uma das repetições das diferentes superfícies.

A máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II (*Fv*/*Fm*) foi determinada nos períodos de estresse hídrico induzido, segundo método de Maxwell e Johnson (2000), onde as leituras foram realizadas entre 10:00 e 14:00 horas nas folhas +1, devidamente pré-escurecidas por 30 minutos, com auxílio de clipes específicos, antes de cada medida de fluorescência com um fluorômetro portátil (Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, EUA) (Figura 15A e B).

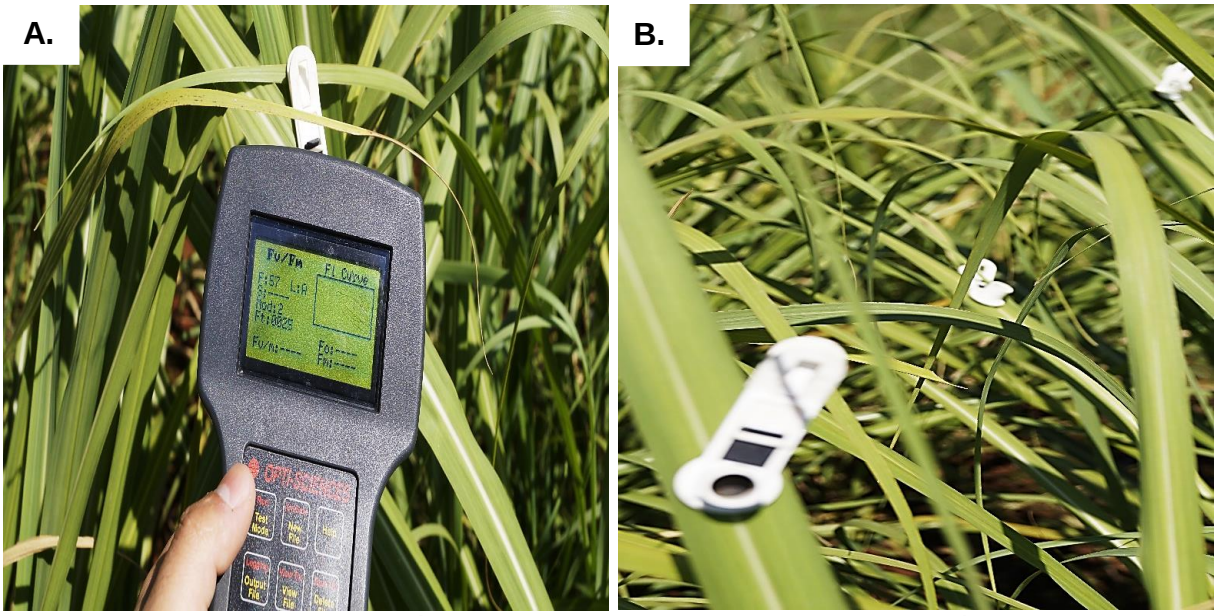

Figura 15. Fluorômetro Portátil para medição da eficiência fotoquímica (A) e clipes específicos para medição (B), na cultura de cana-de-açúcar. Foto: Rodrigo G. Brunini 2015.

Para a estimativa do Índice de Conteúdo de Clorofila (ICC), foi utilizado o clorofilômetro portátil CCM-200 Plus (Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, EUA), através da média de cinco leituras nas folhas +1, durante os períodos de estresse hídrico induzido (Figura 16). Segundo Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), o valor médio das leituras corresponde ao teor de pigmento na folha, e seu valor é equivalente à quantidade de luz transmitida pela folha em duas regiões de comprimento de onda, nas quais a absorção de clorofila é diferente, sendo diretamente proporcional a quantidade de clorofila presente na folha em determinado momento.

Figura 16. Clorofilômetro portátil para medição da clorofila na cana-de-açúcar. Foto: Rodrigo Garcia Brunini 2015.

Avaliou-se o potencial hídrico foliar (Ψw) entre 10:00 e 12:00 horas, quando as parcelas encontravam-se em déficit hídrico induzido (50% da reserva utilizável), exceto para o tratamento H1 (capacidade de campo), amostrando a extremidade da folha +2, cerca de 20 cm, do perfilho primário por meio de uma câmara de pressão do tipo Scholander (SoilMoisture Equipment, Santa Bárbara, CA, EUA), segundo metodologia proposta por De Almeida Silva et al. (2013) (Figura 17).

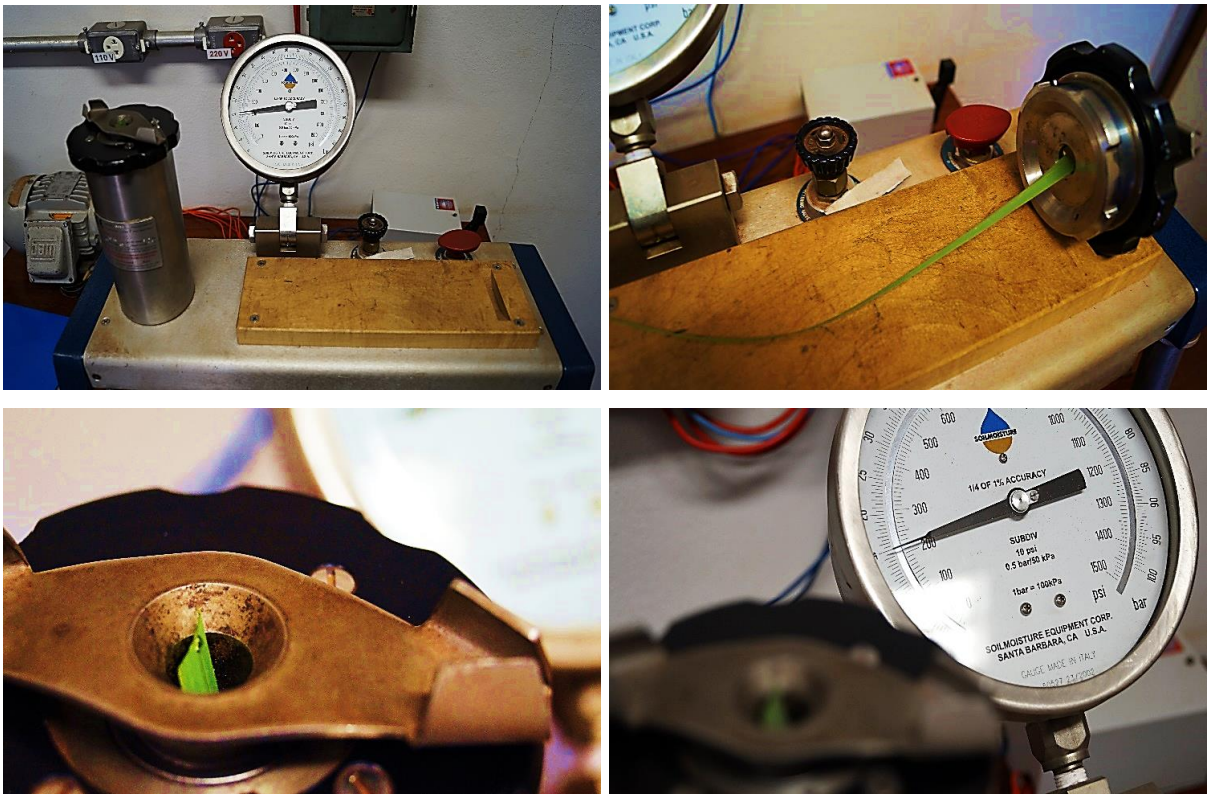

Figura 17. Método de medição do potencial hídrico foliar (Ψw) da cana-de-açúcar por meio da câmara de Scholander. Foto; Rodrigo Garcia Brunini 2015.

O crescimento da cultura foi avaliado durante o período dos 225, 239, 264, 293 e 323 dias após a emergência (d.a.e), por meio das variáveis: (i) altura da planta, em cm, medida com uma régua com resolução de centímetros, da base até a folha + 1, (ii) diâmetro do colmo, em mm, medido com paquímetro digital, abaixo da folha +1, e (iii) área foliar, mensurada a folha +3 segundo metodologia descrita por Hermann e Câmara (1999).

Ao final do experimento foi realizada a colheita no dia 05/04/2016 (Figura 18A), em seguida todas as plantas foram pesadas (Figura 18B) e a produtividade calculada através da massa total por metro em três repetições.

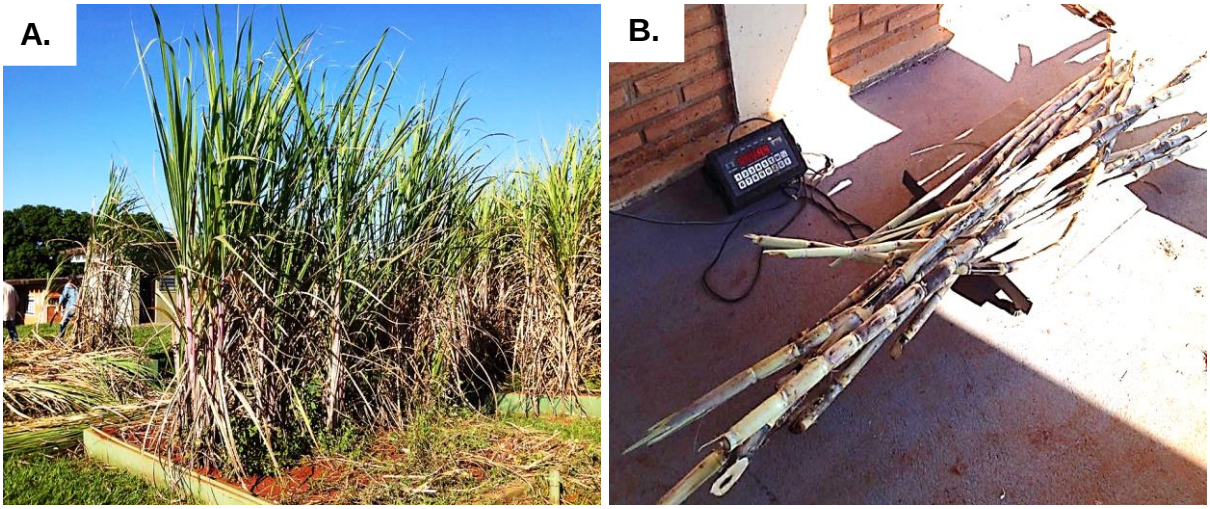

Figura 18. Colheita das parcelas (A) e pesagem (B) da cana-de-açúcar. Foto: Rodrigo G. Brunini 2015.

Os valores foram estimados para um hectare e os dados foram submetidos à análise de variância e aplicação do teste de Tukey ($p<0,05$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a Tabela 4, observa-se que para cada um dos tratamentos são apresentandos os valores de lâmina de água aplicados na irrigação e a variação de precipitação ocorrida durante a condução do experimento nos anos de 2015 e 2016. Verifica-se que para os meses de Agosto, Setembro e Outubro (fase de brotação e perfilhamento da cultura de cana-de-açúcar), foram aplicadas as maiores lâminas de irrigação nas superfícies estudadas de acordo com o método proposto, coincidindo com a menor precipitação durante este período (0,0, 24,6 e 33,0 mm de chuva, respectivamente).

Tabela 4. Lâmina d´água mensal recebida pela cultura em cada tratamento e a precipitação em mm, ocorridas durante o desenvolvimento do experimento. Jaboticabal, SP, 2015/2016.

Data	H1	H2	20N	20S	40N	40S	20E	20W	40E	40W	Precipitação
	(mm)										
Abril	13,4	13,4	15,5	9,3	16,8	6,5	13,5	11,9	13,0	11,1	0,0
Maio	71,2	71,2	82,5	49,3	89,9	34,1	71,7	62,6	69,0	58,9	73,8
Junho	76,7	76,7	89,0	52,5	97,1	36,1	84,1	73,4	80,9	68,8	19,0
Julho	74,1	74,1	85,5	51,6	93,0	35,8	74,7	65,5	71,9	61,6	44,9
Agosto	105,7	135,3	122,0	73,5	132,6	51,0	106,5	93,2	102,5	87,8	0,0
Setembro	104,9	151,3	120,6	79,1	140,6	61,2	116,5	92,6	112,1	96,9	24,6
Outubro	115,5	76,9	118,2	118,1	123,8	100,3	119,4	106,3	127,0	99,9	33,0
Novembro	74,6	64,7	64,3	57,7	60,7	55,8	65,2	57,2	62,7	57,9	227,9
Dezembro	81,6	90,7	92,2	70,1	82,2	74,5	86,7	76,3	80,8	74,6	388,4
Janeiro	57,6	57,6	60,2	54,2	57,0	52,4	60,8	53,7	58,6	54,3	457,7
Fevereiro	70,4	65,8	65,6	59,0	59,4	57,0	66,3	58,4	60,0	59,1	243,6
Março	0,0	4,7	4,6	4,2	4,4	4,1	4,7	4,1	4,5	4,2	24,2
Abril	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	**845,5**	**882,2**	**920,3**	**678,5**	**957,7**	**568,8**	**870,0**	**755,3**	**842,9**	**735,2**	**1537,2**

As superfícies horizontais H1 e H2 apresentadas na Tabela 4, em condições naturais de exposição solar e declividade do terreno, abrangeram uma demanda hídrica de 845,5 e 882,2 mm. Já para as superfícies com exposição solar norte, 40N e 20N, houvram as maiores demandas totais de lâmina irrigada, com 957,7 e 920,3 mm respectivamente, quando comparadas as superfícies com exposição sul, 20S e 40S, cujos valores de lâmina de água exigidos foram 678,5 e 568,8 mm, os menores valores registrados para os tratamentos. As superfícies de exposição solar leste e oeste apresentaram valores próximos de demanda hídrica, sendo de 870,0 e 842,9 mm para 20E e 40E, e de 755,3 e 735,2 mm para 20W e 40W, respectivamente.

A precipitação total durante o ciclo de cultivo foi de 1537,2 mm, valor no qual encontra-se dentro do esperado para o clima da região segundo Andrioli e Centurion (1999), no entanto, como observa-se na Tabela 4, a variação sazonal da disponibilidade de água pela chuva pode afetar a necessidade hídrica da cultura de cana-de-açúcar, principalmente no início do desenvolvimento.

De acordo com Jadoski et al. (2010) e De Oliveira, Braga e Santos (2014), a fase de perfilhamento da cana-de-açúcar sofre influência direta dos fatores ambientais tais como: umidade do solo, luminosidade e temperatura. O estresse causado pela falta e ou excesso de algum desses fatores climáticos, como por exemplo a falta de

chuva, poderá promover perdas iniciais na quantidade de brotos e perfilhos, efeitos negativos na fase de crescimento dos colmos e afetando diretamente a produção de matéria prima final da cana-de-açúcar, causando sérios impactos ao setor.

Segundo Junior et al. (2016), realizando estudos com cana-de-açúcar sob regime hídrico variável, o manejo da irrigação em áreas com regime de precipitação instável, como por exemplo regiões de expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil (Norte e Centro Oeste), apresenta resultados favoráveis ao produtor, podendo ter superávit na produtividade em até 65,9%.

Desta forma é possível constatar que para todos os tratamentos as condições de umidade do solo promovidas pelo manejo da irrigação e precipitação, foram favoráveis às fases de desenvolvimento da cultura, tendo como fator incisivo nos tratamentos H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 40E, 20W e 40W, os períodos de estresse hídrico induzido e as distintas exposições solares, contrastando com o tratamento H1 do qual não sofreu estresse hídrico durante o período de estudo (Tabela 4).

Na Figura 19 (A, B, C e D), tem-se os valores dos índices de estresse hídrico (IEH) dos tratamentos para a cultura de cana-de-açúcar em suas diferentes fases de desenvolvimento (perfilhamento, crescimento e maturação). Observa-se que os maiores valores de IEH foram registrados durante a fase de perfilhamento da cultura durante os períodos de estresse hídrico induzido, sendo de aproximadamente 6,0°C para o tratamento H2 e 6,5°C para os tratamentos 20N e 20S (Figura 19A). Registrou-se 6,5°C para o tratamento 40N e cerca de 5,9°C 40S (Figura 19B). O maior valor registrado foi de 7,0°C para 20E e de 6,2°C para 20W (Figura 19C). Para 40E e 40W, observaram-se valores próximos de 6,5°C e 6,4°C respectivamente (Figura 19D). No tratamento H1 (Figura 19A), mantido sob capacidade de campo, o maior valor registrado foi de 1,8°C para esta fase.

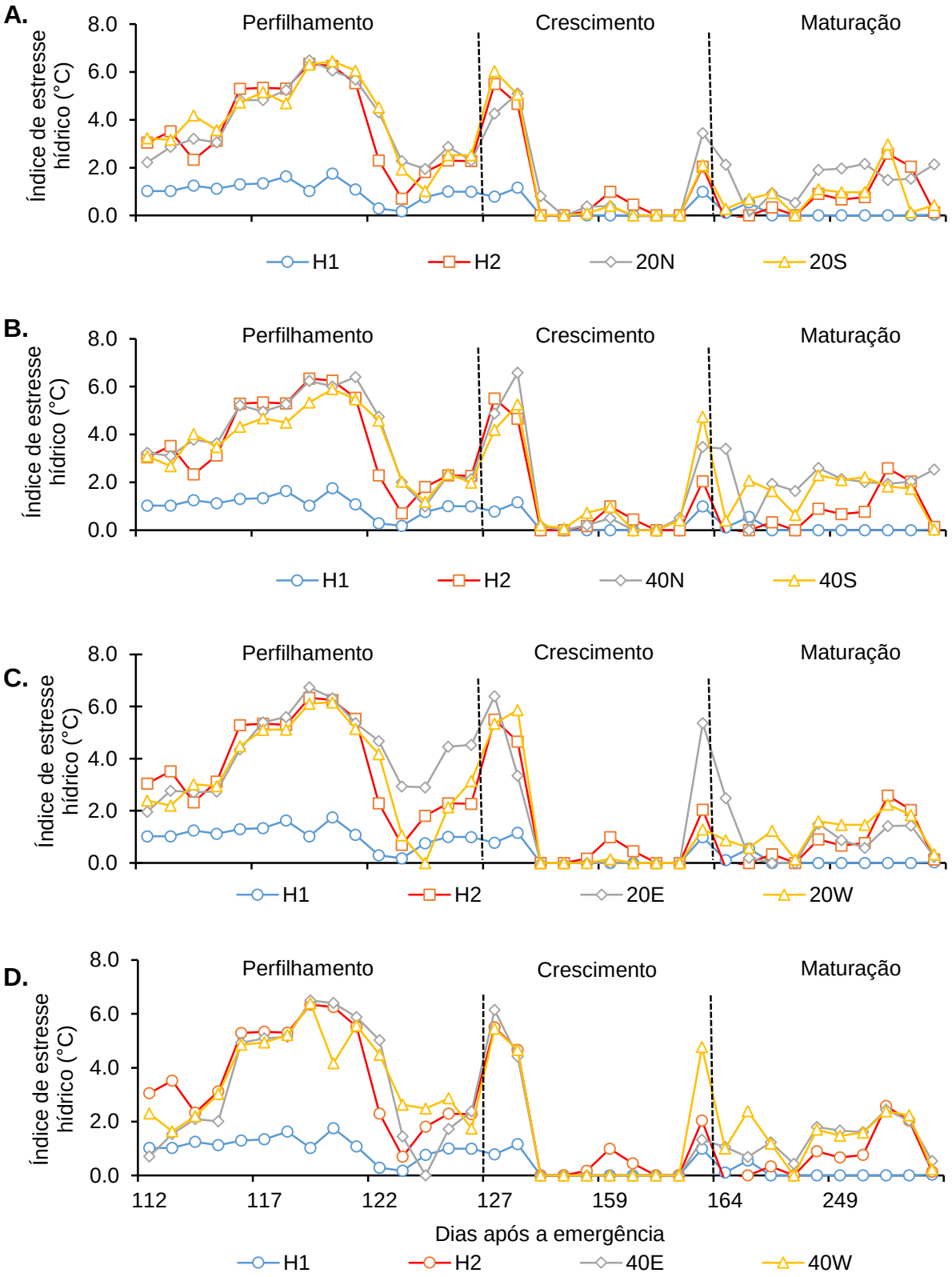

Figura 19. Índice de estresse hídrico, em °C, para os tratamentos H1, H2, 20N, 20S (A), 40N, 40S (B), 20E, 20W (C), 40E e 40W (D), na cultura de cana-de-açúcar. Jaboticabal-SP, 2015/2016.

A fase de perfilhamento da cana-de-açúcar é sensível as variações climáticas e a variação da disponibilidade hídrica afeta de forma significativa os processos fisiológicos das plantas. De acordo com Testi et al. (2008) e Trentin et al. (2011), a cana-de-açúcar e diversas outras culturas sob regime de estresse hídrico tendem a apresentar como variável este aumento da temperatura foliar em relação a temperatura do ar, fenômeno estreitamente ligado ao processo de transpiração.

Com a diminuição da transpiração foliar ocorre aumento na temperatura do dossel devido à maior concentração de energia na forma de calor latente. Assim, a temperatura foliar torna-se superior à temperatura do ar. Fato que explica o comportamento do índice de estresse hídrico variar entre uma faixa de 1,8 a 7,0°C para os diferentes tratamentos H1, H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W (Figura 19 A, B, C e D), devido ao regime hídrico adotado, a declividade e exposições solares das superfícies, que afetam diretamente a quantidade de radiação solar para cada tratamento.

Simões et al. (2014), estudando o comportamento de cana-de-açúcar sob estresse hídrico na região nordeste do país, também observaram o efeito significativo no aumento da temperatura das folhas, obtendo valores de até 38,0°C para plantas sob limitação hídrica, cerca de 10,0°C superiores a temperatura ambiente para aquela região.

Segundo De Oliveira et al. (2010) e Silva et al. (2014), manter um regime hídrico adequado durante a fase de perfilhamento para a cana-de-açúcar é de extrema importância para a formação, desenvolvimento dos colmos e produção da matéria prima final. O uso de índices de estresse hídrico pode contribuir significativamente para o manejo da irrigação, dando suporte para que a cultura alcance seu maior potencial produtivo no campo.

Para as fases de crescimento e maturação (Figura 19 A, B, C e D) houve decréscimo nos valores do índice de estresse hídrico para todos os tratamentos quando comparados à fase de perfilhamento. Observa-se na Figura 19A e B (fase de crescimento), para os tratamentos sob déficit hídrico induzido, 20N e 40N respectivamente, que ocorreram os maiores valores médios com aproximadamente 3,0°C, enquanto que o tratamento H2, apresentou estresse entre 2,0°C, destacando-se a influência das exposições solares sobre estes tratamentos. Para o tratamento

H1, sob capacidade de campo os valores ficaram sempre próximos a 0,0°C nas fase de crescimento e maturação da cana-de-açúcar.

Esse comportamento de declínio nos índices de estresse hídrico pode estar associado ao maior fechamento do dossel pelas folhas, a maior área sombreada e ao acúmulo de reservas pelos colmos. A própria morfologia e estrutura de crescimento da cultura acaba proporcionando às plantas um “microclima” adequado, onde ocorre menores diferenças no acúmulo de radiação solar e maior suporte para enfrentar o estresse hídrico, afetando diretamente a taxa de transpiração (TAIZ e ZEIGER, 2004). No entanto é importante salientar que os efeitos prejudiciais da limitação hídrica ocorridos na fase inicial (perfilhamento) para os tratamentos sob déficit hídrico, são irreversíveis e terão influência negativa na produtividade.

De acordo com a Tabela 5, observam-se as médias dos índices de estresse hídrico para cada fase de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar nos tratamentos estudados. Para a fase de perfilhamento, o tratamento 20E apresentou a maior média de índice de estresse hídrico (6,5°C), seguido de 40N (6,3°C). Os tratamentos 20S e 40E com 6,2°C não diferiram entre sí, seguidos dos tratamentos 20W, 40S, H2, 20N e 40W cujas médias ficaram próximas a 5,4°C, que também não diferiram entre sí. Para H1 houve menor índice de estresse hídrico no período com média de 1,2°C.

Tabela 5. Índices de Estresse Hídrico, em °C, nas superfícies estudadas, para as diferentes fases de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar.

Índice de estresse hídrico	H1	H2	20N	20S	40N	40S	20E	20W	40E	40W
	Temperatura (°C)									
Fase de perfilhamento[I]	1,2 D	5,4 c	5,1 c	6,2 b	6,3 ab	5,5 c	6,5 a	5,7 c	6,2 b	5,2 c
Fase de crescimento[II]	0,3 E	1,9 c	3,3 a	0,5 e	3,4 a	1,9 c	2,4 b	0,7 e	1,2 d	2,6 b
Fase de maturação[III]	0,0 F	0,8 e	2,0 b	1,0 de	2,2 a	2,2 a	1,4 d	1,6 c	1,7 c	1,8 bc

Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). [I]CV.= 5,3%. [II]CV.= 8,9%. [III]CV.= 9,2%.

Diversos autores evidenciam o perfilhamento como a fase crítica em relação a necessidade de água para cultura de cana-de-açúcar. A intensidade de perfilhos nesta fase é estimulada de acordo com as condições do ambiente de cultivo, fatores climáticos primordiais como; temperatura, radiação solar e de disponibilidade hídrica

podem intensificar e ou agravar o número de perfilhos pela mortalidade devido a diminuição na condutância estomática e taxa fotossintética (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005; MARAFON, 2012; ZHAO, GLAZ e COMSTOCK, 2010).

Segundo a Tabela 5, o tratamento H2 que encontrava-se apenas sob déficit hídrico induzido teve como resposta um alto grau de estresse, 5,4°C de IEH, em relação a H1 (1,2°C), evidenciando o efeito negativo da limitação hídrica na fase de perfilhamento. O demais tratamentos sob déficit hídrico induzido e com variações nas exposições solares provam através da divergência de valores entre as médias, que o acúmulo de radiação nas plantas sob estresse hídrico devido a geografia do terreno, potencializa a intensidade do índice de estresse hídrico para cultura de cana-de-açúcar.

Para a fase de crescimento da cultura, constata-se que os menores valores de índice de estresse hídrico foram dos tratamentos H1 (0,3°C), 20S (0,5 °C) e 20W (0,7°C), seguido do tratamento 40E (1,2°C) e dos tratamentos H2 e 40S ambos com 1,9°C. Os maiores índices de estresse no período foram dos tratamentos 40N e 20N, seguidos dos tratamentos 20E e 40W. Já para a fase de maturação, o tratamento H1 apresentou menor índice, com 0,0°C, enquanto que as superfícies 40N e 40S, foram verificados os maiores valores para o período (2,2°C).

Estudos avaliando a temperatura das folhas realizados por Trentin et al. (2011), Vieira et al. (2014) e Brunini e Turco (2016) na cultura de cana-de-açúcar, demonstraram que os tratamentos com regime hídrico na capacidade de campo registraram temperaturas do dossel próximas à temperatura ambiente, indicando menor índice de estresse hídrico, enquanto que nos demais tratamentos sob deficiência hídrica e elevada radiação solar, as temperaturas do dossel foram superiores à do ar, com valores próximos de 6,0°C de diferença. Concordando com os valores máximos e médios dos índices de estresse hídrico registrados para os tratamentos sob déficit hídrico induzido na fase de perfilhamento verificam-se as informações na Figura 19 (A, B, C e D) e na Tabela 5.

A relação existente entre a necessidade hídrica das plantas e a temperatura do dossel é um parâmetro de extrema importância para indicar ao produtor quando irrigar a cultura (NOGUEIRA e SILVA JÚNIOR, 2001). Segundo De Almeida Lobo et al. (2004) trabalhando com índices de estresse hídrico para cultura do feijoeiro irrigado,

concluíram que o momento ideal para se irrigar a cultura, era na fase de reprodução e quando as temperaturas do dossel atingissem de 3 a 4 (±0,5) °C acima da temperatura das plantas controles (plantas bem irrigadas).

Com base nas médias dos tratamentos H1 e H2 apresentadas na Tabela 5, pode-se considerar usual para a cana-de-açúcar cultivada nestas condições de campo (mais comuns de plantio), a fase de perfilhamento como decisiva para realizar-se o manejo da irrigação e o momento ideal quando a temperatura do dossel atingir valores entre 2,0 a 5,0°C em relação ao ambiente.

A reserva utilizável de água no solo na camada monitorada de 0 a 0,40 m corresponde a 28,5 mm. Observando os dados da Figura 20, é possível acompanhar o comportamento da água no solo durante os períodos de déficit hídrico induzido (50% da reserva utilizável), para os tratamentos em cada fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

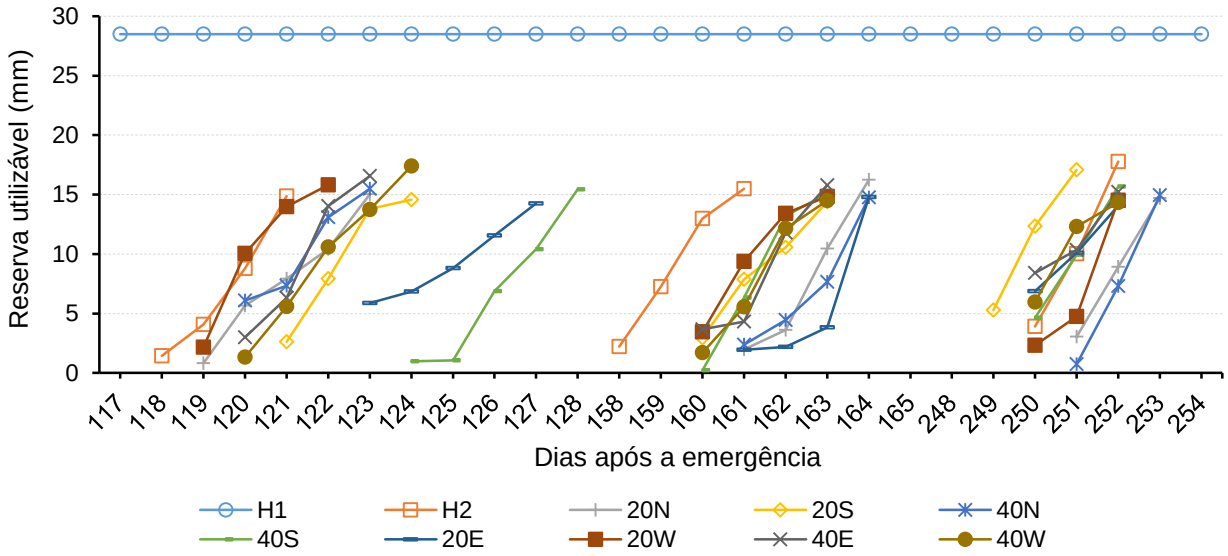

Figura 20. Valores médios de água disponível no solo até 0,40 m de profundidade, durante os períodos de estresse hídrico induzido na cana-de-açúcar para os tratamentos (H1, H2. 20N. 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W).

Segundo Ritchie (1972), Carlesso (1995) e Santos e Carlesso (1998), a reserva utilizável ou água evapotranspirável pode ser estimada pela diferença entre o conteúdo de água no solo explorado pelo sistema radicular das plantas, entre o limite

superior (capacidade de campo) e o limite inferior de água disponível no solo (ponto de murcha permanente).

Verifica-se na Figura 20, que durante as três fases de desenvolvimento da cultura: perfilhamento (117 a 128 d.a.e); crescimento (158 a 165 d.a.e) e maturação (248 a 254 d.a.e) houve uso da reserva utilizável pelos tratamentos sob déficit hídrico (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), até que atingissem o valor de 14,2 mm (50% da reserva), uma condição considerada de estresse. Para o tratamento H1, este foi sempre mantido na capacidade de campo (ALLEN et al, 1998; FARIA et al., 2012).

Ortolani e Camargo (1987), indicam que a limitação hídrica chega a causar danos à produção final na ordem de 70%, evidenciando a importância no planejamento da agricultura irrigada durante o período de desenvolvimento das plantas. A medida que o esgotamento de água no solo evolui, a capacidade das planas absorverem a água diminui, devido a maior energia de retenção pelos microporos do solo que competem com as raízes das plantas, limitando assim a disponibilidade da água (BERGAMASCHI, 1992).

Observa-se na Tabela 6 os valores de temperatura máxima da cobertura vegetal nas fases de desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar e o acúmulo de radiação global para o ciclo produtivo. O tratamento H1 registrou valores de temperatura máxima próximos de 30,5°C para todo as fase de desenvolvimento, concordando com a afirmativa cientifica proposta por Idso, Jackson e Reginato (1977), da qual plantas na capacidade de campo tendem a manter sua temperatura próxima a temperatura do ar e menores valores de índice de estresse hídrico – IEH.

Tabela 6. Temperatura máxima da cobertura vegetal, em °C, dos tratamentos H1, H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W, nas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar e a Radiação Solar Global incidente acumulada, em MJ m^{-2} ano^{-1}. Jaboticabal, SP, 2015/2016.

Fase de desenvolvimento	H1	H2	20N	20S	40N	40S	20E	20W	40E	40W
	(°C)									
Perfilhamento	30,7	31,7	31,9	32,9	32,5	32,7	33,0	31,7	31,7	31,3
Crescimento	30,5	34,5	35,8	35,9	36,4	37,1	37,8	34,1	34,4	37,2
Maturação	30,0	32,0	32,1	32,2	32,5	31,8	31,4	31,8	32,0	32,2
Radiação acumulada	(MJ. m^{-2}. ano^{-1})									
Total	8373	8373	7654	6715	8302	8031	8792	8871	8217	7861

Os tratamentos (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 40E, 20W e 40W) sob déficit hídrico, apresentaram maiores variações na temperatura máxima do dossel que H1 durante todas as fases de desenvolvimento da cultura, devido a limitação hídrica, diminuição da transpiração foliar e aumento no acúmulo de calor latente pela radiação solar nas folhas.

A temperatura ideal para o crescimento e desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar encontra-se em uma faixa próxima dos 30,0°C. O súbito aumento desta, afeta a qualidade fisiológica das plantas, gerando perdas de perfilhos, diminuição na altura e diâmetro dos colmos e consequentemente diminuindo a produção no campo (JADOSKI et al., 2010; DE OLIVEIRA, BRAGA e SANTOS, 2014).

Para as superfícies horizontais, H1 e H2, a radiação acumulada durante o ciclo da cultura foi de 8373 MJ m^{-2} ano^{-1} (Tabela 6). As superfícies que tiveram maior acúmulo de radiação foram 20W (8871 MJ m^{-2} ano^{-1}), 20E (8792 MJ m^{-2} ano^{-1}), 40N (8302 MJ m^{-2} ano^{-1}) e 40E (8217 MJ m^{-2} ano^{-1}). A superfície 20S registrou o menor acúmulo de radiação durante o ciclo, com 6715 MJ m^{-2} ano^{-1}. As demais superfícies 20N e 40W apresentaram valores próximos de radiação, com 7654 e 7861 MJ m^{-2} ano^{-1}, respectivamente.

André et al. (2010) e Carneiro et al. (2013), estudando o saldo de radiação em cana-de-açúcar para diferentes regiões no Brasil, confirmam a dependência do albedo (reflexão) em função do ângulo de elevação solar. De acordo com os autores a variação angular de incidência dos raios solares sobre as plantas diverge no saldo de radiação que penetra e é retido, desta forma diferentes cenários produtivos com dependência geográfica do terreno influenciam no saldo de radiação total pela cultura.

Fato que concorda com os valores obtidos na Tabela 6, para os tratamentos cuja declividade e exposição solar diferem entre si, acumulando taxas variáveis de radiação solar ao longo do ciclo e influenciando no desenvolvimento da cultura de cana-de-açúcar.

De acordo com a Figura 21 é possível observar o potencial hídrico foliar (ψ_w) para os tratamentos ao longo das fases de desenvolvimento. Na fase de perfilhamento houve menor potencial hídrico para o tratamento 20W (-1,6 MPa), seguido de H2, 20S e 40E com pressões de -1,4 MPa, respectivamente e 20N, 40N, 20E e 40W cujas pressões ficaram próximas de -1,2 MPa.

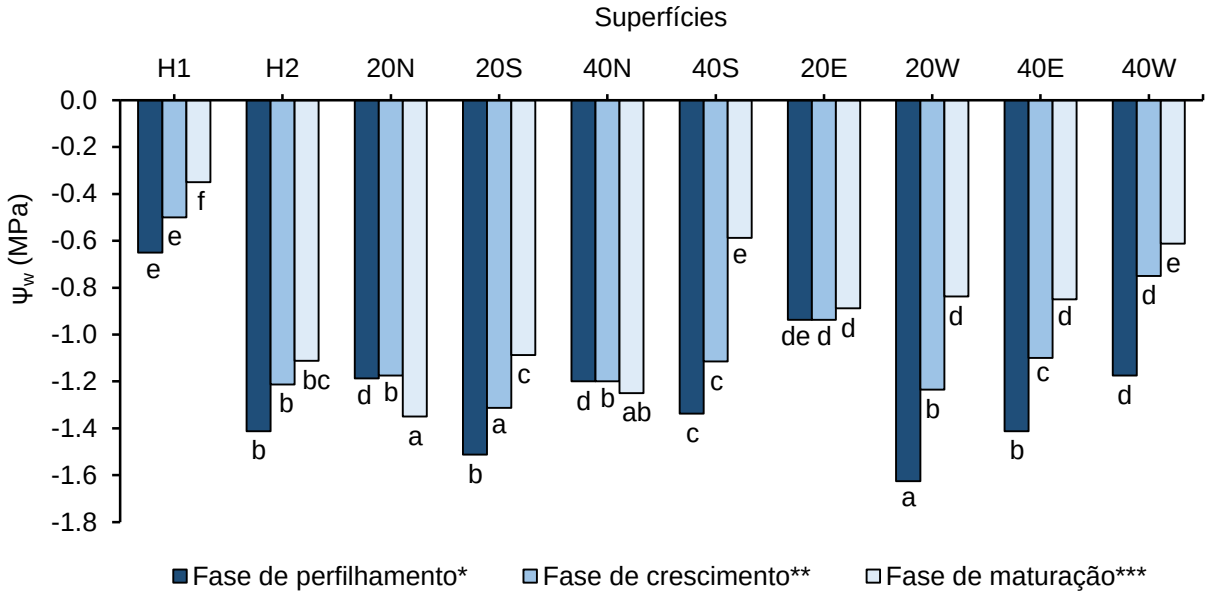

Figura 21. Potencial hídrico foliar (ψw), em MPa, para os tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey (P < 0,05). *CV = 9,8%. **CV = 9,1%. ***CV = 9,0%.

Para as fases de crescimento, destaca-se o tratamento 20S (-1,3 MPa) com menor potencial hídrico foliar, seguido de H2, 20N, 40N e 20W (-1,2 MPa, respectivamente), 40S e 40E, ambos com -1,1 MPa, e, finalmente, 20E e 40W com -0,9 MPa. Na fase de maturação os menores valores foram registrados em 20N e 40N (-1,4 MPa) e os demais tratamentos sob déficit hídrico tiveram médias entre -1,0 a -0,8 MPa.

Os valores encontrados corroboram com as pesquisas de Inman-Bamber e Smith (2005) e Endres et al. (2010), em estudos com cana-de-açúcar sob déficit hídrico os autores concluíram que o potencial hídrico foliar apresenta valores entre -1,5 até -2,0 MPa.

É importante salientar que esses autores trabalharam com a cultura em condições “normais” de cultivo, não levando-se em consideração a exposição e declividade do terreno. Como observado na Figura 21, houve variação significativa dos valores do potencial hídrico foliar para as diferentes fases de desenvolvimento da cultura dentro de um mesmo tratamento, exemplo; tratamento 20W cujos valores do Ψw para cada fase foram -1,6, -1,2 e -0,8 MPa respectivamente, evidenciando que a exposição solar é um fator diretamente relacionado a intensidade do estresse hídrico sentido pelas plantas.

O maior potencial hídrico foliar demonstrado na Figura 21, foi registrado no tratamento H1 para todas as três fases de desenvolvimento (-0,7; -0,5 e -0,4 MPa, respectivamente) diferindo significativamente dos demais tratamentos. Em estudos avaliando respostas fisiológicas da cana-de-açúcar à reidratação, Silva et al. (2013) verificaram que genótipos cultivados na capacidade de campo da cultura atingem maiores valores de potencial hídrico foliar entre -0,5 a -0,4 MPa ao meio dia solar.

Segundo Maxwell e Johnson (2000), para a eficiência fotoquímica máxima os valores de Fv/Fm menores que 0,75 apontam que a cultura encontra-se sob algum tipo de estresse, afetando negativamente o seu potencial fotossintético. Na Figura 22, destaca-se a fase de perfilhamento, onde houve maior variação dos valores de Fv/Fm para os tratamentos sob déficit hídrico induzido, destacando-se 20N e 20E (médias de 0,68) dos quais registraram menor valor para o período. Os tratamentos H2, 20W e 40E não diferiram entre si (médias de 0,70), seguidos de 40S (média de 0,72) e de 20S, 40N e 40W (com médias de 0,73).

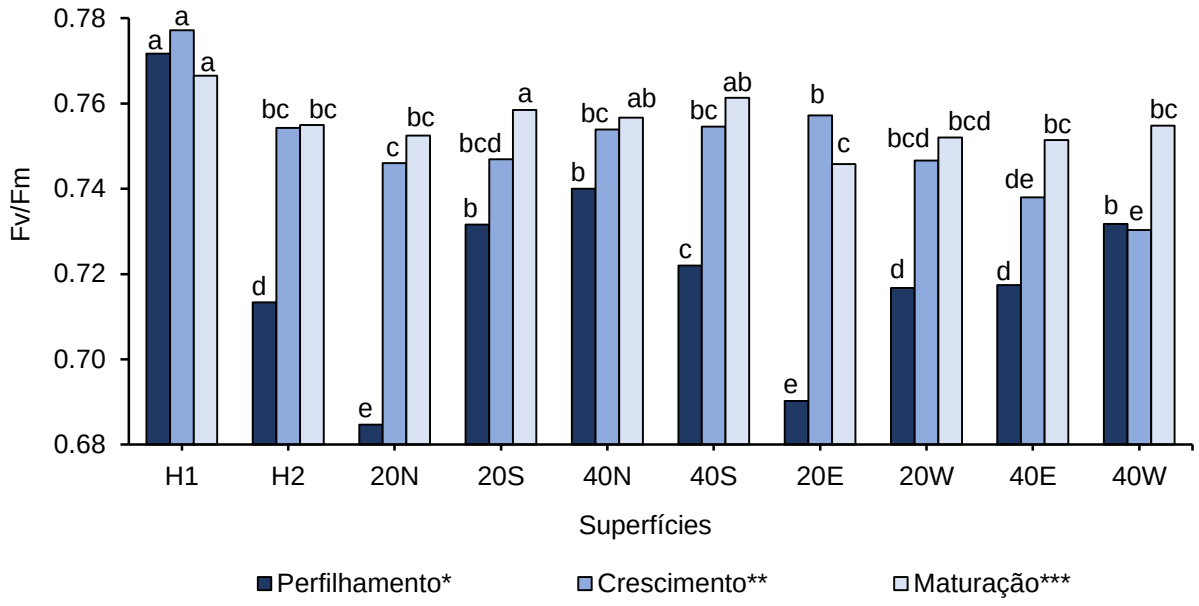

Figura 22. Eficiência fotoquímica máxima do FII (Fv/Fm), dos tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), durante as fases de desenvolvimento para cultura de cana-de-açúcar. Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey (P < 0,05). *CV = 1,09%. **CV = 0,83%. ***CV = 0,83%.

Silva et al. (2007) e Silva et al. (2015), avaliando características morfofisiológicas em cultivares de cana-de-açúcar sob déficit hídrico também constataram valores menores que 0,75 na média de Fv/Fm, para cultivares no tratamento de sequeiro, possibilitando relacionar esses valores diretamente ao nível de estresse hídrico e aos índices de estresse hídrico oriundos da metodologia por infravermelho.

Para as outras fases de crescimento e maturação, apenas os tratamentos 40E e 40W apresentaram valores de Fv/Fm menores que o ideal, com médias de 0,74 e 0,73 respectivamente, enquanto que os demais tratamentos, mesmo sob déficit hídrico e tendo variações significativas de Fv/Fm entre si, não apresentaram valores menores que 0,75. Destacando que a quantidade de radiação, para cada exposição solar específica nos tratamentos, pode afetar o comportamento da fotossíntese das plantas, indicando que diferentes cenários no cultivo da cana-de-açúcar terão respostas produtivas divergentes (Tabela 6).

Bolhàr-Nordenkampf e Öquist (1993), em estudos sobre a eficiência fotoquímica e Santos et al. (2014), avaliando genótipos de cana-de-açúcar sob capacidade campo, relataram que quando a cultura está com seu aparelho fotossintético intacto a razão Fv/Fm deve variar entre 0,75 a 0,80, excluindo-se assim qualquer indicativo de estresse na planta. Como indicam os resultados para o tratamento H1, onde não houve estresse hídrico, para as três fases de desenvolvimento verificou-se alta eficiência fotoquímica (Média de 0,76 a 0,78), diferindo significativamente de todos os outros tratamentos (Figura 22).

O Índice do Conteúdo de Clorofila – ICC (Figura 23), é uma ferramenta rápida e usual na avaliação da produtividade das culturas, pois relaciona o teor de clorofila nas folhas com o seu rendimento, os processos fotossintéticos e a produção de matéria seca pelas plantas (DAWSON, HUGGINS e JONES et al., 2008; VIEIRA et al., 2014).

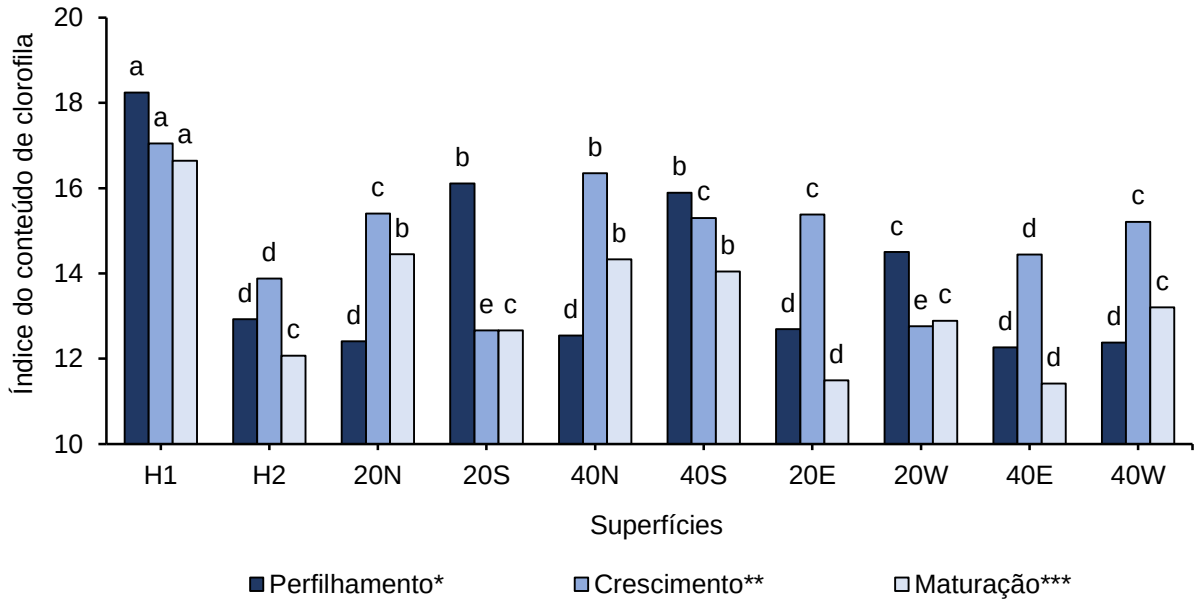

Figura 23. Índice do conteúdo de clorofila (ICC), dos tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), durante as fases de desenvolvimento para cultura de cana-de-açúcar. Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey (P < 0,05). *CV = 4,80%. **CV = 6,34%. ***CV = 10,74%.

De acordo com a Figura 23, para os tratamentos sob déficit hídrico induzido, houve variação no ICC durante todas as fases de desenvolvimento da cultura. No perfilhamento os tratamentos 40S e 20S registraram os maiores ICC (16,0 e 15,9), seguido de 20W (ICC de 14,5) e H2, 20N, 40N, 20E, 40E e 40W (ICC de 12,3), não diferindo entre si.

Segundo Taiz e Zeiger (2004), durante a fase inicial de desenvolvimento das culturas espera-se que haja aumento do teor de clorofila nas plantas devido ao maior incremento de compostos específicos afim de captar a energia radiante. No entanto, como observado na Figura 23, os tratamentos sob déficit hídrico induzido apresentaram menores valores de ICC, demonstrando que o estresse hídrico afeta a qualidade da planta em produzir clorofila.

Em estudos realizados por Vieira et al. (2014), os autores constaram menores valores nos índices de clorofila na cana-de-açúcar com menores lâminas de irrigação ao longo do ciclo produtivo, corroborando com os índices de conteúdo de clorofila nas fases de crescimento e maturação (Figura 23), para os tratamentos sob estresse hídrico. Ainda segundo os autores, plantas sob déficit hídrico tem sua concentração de pigmentos afetada, ocasionando redução na capacidade fotossintética, fato que pode ser observado na Figura 22 para estes mesmos tratamentos.

Gonçalves et al. (2010) e Vieira et al. (2014), constataram aumento um significativo no índice de clorofila em plantas mantidas na capacidade de campo quando comparadas a plantas não irrigadas satisfatoriamente.

O ICC no tratamento H1, apresentou os maiores valores nas três fases de desenvolvimento (médias de 18,2, 17,1 e 16,6), diferindo significativamente dos demais tratamentos e confirmando os efeitos benéficos de se manter a cultura ausente de estresse hídrico. Para Jamil et al. (2007) e Silva et al. (2007), em variedades de cana-de-açúcar sob limitação hídrica, o efeito do agente causador de estresse na planta irá influenciar diretamente nos teores de clorofila.

Estes resultados do estudo expostos nas Figuras 21, 22 e 23, indicam a importância de se realizar análises fisiológicas em plantas estressadas pela limitação hídrica e utilizar suas respostas como ferramenta de auxílio ao índice de estresse hídrico – IEH (Tabela 5), pois estes índices também são capazes indicar ao produtor qual é o status vital da planta (situação fisiológica) em determinado momento

específico no campo. Segundo Ni et al. (2015), em estudos com milho sob déficit hídrico, o monitoramento de componentes fotossintéticos foi uma ferramenta útil para monitorar o estresse hídrico da vegetação, e os dados de temperatura podem ser usados para confirmar os resultados.

A fase de perfilhamento da cultura de cana-de-açúcar é de extrema importância, pois é neste período que as plantas são dependentes principalmente das condições de umidade do ambiente de produção e da temperatura do meio (LIU, KINGSTON e BULL, 1998). De acordo com a Figura 24, até os 22 d.a.e todos os tratamentos apresentaram taxa de perfilhamento próximo em cerca de 100 perfilhos m^{-2}, no entanto dos 22 até os 70 d.a.e houve diferença significativa entre os tratamentos, com destaque para H1, cuja taxa de perfilhamento chegou próximo dos 400 perfilhos m^{-2}.

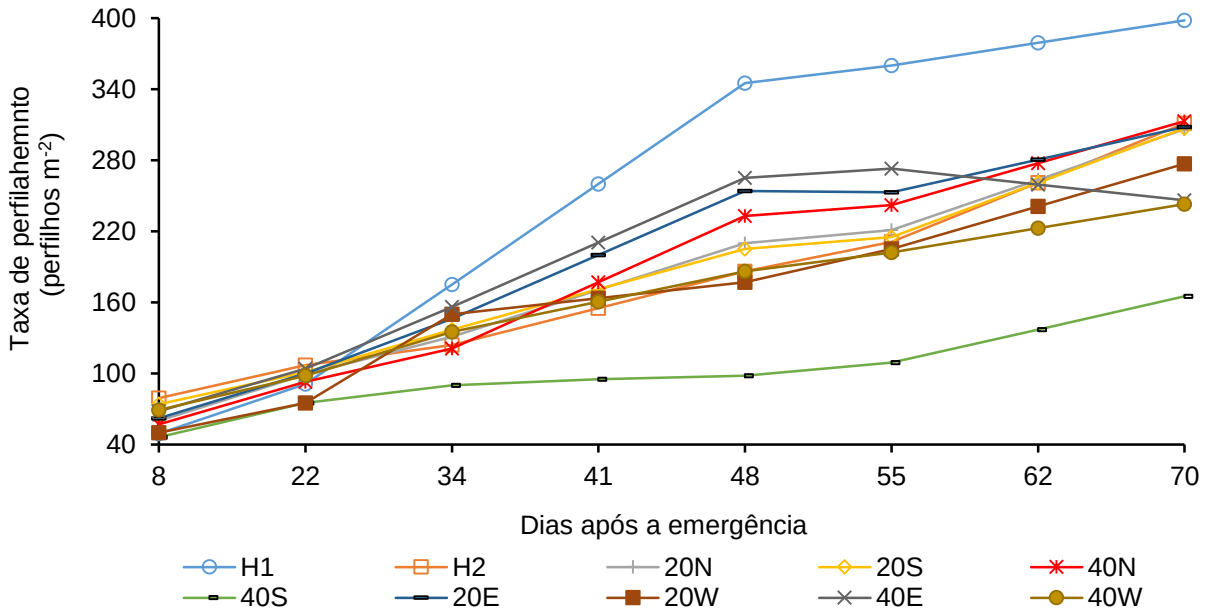

Figura 24. Taxa de perfilhamento, perfilhos por m^2, para os tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), para a cultura de cana-de-açúcar.

Segundo Marafon (2012), com o desenvolvimento do sistema radicular e a expansão das folhas (início do perfilhamento), a planta começa então a retirar água e nutrientes do solo de forma mais acentuada, iniciando os processos metabólicos dependentes da fotossíntese. Neste sentido o tratamento sob capacidade de campo

H1 se sobressai aos demais, pois não houve nenhuma limitação hídrica que pudesse comprometer o transporte de nutrientes via radicular e a assimilação de compostos ligados ao processo fotossintético. A planta de cana-de-açúcar ausente de estresse hídrico na fase de perfilhamento garante ao produtor mais chances de sucesso na cadeia produtiva.

Ramesh e Mahadevaswamy (2000) e Mittler (2006), apontam que o estresse hídrico é um dos fatores que mais limita a produção vegetal durante o estabelecimento das culturas nas fases inicias de desenvolvimento. Afirmativa esta que reforça os resultados encontrados para os tratamentos sob déficit hídrico induzido. Observa-se que o tratamento 40S, apresentou menor taxa de perfilhamento, cerca de 165 perfilhos m^{-2} aos 70 d.a.e, indicando que o estresse hídrico nesse tratamento resultou em danos mais severos à fase inicial de perfilhamento.

Em relação aos demais tratamentos (Figura 24) sob déficit hídrico induzido, a taxa de perfilhamento ficou entre 240 a 310 perfilhos m^{-2}, sugerindo que de forma geral para tratamentos sob diferentes exposições e declividades a taxa de perfilhamento apresenta oscilação, no entanto como mostrado mais à frente a maior parte desta variação não difere entre si (Tabela 7).

Tabela 7. Médias da Taxa de perfilhamento; Área foliar; Massa de matéria seca; Altura da planta e Diâmetro do colmo, para as superfícies estudadas durante o período.

Superfícies	Taxa de perfilhamento[I]	Área foliar[II]	Massa de matéria seca[III]	Altura da planta[IV]	Diâmetro do colmo[V]
	(perfilhos m^{-2})	(cm^2)	(g cm^{-2})	(cm)	(mm)
Declividade - 0% na capacidade de campo	379,0 a	522,3 a	6,4 a	210,3 a	16,5 A
Declividade - 0% sob déficit hídrico	261,0 b	414,4 b	5,1 b	187,0 c	14,4 D
Norte - 20%	263,5 b	390,4 c	4,8 c	192,3 b	14,2 D
Sul - 20%	261,0 b	421,6 b	5,2 b	201,3 ab	15,1 B
Norte - 40%	277,5 b	428,8 b	5,2 b	182,3 c	15,3 B
Sul - 40%	137,0 c	388,1 c	4,7 c	182,0 c	15,1 B
Leste - 20%	280,5 b	417,0 b	5,1 b	189,3 c	15,1 B
Oeste - 20%	241,0 b	297,8 e	3,6 d	184,3 c	14,1 D
Leste - 40%	259,5 b	414,7 b	5,1 b	194,3 b	15,5 B
Oeste - 40%	222,5 bc	354,1 d	4,3 c	176,7 d	13,7 E

Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). [I]CV= 13,20%. [II]CV = 12,14%. [III]CV = 12,14%. [IV]CV = 5,01%. [V]CV = 3,40%.

Para Silva et al. (2014), avaliando variedades de cana-de-açúcar sob irrigação em diferentes fases do ciclo, uma boa taxa de perfilhamento é um constituinte essencial para a formação do potencial de produção, influenciando na altura e diâmetro de colmos e a irrigação dá suporte para que as plantas manifestem todo seu potencial produtivo.

De acordo com os dados observados na Tabela 7 e na Figura 25A e C, a altura das plantas e o índice de área foliar apresentaram diferenças significativas, sendo que os maiores valores foram registrados para H1 (210,3 cm e 522,3 cm2). Segundo Farias et al. (2008) e Ferreira Junior et al. (2014) em estudos de índice de crescimento para cana-de-açúcar sob regime hídrico nos Estados da Paraíba e Bahia, os maiores valores de altura foliar (158,0 cm e 350 cm) e área foliar (535,9 cm2 e 600 cm2) respectivamente, foram observados em tratamentos sob manejo de irrigação. Esses dados podem indicar que a variação nos parâmetros morfológicos da cana-de-açúcar são dependentes do manejo hídrico, da temperatura e da radiação solar no local de cultivo.

Para os tratamentos sob déficit hídrico induzido, apresentados na Figura 25A e Tabela 7, os tratamentos 20S, 40E e 20N apresentaram maiores valores de altura (em média 195,9 cm) e os demais tratamentos os menores valores (em média 184,8 cm), com destaque para 40W, que registrou o menor valor de 176,7 cm. Em relação ao índice de área foliar Figura 25C e Tabela 7, os menores valores para os tratamentos sob déficit hídrico foram constatados em 20E com 297,8 cm^2, 40W com 354,1 cm^2 e 40S e 20N, com 388,1 e 390,4 cm^2 respectivamente. Para os demais tratamentos não houve diferença estatística, apresentando média em torno de 414,35 cm^2.

Farias et al. (2007) estudando índices de área foliar em cana-de-açúcar irrigada, destacam que as os tratamentos sob irrigação tiveram influência significativa na altura e índice de área foliar ao longo do período de cultivo. Para De Almeida et al. (2013), a área foliar está diretamente relacionada a demanda hídrica para cada fase de desenvolvimento, revelando que limitações hídricas em períodos específicos diminuem a área foliar, a taxa fotossintética e o desenvolvimento das plantas.

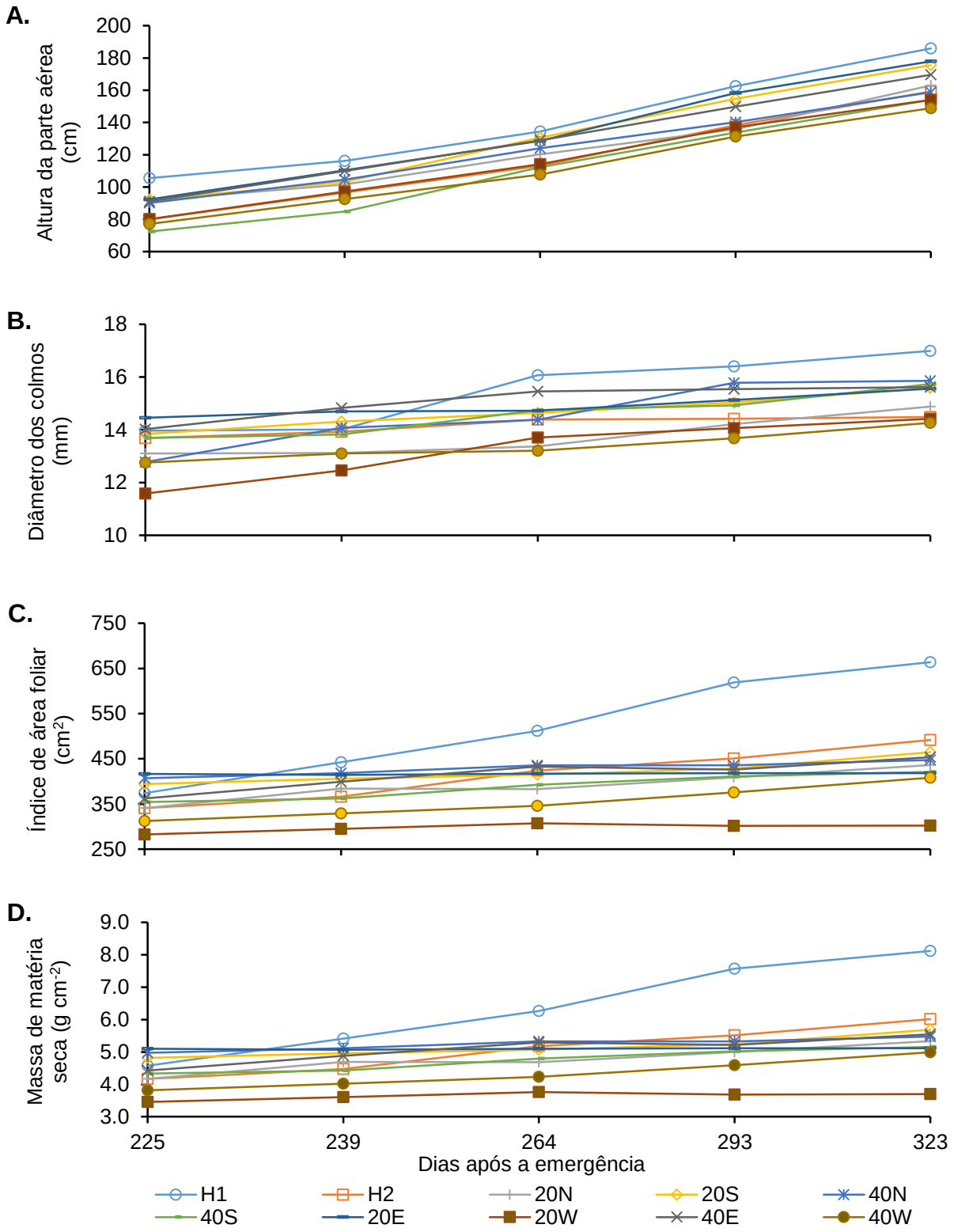

Figura 25. Altura das plantas, em cm (A), Diâmetro dos colmos, em mm (B), Índice de área foliar, em cm^2 (C) e Massa de matéria seca, em g cm^{-2} (D), nos tratamentos sob capacidade de campo (H1) e sob déficit hídrico induzido (H2, 20N, 20S, 40N, 40S, 20E, 20W, 40E e 40W), para a cultura de cana-de-açúcar.

Em relação ao diâmetro dos colmos (Figura 25B), observa-se que dos 225 aos 239 d.a.e, todos os tratamentos apresentaram valores próximos entre si, no entanto, a partir dos 264 até os 323 d.a.e, o H1 despontou nos valores registrados com 16,5 mm, diferindo significativamente dos tratamentos sob estresse hídrico (Tabela 7). Estes resultados demonstram o efeito a longo do prazo de se manter a cultura sob capacidade de campo e ausente de períodos estressantes.

Resultados obtidos por Pedrosa et al. (2005) e Neto et al. (2006), também constataram que o diâmetro do colmo sofre influência da irrigação atingido valores máximos de até 25,0 mm dependendo da variedade. Os autores afirmam ainda que menores diâmetros foram encontrados nas parcelas sem irrigação, apenas com precipitação.

Para os demais tratamentos, sob déficit hídrico induzido (Figura 25B), observa-se que dos 225 aos 323 d.a.e ocorreu pouca variação no diâmetro do colmo entre os tratamentos. O menor valor encontrado (Tabela 7), foi para 40W com 13,7 mm, seguido de H2, 20N e 20W (em média 14,4 mm), enquanto que para os demais tratamentos o valor ficou próximo a 15,1 mm, podendo indicar que a variação da exposição solar é um fator que influi no diâmetro dos colmos e capacidade de armazenamento de açúcares pelas plantas. De Oliveira et al. (2014), apesar de discutirem sobre a eficiência deste parâmetro para diagnosticar sintomas de estresse em cana-de-açúcar, também observaram menores valores de diâmetro do colmo em parcelas com taxa de irrigação variável no Vale do São Francisco.

Para Inman-Bamber e Smith (2005) e Machado et al. (2010), as plantas de cana-de-açúcar podem apresentar decréscimos significativos em sua produção de fitomassa como resposta fisiológica para evitar os efeitos do estresse hídrico, podendo atingir valores da ordem de 35% a menos. Fato que é observado na Figura 26D e Tabela 7, para o tratamento 20W, onde a massa de matéria seca acumulada entre os 225 aos 323 d.a.e foi de 3,6 g cm^{-2}, o menor valor registrado no período, seguido dos demais tratamentos sob estresse hídrico, com valores entre 4,0 e 5,0 g cm^{-2}. Valores que corroboram com Farias et al. (2008) que observaram menor acúmulo de fitomassa na parte aérea da cana-de-açúcar sob regime de sequeiro.

O acúmulo de fitomassa na parte aérea está diretamente relacionado com a taxa fotossintética da planta e o seu status hídrico, conforme observado no tratamento

H1, Figura 25D, pois a partir dos 239 até 323 d.a.e a massa de matéria seca teve um aumento significativo de 6,4 g cm^{-2} (Tabela 7), em relação aos tratamentos sob estresse hídrico. Estes resultados confirmam o exposto por De Oliveira et al. (2010) e Da Silva et al. (2014), onde os autores verificaram que o manejo da irrigação em cana-de-açúcar durante as diferentes fases de desenvolvimento, resultou em acúmulo de biomassa.

A ausência de estresse hídrico pelo manejo da irrigação, pode garantir a cultura de cana-de-açúcar um elevado rendimento agronômico, resultando em alta concentração de açúcares nos colmos, eficiência na conversão de açúcar e álcool, e maior produtividade no campo (DA SILVA et al., 2014). Fato que se confirma para o tratamento H1, o qual apresentou menor índice de estresse hídrico (1,2°C) e maior produtividade da cultura (124,0 Mg ha^{-1}), conforme Figura 26 e Tabela 8.

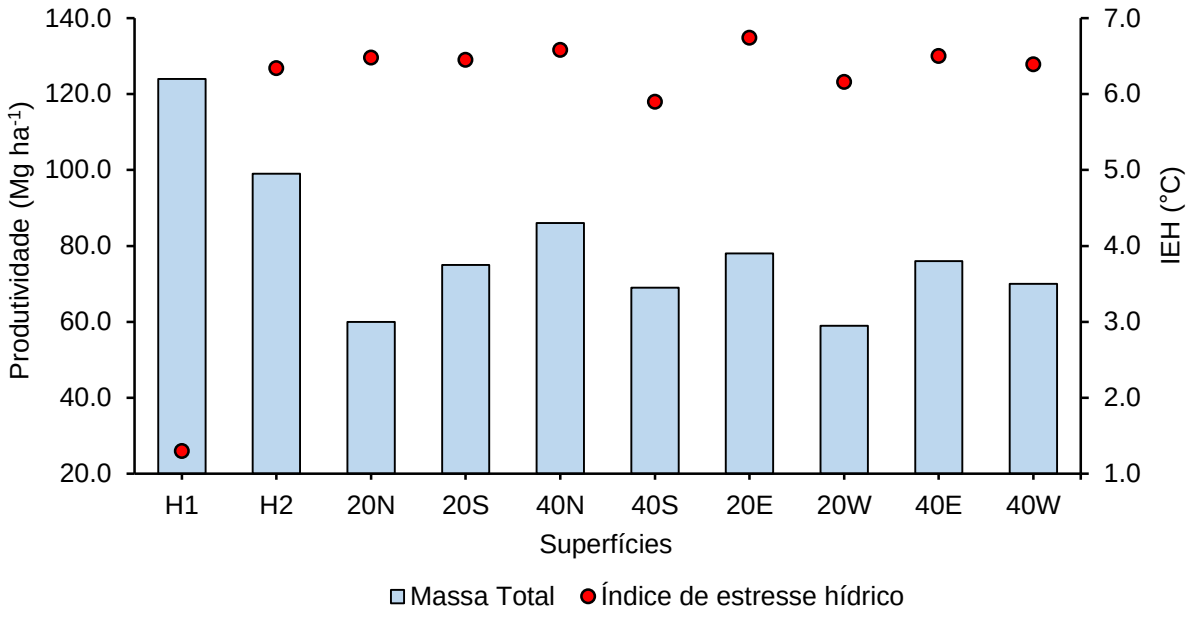

Figura 26. Produtividade de cana-de-açúcar, em Mg ha^{-1} e IEH máximo, em °C, nas superfícies estudadas. Jaboticabal, SP, 2015/2016.

Tabela 8. Produtividade média de cana-de–açúcar (Mg ha^{-1}), Jaboticabal, SP, 2015/2016.

Superfícies	Produtividade (Mg ha^{-1})	
Declividade - 0% na capacidade de campo	124,0	a
Declividade - 0% sob déficit hídrico	99,0	b
Norte - 20%	60,0	f
Sul - 20%	75,0	d
Norte - 40%	86,0	c
Sul - 40%	69,0	e
Leste - 20%	78,0	d
Oeste - 20%	59,0	f
Leste - 40%	76,0	d
Oeste - 40%	70,0	e

Médias seguidas de letras distintas, diferem entre si, pelo teste de Tukey (P < 0,05). CV= 5,80%.

Comparando-se H1 com H2, que registrou IEH máximo no período de 6,4 °C, (Figura 26) e produtividade de 99,0 Mg ha^{-1} (Tabela 8), o estresse hídrico induzido durante as fases de desenvolvimento ocasionou redução de 20,1% na produtividade da cultura. Valores que corroboram com dados do IEA (2015) e CTC (2015) para dados de produtividade coletados na safra de 2015 durante um período de estresse hídrico severo para os produtores do Estado de São Paulo, chegando a ter perdas da ordem de até 25,0% na produtividade da cultura e com Vieira et al. (2013), no qual constatou redução na produtividade de colmos de 21,5%, em tratamento sem irrigação. Para De Moraes Nogueira et al. (2016), os tratamentos mantidos sob regime hídrico apresentaram melhores parâmetros tecnológicos na produção de etanol e açúcares totais recuperáveis ao longo das safras do que o cultivo em sequeiro.

Da Costa Santos et al. (2016), discorrem sobre o potencial produtivo da cana mantida sob sequeiro e vulnerabilidade a períodos de estresse hídrico. Segundo os autores, o efeito negativo da limitação hídrica causa danos severos, superiores a 50% na produtividade da cultura. Confirmando os valores observados para os tratamentos 20N e 20W (59,0 e 60 Mg ha^{-1}), na Tabela 8, verificam-se quedas superiores a 50% na produtividade, quando comparados com H1. Para os demais tratamentos 40W e 40S (cerca de 70,0 Mg ha^{-1}), 40E, 20E e 20S (cerca de 76,0 Mg ha^{-1}) e 40N (86,0 Mg ha^{-1}), verificaram-se queda de produtividade entre 30,1 a 43,5%.

A diferença entre os valores de produtividade dos tratamentos sob déficit hídrico induzido, pode ser explicada devido às variações ambientais, tais como a topografia do terreno e exposição solar, as quais influenciam na captação de radiação solar, evapotranspiração e umidade no solo (BRUNINI e TURCO, 2016).

Como exposto nesta pesquisa, estas variáveis morfofisiológicas aliadas ao estresse hídrico induzido para cada fase de desenvolvimento da cultura, são ferramentas importantes no estudo de índices de estresse hídrico, pois sustentam a afirmação de que valores superiores a 2,0°C no IEH promovem perdas significativas na produtividade final de acordo com as Tabelas 5 e 8 e Figura 26.

Quando comparado, o IEH máximo de H2 (6,3°C) aos demais tratamentos sob déficit hídrico, nota-se que houve uma variação em todo o período de coleta de dados. Os maiores valores registrados no ciclo oscilaram na faixa de 5,9°C (40S) a 6,7°C (20E), demonstrando que a topografia do terreno e a quantidade de radiação solar captada na área de cultivo tem influência direta sobre a produtividade da cultura de cana-de-açúcar, bem como sobre o índice de estresse hídrico.

Autores como Fernandes e Turco (2001); Fernandes (2010), Tilling et al. (2007); Winterhalter et al. (2011), Maes e Steppe et al. (2012) e Morales et al. (2015), também verificaram a relação inversamente proporcional da temperatura do dossel com a produtividade em culturas de feijão, soja, trigo, milho, pinhão-manso e tomate sob efeito do estresse hídrico, e utilizaram esses dados para estimar modelos preditivos de irrigação. Suárez et al. (2008) e Zarco-Tejada et al. (2012; 2013), utilizando sensores de infravermelho térmico em veículos aéreos para monitorar oliveiras, constataram diferenças significativas na temperatura do dossel sob déficit hídrico em relação a cultura irrigada, aprimorando a técnica do IEH para futuros estudos em grandes áreas de cultivo.

Desta forma o uso de índices de estresse hídrico como proposto por Idso, Jackson e Reginato, (1977), na cultura de cana-de-açúcar, seja em regime irrigado e ou em sequeiro é de extrema importância para monitorar a qualidade física e tecnológica do canavial, dando suporte ao produtor rural para realizar o manejo da irrigação no momento ideal e evitando perdas na produtividade devido aos efeitos negativos do estresse hídrico.

5. CONCLUSÕES

Os índices de estresse hídrico variam para cada fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo que durante o perfilhamento observam-se os maiores efeito do déficit.

Os Índices de estresse hídricos máximos para cana-de-açúcar encontram-se entre 5,0°C e 6,5°C, porém, a partir de 2,0°C indica-se o momento de irrigar.

A exposição e declividade do terreno tem influência sobre os índices de estresse hídrico para a cultura, sendo possível inclusive, correlacionar parâmetros morfofisiológicos das plantas com o índice de estresse.

Os tratamentos com maiores índices de estresse hídrico apresentaram os menores valores de produtividade e o uso da tecnologia de sensores e termômetros a infravermelho é eficaz na detecção de índice de estresse hídrico nas plantas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIANUAL - **Anuário estatístico da agricultura**. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, p.239-242, 2015.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. **FAO: Rome**, v.300, n.9, p.D05109, 1998.

ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, 752p, 1973

ALFONSI, R. R.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; BARBIERI, V. **Condições climáticas para a cana-de-açúcar.** In: PARANHOS, S.B. (Coord). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas, fundação Cargill, v.1, p.42-55, 1987.

ANDRÉ, R. G. B.; MENDONÇA, J. C.; MARQUES, V. D. S.; PINHEIRO, F. M. A.; MARQUES, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: balanço de radiação e parâmetros derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 375-382, 2010.

ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Brasília, 1999. **Anais...** Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1999. p.1-4.

AZEVEDO H. J.; SILVA NETO, R.; CARVALHO, A. M.; VIANA, J. L.; MANSUR, A. F. U. Uma Análise da Cadeia Produtiva de Cana-de-Açúcar na Região Norte Fluminense. Observatório Sócio - Econômico da Região Norte Fluminense – **Boletim Técnico n° 6** – 51p. 2002.

BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. Climatologia e a cana-de-açúcar. PLANALSUCAR. Coordenadoria Regional Sul**. COSUL**, Araras, v.1, n.1, p.1-22, 1977.

BARBOSA, E. A. A.; ARRUDA, F. B.; PIRES, R. C. M.; SILVA, T. J. A.; SAKAI, E. Cana-de-açúcar com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: Ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.952-958, 2012.

BATALHA, B. R. **Temperatura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar sob diferentes condições meteorológicas e potenciais de água no solo**. 2011. Viçosa – MG. 142p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa.

BAVARESCO, R. S. **Utilização do termômetro de infravermelho para determinação do estresse hídrico em cultura de soja irrigada**. 75p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal (SP), 1995.

BENINCASA, M. **Efeitos de rampas com diferentes declividades e exposições Norte e Sul de uma bacia hidrográfica sobre o microclima e produtividade biológica do *Sorghum bicolor* (L.) Moench**. Jaboticabal, 1976. 103 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1976.

BERGAMASCHI H. **Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas.** In: BERGAMASCHI, H. Agrometeorologia aplicada à irrigação. Porto Alegre: UFRGS, Ed. Universidade, p.25-32. 1992.

BERDING, N.; MOORE, P. H. Advancing from opportunistic sexual recombination in sugarcane: Lessons from tropical photoperiodic research. Proc. Int. Soc. **Sugarcane Technology,** v.24, p.482–487. 2001.

BERNARDO, S. Manejo da Irrigação na Cana-de-açúcar. In: congresso nacional de irrigação e drenagem. 2006, Goiás, GO. **Anais....** [Brasília, DF: ABID, 2006].

BEZUIDENHOUT, C. N.; O'LEARY, G. J.; SINGELS, A., BAJIC, V. B. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural Systems**, v.76, n.2, p.589-599, 2003.

BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R.; ÖQUIST, G. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. In D. Hall, J. M. O. Scurlock, H. R. R. Bolhàr-Nordenkampf, C. R. C. Leegood, S.P. Long, (Ed). **Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual**. Chapman & Hall, London, 1993 p. 193-206.

BRAUNBECK, O. A.; OLIVEIRA, J. T. A. Colheita de cana-de-açúcar com auxílio mecânico. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.143-155, 2006.

BRUNINI, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: DINARDOMIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A.C M. de; ANDRADE LANDELL, M. G. DE. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico, p.205-218, 2008.

BRUNINI, R. G.; TURCO, J. E. P. Growth of sugarcane (*Sacharum ssp* L.) in different production scenarios exhibitions and slopes. **Ambiência**, v. 12, n. 3, p. 841-849, 2016a.

BRUNINI, R. G.; TURCO, J. E. P. Water stress indices for the sugarcane crop on different irrigated surfaces. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 10, p. 925-929, 2016b.

CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. **An introduction to environmental biophysics**, 2nd edn. New York: Springer. p. 286, 1998.

CARAMORI, P. H.; ARITA, C. A. Evapotranspiração Potencial no Estado do Paraná segundo o método de Penman. **Boletim Técnico, IAPAR**, Londrina, n.25, p.5-21, 1988.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.1, p.183-188, 1995.

CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; DA FONSECA LYRA, R. F.; DE ANDRADE, A. M. D.; DOS SANTOS, A. B.; MAIA, R. G. X. Heat flux and in the soil and radiation balance inside in area of atlantic forest in comparison with an area of sugarcane. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 3, p. 555-565, 2013.

CATI - Secretaria de Agricultura e Abastecimento/ Coordenadoria de Assistência Técnica Integral/ Instituto de Economia Agrícola (SAA/ CATI/ IEA). **Projeto LUPA 1995 e 2014 (Dados não consolidados): Censo Agropecuário do Estado de São Paulo. São Paulo**: SAA/ CATI/ IEA, 2015.

CESAR, M. A. A.; DELGADO, A. A.; CAMARGO, A. P.; BISSOLI, B. M. A.; 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**, v.6, p.32-38, 1987.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Estudo sobre as Possibilidades e Impactos da Produção de Grandes Quantidades de Etanol visando à Substituição Parcial de Gasolina no Mundo.** Disponível em: http://www.cgee.org.br/atividades/redirect/3621. Acesso Dezembro de 2016.

COAN, R. M.; TURCO, J. E.; PIVETTA, K. F.; COSTA, M. N. D.; MATEUS, C. D. D'A. M. Emerald zoyzia grass development regarding photosynthetically active radiation in different slopes. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.3, p.501-509, 2012.

COELHO, M. B.; BARBOSA, M. H. P.; MARCIEL, M. L. Manejo da irrigação na cana-soca no cerrado de Minas Gerais. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 8, 2002, Recife. **Anais...** Recife: STAB, 2002. p.591-598.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar**. v.2, n.1, p.33. 2015.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Produção Brasileira de cana-de-açúcar: Safra 2014**. Disponível em: http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1101&t=2. Acesso em Dezembro de 2016.

CTC - Centro de Tecnologia Canavieira. **Revista Censo CTC: Safra 2013/2014** – Brasil, v.1, n.1, p.16, 2015.

DA COSTA SANTOS, L.; LEAL, D. P. V.; JOSÉ, J. V.; COELHO, R. D.; DA SILVA BARROS, T. H. Aplicação do modelo CSM-CANEGRO em estudo de viabilidade econômica da cana-de-açúcar irrigada por pivô central. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 13-22, 2016.

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana-de-açúcar. **Irriga**, v.13, n.1, p.1-11, 2008.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.283–288, 2006.

DA SILVA, T. G.; DE MOURA, M. S.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. D. S.; JÚNIOR, W. G. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro1. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n.1, p. 64-71, 2012.

DA SILVA, T. G. F.; DE MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; DE SOUZA, L. S. B. Accumulated dry biomass, partitioning and industrial yield of irrigated sugarcane in the Brazilian Semi-Arid. **Revista Ceres**, v. 61, n. 5, p. 686, 2014.

DAVIES, W. J.; ZHANG, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual review of plant biology**, v. 42, n. 1, p. 55-76, 1991.

DAWSON, J. C.; HUGGINS, D. R.; JONES, S. S. Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems. **Field Crops Research**, v. 107, n. 2, p. 89-101, 2008.

DE ALMEIDA LOBO, F.; OLIVA, M. A.; RESENDE, M.; LOPES, N. F.; MAESTRI, M. Termometria ao infravermelho na programação da irrigação de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 2, p. 113-121, 2004.

DE ALMEIDA SILVA, M.; DOS SANTOS, C. M.; ARANTES, M. T.; BRUNELLI, M. C.; DE 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.

DE MORAES NOGUEIRA, H. M. C.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; PADRON, R. A. R. I.; VON ENDE, M.; FANTINEL, A. L.; NOGUEIRA, C. U. Technological parameters and economic analysis of sugarcane cultivated under irrigation depths for ethanol production in Santa Maria-RS, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 36, p. 3450-3459, 2016.

DE OLIVEIRA, A. R.; BRAGA, M. B.; SANTOS, B. L. S. Produção de biomassa de cana-de-açúcar no vale do São Francisco. **Energia na agricultura**, v. 29, n. 1, p. 27-38, 2014.

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

DIAS, F. L. F. **Relação entre a produtividade, clima, solos e variedades de cana-de-açúcar, na Região Noroeste do Estado de São Paulo.** Piracicaba, 1997. 64p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

DIAS, F. L. F.; MAZZA, J. A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R. F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.3, p.627-634, 1999.

DIOLA, V.; SANTOS, F. **Fisiologia. Cana-de-açúcar**: Bioenergia, açúcar e etanol-tecnologias e perspectivas, v.2, p. 25-49, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33). Campina Grande: UFPB, 1994. 306p.

DOURADO NETO, D. **Programa SWRC (Version 1.00): Soil-Water Retention Curve (software)**. Piracicaba: ESALQ; DAVIS: University of Califórnia, 1995.

Embrapa Agritempo. **Índice de Seca**. Disponível em: http://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp. Acesso Dezembro de 2016.

Embrapa Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília, DF. 353 p. 2013.

ENDRES, L.; SILVA, J. V.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. D. S. Photosynthesis and water relations in Brazilian sugarcane. **Open Agriculture**. J, v. 4, n. 3, 2010.

FAO. **FAOSTAT**. Disponível em: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize. Acesso: Dezembro de 2016.

FARIA, M. T.; TURCO, J. E.; FERNANDES, E. J.; GUIRRA, A. M. Resposta produtiva do feijoeiro comum a diferentes manejos de irrigação. **Irriga**, v.17, n.2, p.137-147, 2012.

FARIAS, C. H.; De A.; NETO, J. D.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R. Índice de área foliar em cana-de-açúcar sob diferentes níveis de irrigação e zinco na Paraíba. **Revista Caatinga**, v. 20, n. 4, p. 55, 2007.

FARIAS, C. H. D.; FERNANDES, P. D.; AZEVEDO, H. M.; NETO, J. D. 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 JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L. D.; ESCOBEDO, J. F.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; ARAÚJO NETO, R. A. D. Cana-de-açúcar com irrigação por gotejamento em dois espaçamentos entrelinhas de plantio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p. 798-804, 2014.

FERNANDES, E. J. Determinação do índice de estresse hídrico em cultura do feijoeiro com termômetro de infravermelho. **Irriga**, v.15, n.3, p.248, 2010.

FERNANDES, E. J.; TURCO, J. E. P. Utilização do CWSI na determinação de estresse hídrico em cultura de soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.2, p.347-355, 2001.

GARCIA, A. **Utilização da temperatura do dossel vegetativo na estimativa de índices de estresse, para a determinação da necessidade hídrica do feijoeiro (*Phaseolus vukaris* L).** Jaboticabal, 2000. 135p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Universidade Estadual Paulista.

GARCÍA-TEJERO, I. F.; DURÁN-ZUAZO, V. H.; MURIEL-FERNÁNDEZ, J. L.; JIMÉNEZ-BOCANEGRA, J. A. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus orchards. **Functional Plant Biology**, v. 38, p. 106–117, 2011.

GASCHO, G. J., SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I.D., PEET, M.M. **Crop-water relations**. New York: John Wiley, Cap. 14, p.445-479, 1983.

GAVA, G. J. 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 e Ambiental**, v.15, n.3, p.250-255, 2011.

GEMENTE, A. C.; PINAZZA, A. H.; BRUGNARO, C.; GUIMARÃES, E.; OLIVEIRA NETO, G. R.; KRUGLIANSKAS, I.; SBRAGIA, R. Planejamento agrícola. In: BRUGNARO, C.; SBRAGIA, R. **Gerência agrícola em destilarias de álcool.** 2. ed. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR, 1986. p.29-83 (Coleção PLANALSUCAR, 1).

GITE - Grupo de Inteligência Territorial Estratégica. **Impacto da Mecanização da Colheita da Cana-de-Açúcar nas Áreas Declivosas do Estado de São Paulo**. Disponível em: https://www.embrapa.br/gite/. Acesso em Dezembro de 2016.

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

GROWING BLUE®. **Water Stress Level**. Disponível em: http://growingblue.com/the-growing-blue-tool/. Acesso em Dezembro de 2016.

HAMBLIN, A. P. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. **Advances in Agronomy**, v. 38, n. 95, p. 155, 1985.

HARTL, C. E. The third studv of water and cane rivening. **Hawaiian Plrs'Rec**. A - Honolulu, v.43, p.145-58, 1939.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar de cana-de-açúcar. **Revista da STAB**, v. 17, n. 1, p. 32-34, 1999.

HOLANDA, L. A. D.; SANTOS, C. M.; NETO, S.; DANTAS, G.; SOUSA, A. D. P.; SILVA, M. D. A. Variáveis morfológicas da cana-de-açúcar em função do regime hídrico durante o desenvolvimento inicial. **Irriga**, p. 573-584, 2015.

HUMBERT, R. P. Planting of sugar cane. In: HUMBERT, R.P. The growing of sugar cane. Amsterdan, **Elsevier**, v.1, n.1, p.103-130, 1968.

IEA - Instituto de Economia Agrícola. **Banco de dados**. São Paulo: IEA. http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=13601. 20 Mai. 2015.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; REGINATO, R. J. Remote-sensing of crop yields. **Science**, v. 196, n. 4285, p. 19-25, 1977.

IDSO, S. B.; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J.; REGINATO, R. J.; HATFIELD, J. L. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. **Agricultural Meteorology**, v.24, p.45-55, 1981.

INFRATEMP. **Termometria a infravermelho básica.** Disponível em: http://infratemp.com.br/. Acesso em fevereiro de 2017.

INMAN-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.

Inmet – Instituto Nacional de Meteorologia. **Monitoramento Climático**. Disponível em: http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=publicacoes. Acesso em Dezembro de 2016.

JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress. **Advanced Irrigation**. n.1, p.43-85. 1982.

JADOSKI, C. J.; TOPPA, B. E. V.; JULIANETTI, A.; HULSBOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. **Pesquisa aplicada e Agrotecnologia**, v.3, n.2, p.169-186, 2010.

JAMIL, M.; REHMAN, S.; LEC, K. J.; KIM, J. M.; KIM, H. S.; RHA, E. S. Salinity reduced growth PS2 photochemistry and chlorophyll content in radish**. Scientia Agrícola**, v.64, p.111-118, 2007.

JONES, H. G.; STOLL, M.; SANTOS, T.; DE SOUSA, C.; CHAVES, M. M.; GRANT, O. M. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field:

application to grapevine. **Journal of Experimental Botany**, v. 53, n. 378, p. 2249-2260, 2002.

JÚNIOR, R. P.; ABRAHÃO, R. F.; TERESO, M. J. A. Concepção da célula de trabalho de equipamento de auxílio à colheita da cana-de-açúcar sob a perspectiva da ergonomia e da segurança do trabalho. **Ciência Rural**, v. 43, n. 7, p. 1223-1229, 2013.

JUNIOR, F. R.; JUNIOR, W. Q. R.; RAMOS, M. L. G.; ROCHA, O. C.; BATISTA, L. M. T.; DA SILVA, F. A. M. Produtividade e qualidade de variedades de cana-de-açúcar de terceira soca sob regime hídrico variável. **Nativa**, v. 4, n. 1, p. 36-43, 2016.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, v. 61, n.3, p.253-271, 1999.

KUIJPER, J. Bijdrage Tot de Physiologie der Huidmondjes van *Saccharum officinarum* L. **Archief Suikerind. Ned.- Indie**, India, v. 23. p. 1673-1700, 1915.

LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P.; FIGUEIREDO, P.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A.; DINARDO-MIRANDA, L. L.; SCARPARI, M. S.; GARCIA, J. C.; BIDOIA, M. A. P.; SILVA, D. N.; MENDONÇA, J. R.; KANTHACK, R. A. D.; CAMPOS, M. F.; BRANCALIAO, S. R.; Petri, R. H.; MIGUEL, P. E. M. **Sistema de multiplicação de cana-de-açúcar com uso de mudas pré-brotadas (MPB) oriundas de gemas individualizadas**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas - IAC, 22p. 2012.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; PERFECT, E.; TORMENA, C. A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. **Agronomy Journal**, v.1, n. 97, p.1210-1215, 2005.

LEBOURGEOIS, V., CHOPART, J. L.; BÉGUÉ, A.; MÉZO, L. LE. Towards using a thermal infrared index combined with water balance modelling to monitor sugarcane irrigation in a tropical environment. **Agricultural Water Management**, v.97, n.1, p.75-82. 2010.

LIU, D. L.; KINGSTON, G.; BULL, T. A. A new technique for determining the thermal parameters of phenological development in sugarcane, including suboptimum and supra-optimum temperature regimes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.90, n.1, p.119-139, 1998.

MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI, P. E. R.; MACHADO, D. F. S. P.; MACHADO, E. C.; DE ANDRADE LANDELL, M. G. 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, 2010.

MAES, W. H.; STEPPE, K. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. **Journal of Experimental Botany**, v. 63, n. 13, p. 4671-4712, 2012.

MAGALHÃES, A. C. N**.** Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T.; (Coord.). **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p.113-118.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e perspectivas**. Piracicaba, São Paulo: POTAFOS, p. 201, 1997.

MAPA - Ministério da Agricultura. **Cana-de-açúcar**. Disponível em:http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar. Acesso em 20 Fevereiro de 2015.

MARAFON, A. C. Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático. **Embrapa Tabuleiros Costeiros.** Aracaju, v. 1, n. 1, 29 p. 2012.

MARCHIORI, L. S**. Influência da época de plantio e corte na produtividade da cana-de-açúcar**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 284 p.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA, J. G. B. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.

MAZARON, B. H. S. **Crescimento da cana-de-açúcar em superfícies irrigadas, com diferentes exposições e declividades**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Jaboticabal-SP. 2013. p.55.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. **Journal of experimental botany**, v. 51, n. 345, p. 659-668, 2000.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; VANZOLINI, S.; MATTIUZ, C. F. M**. História e morfologia da cana-de-açúcar**. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.;

MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in plant science**, v. 11, n. 1, p. 15-19, 2006.

MORALES, R. G. F.; RESENDE, L. V.; BORDINI, I. C.; GALVÃO, A. G., REZENDE, F. C. Caracterização do tomateiro submetido ao déficit hídrico. **Scientia Agraria**, v. 16, n. 1, 2015.

NÓBREGA, J. C. M. (eds) **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba, v.1, n.11–18, 2006.

NETO, J. D.; FIGUEREDO, J. L. D. C.; FARIAS, C. D.; AZEVEDO, H. D.; AZEVEDO, C. D. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 283-288, 2006.

NI, Z.; LIU, Z.; HUO, H.; LI, Z. L.; NERRY, F.; WANG, Q.; LI, X. Early water stress detection using leaf-level measurements of chlorophyll fluorescence and temperature data. **Remote Sensing**, v. 7, n. 3, p. 3232-3249, 2015.

NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA JUNIOR, J. F. Resistência estomática, tensão de água no xilema e teor de clorofila em genótipos de gravioleira. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 3, p. 491-495, 2001.

ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P. Influência dos fatores climáticos na produção. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T**. Ecofisiologia da produção agrícola**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1987. p.71-100.

PEDROSA, R. M. B.; SANTOS, J. S.; ALBUQUERQUE, W. G.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS NETO, J. Avaliação dos parâmetros dos colmos da cana-de-açúcar, segunda folha, submetida a níveis de irrigação e adubação. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, v. 5, n. 1, p. 1-5, 2005.

PFISTER, S.; KOEHLER, A.; HELLWEG, S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA. **Environmental science e technology**, v. 43, n. 11, p. 4098-4104, 2009.

PIRES, R.C.M.; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B.; FOLEGATTI, M. V. Necessidades hídricas das culturas e manejo de irrigação. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. **Irrigação**. Piracicaba: SBEA, 2001. v.1, p.121-94.

RAMESH, P.; MAHADEVASWAMY, M. Effect of formative phase drought on diferente classes of shoots, shoot mortality, cane attributes, yield and quality of four sugarcane cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.185, p.249-258, 2000.

RIDESA - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. **Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar**. Curitiba, PR.136 p. 2010.

RODRIGUES, J.D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. Botucatu-SP, n.1, p.101, 1994

RITCHIE, J.T.; BURNETT, E.; HENDERSON, R.C. Dryland evaporative flux in a subhumid climate. 3. Soil water influences. **Agronomy Journal**, Madison v.64, p.168-173, 1972.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; BARACAT NETO, J.; SIQUEIRA, D. S.; SOUZA, Z. M. Mapeamento das formas do relevo para estimativa de custos de fertilização em cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 2, p.1077-1090, 2012.

SANMARTIN, J. P.; ACEVEDO, E. **Temperatura de canopia, CWSI e rendimiento en genotipos de trigo.** 2001. 58 p. Laboratorio de Relación Suelo-Água-Planta. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287-294, 1998.

SANTOS, J. R. D.; OLIVEIRA JÚNIOR, L. F. G. D.; SOUSA, J. P. S.; SILVA JÚNIOR, C. D. D.; SARMENTO, C. R. Performance of promissing sugar cane genotypes using physiological and biometrical tools. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3, 2014.

SANTOS, E.; SUZUKI, B.; SATIKA, M. Efeito da salinidade sobre as plantas. **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 4, p.6, 2008.

SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. de Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.61, n.5, p.486-491, 2004.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar**.** In: SEGATO, S. V. et al. **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: Livroceres, p.19-36, 2006.

SENAMHI - Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [National Service of Meteorology and Hydrology]: **Ministerio de Medio Ambiente y Agua [Ministry of Environment and Water** - Government of Bolivia]. Spanish. Available from: http://www.senamhi.gob.bo/sismet/index.php. Acesso em 20 de Novembro de 2015.

SILVA, V. P. R.; BORGES, C. J. R.; ALBUQUERQUE, W. G. Necessidades hídricas da cana-de-açúcar cultivada em clima tropical. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, n.2, p.625-632, 2014.

SILVA, A. M.; CARLIN, S. D.; PERECIN, D. Fatores que afetam a brotação inicial da cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v.51, p.457-466, 2004.

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**, v.67, n.3, p.655-661, 2008.

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

SILVA, M. De A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. De L.; GAVA, G. J. C.; KOLLN, ORIEL T. Yield potential of sugarcane under drip irrigation in function of varieties and crop cycles. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 3, p. 241-249, mar. 2014 .

SILVA, M. D. A.; JIFON, J. L.; DA SILVA, J. A.; SHARMA, V. Use of physiological parameters as fast tools to screen for drought tolerance in sugarcane. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 19, n. 3, p. 193-201, 2007.

SILVA, M.; ARANTES, M. T.; HEIN, A. F. L.; PINCELLI, R. P.; SANTOS, C. M.; MOURA, P. C. Características morfofisiológicas e produtividade de cana-de-açúcar variam de acordo com a cultivar e o regime hídrico. **Irriga**, Botucatu, ed. Especial, p. 160-177, 2015.

SIMÕES, W. L.; CALGARO, M.; COELHO, D. S.; DE SOUZA, M. A.; LIMA, J. A. Respostas de variáveis fisiológicas e tecnológicas da cana-de-açúcar a diferentes sistemas de irrigação. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 1, p. 11-20, 2014.

SINGELS, A.; DONALDSON, R. A.; SMIT, M. A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: theory and practice. **Field Crops Research**, v.92, p.291-303, 2005.

SOARES, A. M. S.; MACHADO, O. L. Tavares. Defesa de plantas: Sinalização química e espécies reativas de oxigênio. **Revista Trópica–Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 1, n. 1, p. 10, 2007.

STOCKLE, C. O.; DUGAS, W. A. Evaluating canopy temperature-based indices for irrigation scheduling. **Irrigation Science**, v.13, n.1, p.31-37, 1992.

SUÁREZ, L.; ZARCO-TEJADA, P. J.; SEPULCRE-CANTÓ, G.; PÉREZ-PRIEGO, O.; MILLER, J. R.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J. Assessing canopy PRI for water stress detection with diurnal airborne imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 2, p. 560-575, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia do estresse**. Fisiologia vegetal, v.4, p.738-772, 2004.

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

TERUEL, D. A.; BARBIERI, V.; FERRARO JR, L. A. Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. **Scientia Agricola**, v. 54, n. SPE, p. 39-44, 1997.

TESTI, L.; GOLDHAMER, D.; INIESTA, F.; SALINAS, M. Crop water stress index is a sensitive water stress indicator in pistachio trees. **Irrigation Science**, v.26, p.395-405, 2008.

TILLING, A. K.; O'LEARY, G. J.; FERWERDA, J. G.; JONES, S. D.; FITZGERALD, G. J.; RODRIGUEZ, D.; BELFORD, R. Remote sensing of nitrogen and water stress in wheat. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 77-85, 2007.

TRENTIN, R.; ZOLNIER, S.; RIBEIRO, A.; STEIDLE NETO, A. J. Transpiração e temperatura foliar da cana-de-açúcar sob diferentes valores de potencial matricial. **Engenharia Agrícola**, vol.31, n.6, p.1085-1095, 2011.

TRINTINALHA, M. A.; GONCALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; FOLEGATTI, M. V.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R. Comparação dos sistemas TDR e ECHO para medida de umidade, em um solo argiloso e em areia. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringa, v. 26, n. 3, p. 353-360, 2004.

TURCO, J. E. P.; PINOTTI JUNIOR, M.; RODRIGUES, T. J. D.; FERNANDES, E. J. Desenvolvimento da cultura de soja em terrenos com diferentes exposições e declividades. **Engenharia Agricola**, v.17, n.2, p.21-28, 1997.

TURCO, J. E.; MILANI, A. P.; FERNANDES, E. J. Adequacy of the Penman-Monteith method to irrigated surface with different exposures and declivity. In: International Conference of Agricultural Engineering. 2012. **Anais…** Valencia: CIGR – AGENG 2012. CD Rom.

UDOP – União dos Produtores de Bioenergia. **Produção Brasileira**. Disponível em: http://www.udop.com.br/index.php?item=safras. Acesso Dezembro de 2016.

VALSECHI, O. A. **Características tecnológicas e avaliação da qualidade industrial da cana-de-açúcar.** 1st Ethanol Week: Sharing the Brazilian Experience Araras, SP. 1 a 5 de setembro de 2008.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; CEZAR-BARROS, A. H. **Zoneamento de aptidão climática do estado de Pernambuco para três distintos cenários pluviométricos.** Recife:

COTEC/Data Agros – Informática & Informações Agrícolas/Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária de Pernambuco. 2001. 38p. Relatório Técnico.

VIANA, L. Q.; GONÇALVES, R. C.; ROTUNNO FILHO, O. C. Avaliação espaço-temporal do NDVI com a precipitação e com a evapotranspiração na bacia do Rio Preto RJ/MG. in: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves-RS. **Anais...** Bento Gonçalves-RS: ABRH, 2013. p.8.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; DELAZARI, F. T. Morpho-physiological indicators of water stress on sugarcane as a function of irrigation depths. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3, 2014.

VIEIRA, G. H. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R; E DELAZARI, F. T. Época de interrupção da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. **Irriga**, v.18, n. 3, p. 426-441, 2013.

ZARCO-TEJADA, P. J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; BERNI, J. A. J. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. **Remote Sensing of Environment** v. 117, p. 322–337, 2012.

ZARCO-TEJADA, P. J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; WILLIAMS, L. E.; SUÁREZ, L.; BERNI, J. A.; GOLDHAMER, D.; FERERES, E. A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. **Remote sensing of environment**, v. 138, p. 38-50, 2013.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J. C. Sugarcane response to water-deficit stress during early growth on organic and sand soils. **American Journal Agriculture and Biological Sciencies**, v. 5, n. 3, p. 403-414, 2010.

WANJURA, D. F.; UPCHURCH, D. R. Infrared thermometer calibration and viewing method effects on canopy temperature measurement. **Agricultural and Forest Meteorology,** v. 55, n. 3, p. 309-321, 1991.

WANG, X.; YANG, W.; WHEATON, A.; COOLEY, N.; MORAN, B. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: a first step towards automated plant

water stress monitoring. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.73, n.1, p.74-83, 2010.

WINTERHALTER, L.; MISTELE, B.; JAMPATONG, S.; SCHMIDHALTER, U. High throughput phenotyping of canopy water mass and canopy temperature in well-watered and drought stressed tropical maize hybrids in the vegetative stage. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 35, n. 1, p. 22-32, 2011.