UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

HORMESIS DE GLYPHOSATE EM CANA-DE-AÇÚCAR

RENATA PASSOS PINCELLI-SOUZA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU
DEZEMBRO-2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

HORMESIS DE GLYPHOSATE EM CANA-DE-AÇÚCAR

RENATA PASSOS PINCELLI-SOUZA

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU
DEZEMBRO-2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO – DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP – FCA – LAGEADO – BOTUCATU (SP)

Pincelli-Souza, Renata Passos, 1984-
P647h *Hormesis* de glyphosate em cana-de-açúcar / Pincelli-Souza, Renata Passos. – Botucatu : [s.n.], 2014
viii, 75 f. : grafs., tabs., fots. color.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Marcelo de Almeida Silva
Inclui bibliografia

1. Cana-de-açúcar – Doenças e pragas. 2. Plantas – Efeitos dos herbicidas. 3. Produtividade agrícola. I. Silva, Marcelo de Almeida. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS

CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "***HORMESIS*** **DE GLYPHOSATE EM CANA-DE-AÇÚCAR"**

ALUNA: RENATA PASSOS PINCELI

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Aprovado pela Comissão Examinadora

PROF. DR. MARCELO DE ALMEIDA SILVA

PROFª DRª CARMEN SILVIA FERNANDES BOARO

PROF. DR. EDIVALDO DOMINGUES VELINI

PROFª DRª ELZA ALVES CORRÊA

PROF. DR. EDUARDO NEGRISOLI

Data da Realização: 01 de dezembro de 2.014.

OFEREÇO

A Deus e agradeço imensamente por
todas as oportunidades à mim concedidas.

DEDICO

Aos meu pais, Luiz Norberto Pincelli e Maria Aparecida S. Passos Pincelli que muito já fizeram e ainda fazem por mim. Aos meus irmãos Murilo Passos Pincelli e Letícia Passos Pincelli pelos momentos agradáveis durante essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Infinitamente a Deus, e a toda minha família.

Ao Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva, pela orientação, paciência e apoio para desenvolver esse projeto.

À família Viator pelo amparo e amizade durante minha estadia nos EUA.

Ao meu marido Emerson de Freitas Cordova de Souza por todo amor demonstrado e pela constante ajuda, preocupação e paciência.

Aos pesquisadores e funcionários da USDA em Houma, Louisiana pela recepção e suporte durante todo período de doutorado sanduíche.

À Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios – APTA, da cidade de Jaú - SP, pela instalação e toda infraestrutura para realização do experimento.

A todos os pesquisadores e funcionários da APTA, em especial ao grande amigo Sr. Geraldo, que prepara o café mais gostoso do mundo.

Aos funcionários do NUPAM, José Roberto Marques Silva, Luis Marcelo Siono e José Guilherme Cordeiro, pelo auxílio na realização de análises.

Aos funcionários da biblioteca da FCA, Airton, Maísa, Joel, Nilson, Ana Lúcia, Denise, Solange, Messias, Maria Inês, Daniele, Célia, Eliane, Maria Lúcia e Valdemir, pelas gentilezas e pelos muitos bom dia, boa tarde e boa noite.

Aos amigos Rodrigo Oliver, Paula Caroline Moura, Deise Paula Silva, Paula Sorrilla, William Dellabiglia, Fernanda Bortolheiro, Andressa Rhein, Marcela Brunelli e Franciana de Souza que colaboraram de várias formas para a realização desta tese.

Aos amigos de todas as horas Karin, Suzana, Roberta, Rafael e Gabriela.

À CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido através das bolsas de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS VI
LISTA DE FIGURAS VII
RESUMO 1
SUMMARY 3
2 REVISÃO DE LITERATURA 7
2.1 O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil 7
2.2 Fenologia da cana-de-açúcar 8
2.3 Glyphosate: características gerais 14
2.4 Efeito hormótico 19
3 MATERIAL E MÉTODOS 26
3.1 Condições experimentais 26
3.2 Aplicação dos tratamentos 27
3.3 Delineamento experimental 28
3.4 Extração dos compostos: ácido chiquímico, ácido quínico, glyphosate e ácido aminometilfosfônico (AMPA) 29
3.5 Teores de Fósforo 33
3.6 Variáveis Morfológicas 33
3.7 Variáveis Fisiológicas 35
3.8 Qualidade tecnológica e Produtividade da cana-de-açúcar 37
3.9 Análise Estatística 38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 39
4.1 Extração dos compostos: ácido chiquímico, ácido quínico, glyphosate e ácido aminometilfosfônico (AMPA) 39
4.2 Teores de Fósforo 42
4.3 Variáveis Morfológicas 43
4.4 Variáveis Fisiológicas 49
4.5 Qualidade tecnológica e Produtividade da cana-de-açúcar 56
5 CONCLUSÕES 59
6 REFERÊNCIAS 60
APÊNDICE 74

LISTA DE TABELAS

Tabela Página

1. Análise química do solo da área de plantio 27
2. Curvas analíticas e faixas de concentração para cada composto analisado..... 33
3. Equações de ajuste da massa de matéria seca da parte aérea (MMSPA), massa de matéria seca das folhas (MMSF) e área foliar (AF) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate.....53
4. Variáveis tecnológicas e produtividade no ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842. após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate.....57

LISTA DE FIGURAS

Figura Página

1. Esquema da produção de aminoácidos aromáticos e compostos fenólicos..... 17
2. Total de precipitação, média da temperatura máxima e mínima diárias, para o período do experimento, compreendido entre novembro de 2010 a outubro de 2011... 27
3. Croqui das áreas experimentais utilizadas para avaliar o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar e para estimar a produtividade de colmos e de açúcar da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate 29
4. Cromatograma do ácido chiquímico, ácido quínico, glyphosate e ácido aminometilfosfônico (AMPA) com os fragmentos gerados na concentração de 300 ng mL^{-1}. 32
5. Conteúdo de ácido chiquímico, ácido quínico e glyphosate nas folhas durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate 41
6. Teores de fósforo em folhas durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate..... 42
7. Percentual de incremento do teor de fósforo em folhas durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate 43
8. Número de perfilhos e comprimento dos colmos durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate.... 45
9. Número de entrenós nos colmos, comprimento médio de entrenós, diâmetro do colmo e área foliar durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate 46
10. Diâmetro do colmo e área foliar durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate..... 47

11. Massa de matéria seca do colmo (MMSC), massa de matéria seca das folhas (MMSF) e massa de matéria seca da parte aérea (MMSPA) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate 49
12. Percentual de acúmulo de massa de matéria seca do colmo e folhas durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate 49
13. Condutância estomática (Gs), eficiência fotoquímica (Fv/Fm), índice SPAD e conteúdo de clorofila total (CCa+CCb) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate..... 52
14. Índice de área foliar, área foliar específica (AFE), razão da área foliar (RAF), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa de assimilação líquida (TAL), taxa de crescimento da cultura (TCC) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate..... 54

RESUMO

Atualmente, tanto no setor de produção agrícola quanto nas diversas áreas da saúde humana, o efeito de subdoses de produtos aplicados, denominado como hormótico, vem sendo amplamente discutido e pesquisado, com o objetivo de compreender o mecanismo de ação estimulante e benéfica de diversas substâncias inicialmente consideradas como tóxicas, quando aplicadas em doses elevadas. O objetivo desta pesquisa foi verificar o efeito hormótico da subdose do herbicida glyphosate nas variáveis morfológicas, fisiológicas e a produção final de cana-de-açúcar. Os experimentos foram plantados em novembro de 2010 na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento de Jaú, SP, da APTA Pólo Centro-Oeste/SAA, conduzidos e avaliados durante o ciclo de cana-de-ano em cana-planta. A variedade utilizada foi a SP80-1842. Os tratamentos foram constituídos pela aplicação ou não de subdose de glyphosate. A aplicação dos tratamentos foi aos 70 dias após o plantio (DAP) e a subdose utilizada foi de 1,8 g e a ha^{-1} de glyphosate. No primeiro experimento foi avaliado o crescimento e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar em parcelas de três linhas de plantio por três metros, nas quais foram coletadas um metro linear para avaliações em oito épocas, isto é, 70, 105, 140, 175, 210, 245, 280 e 315 dias após o plantio, em um delineamento de blocos casualizados com seis repetições. No segundo experimento, avaliou-se produtividade de colmos e de açúcar, foram utilizadas parcelas de cinco linhas de plantio por oito metros foram dispostas blocos casualizados com seis repetições, e coletadas ao final do ciclo da cultura, ou seja, aos 315 DAP. Em cada época de amostragem, do primeiro experimento, foram avaliados conteúdo de ácido chiquímico, ácido quínico, glyphosate e ácido aminometilfosfônico, teores de

fósforo nas folhas, variáveis morfológicas (número de perfilhos, comprimento de colmos, número de entrenós, comprimento médio de entrenós, diâmetro de colmos, área foliar e massa de matéria seca de colmos, folhas e parte aérea), variáveis fisiológicas (condutância estomática, máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II, índice SPAD, conteúdo total de clorofila e índices fisiológicos). No segundo experimento, de produtividade, foram avaliados tonelada de cana por hectare (TCH), tonelada de pol por hectare (TPH), fibra% cana, brix% caldo, pureza, pol% cana e açúcar total recuperável (ATR). A aplicação de subdose de glyphosate promoveu aumento do conteúdo de ácido chiquímico, quínico e glyphosate durante algumas avaliações durante o ciclo da cultura nas plantas tratadas com subdose de glyphosate. Houve incrementos nos teores de fósforo, e em algumas variáveis morfológicas (número de perfilhos, comprimento de colmos, número de entrenó, área foliar, massa da matéria seca de colmo, folhas e parte aérea) e fisiológicas (máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II, índice de área foliar e taxa de crescimento da cultura) durante todo ciclo da cultura com tratamento de subdose de glyphosate. Nas variáveis tecnológicas, houve redução da fibra% cana, incremento de brix% caldo, pol% cana e ATR com aplicação de subdose de glyphosate. Houve efeito hormótico na produtividade da cana-de-açúcar, com aumento de 38% na TCH e de 47% na TPH das tratadas em relação às não tratadas. Portanto, devido ao aumento verificado nas variáveis morfológicas, fisiológicas e no ATR, convergindo em incremento na produtividade, a aplicação de subdose de glyphosate em cana-de-açúcar torna-se uma ferramenta promissora no seu manejo.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., efeito hormótico, sal de isopropilamina de glyphosate, subdose.

HORMESIS OF GLYPHOSATE IN SUGARCANE. Botucatu, 2014, 75 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Renata Passos Pincelli-Souza

Adviser: Marcelo de Almeida Silva

SUMMARY

Currently, both in agricultural production and in areas of human health sector, the low dose effect of products applied, termed as hormetic, has been widely debated and researched in order to understand the mechanism of stimulating and beneficial action of several substances initially considered as toxic, when applied in high doses. The objective of this research was to investigate the effect of low dose of glyphosate on growth, phosphorus accumulation in the shoot, the production of shikimic and quinic acid, and final yield of sugarcane. The experiments were planted on November 05, 2010 in Research and Development Unit of Jaú, SP, APTA Polo Midwest / SAA, and carried out and evaluated over the course of the year in sugarcane plant cane. The variety used was SP80-1842. Two experiments were carried out to evaluate the effect hormetic during growth and development of sugarcane and cane yield and sugar. The treatments consisted at application or not of low dose of glyphosate. The spraying was at 70 DAP and the low dose dose used was 1.8 g a e ha^{-1} glyphosate. In the first experiment evaluated the growth and development of the sugar cane crop in portions of three planting rows of three meters, in which it was collected a linear meter for evaluations in eight times, or , 70, 105, 140, 175, 210, 245, 280 and 315 days after planting, in a randomized block design with six replications. In the second experiment, productivity was evaluated of stalks and sugar, plots were used in five plant lines by eight meters were willing randomized block design with six replications, and collected at the end of the cycle, or, to 315 DAP. At each sampling time, the first experiment examined content of shikimic acid, quinic acid,

glyphosate and aminomethylphosphonic acid, phosphorus concentration in leaves, morphological variables (number of tillers, length of stems, number of internodes, medium length of internodes , stalk diameter, leaf area and dry weight of stems, leaves and shoots), physiological (stomatal conductance, photochemical efficiency of photosystem II, SPAD index, total chlorophyll content and physiological indices). In the second experiment, productivity, were evaluated ton of cane per hectare (TCH), pol ton per hectare (TPH), fiber% cane, brix% juice, purity, pol% cane and total recoverable sugar (ATR). The application of low dose of glyphosate promoted an increase of shikimic acid content, quinic and glyphosate for several evaluations during the crop cycle in plants treated with low dose of glyphosate. There were increases in phosphorus, and some morphological variables (number of tillers, length of stems, number of internodes, leaf area, dry matter of stem, leaves and shoots) and physiological (photochemical efficiency of photosystem II leaf area index and growth rate of the culture) throughout the crop cycle with treatment with low dose of glyphosate. In the technological variables, there was reduced fiber% cane, an increase of brix% juice, pol% cane and ATR with application of sub-dose of glyphosate. There was hormesis effect on the productivity of cane sugar, an increase of 38% in the TCH and 47% in TPH of treated compared to untreated. Therefore, because of the increase in morphological variables, physiological and ATR, converging in an increase in productivity, the application of sub-dose of glyphosate in cane sugar becomes a promising tool in their management.

Keywords: *Saccharum* spp., hormesis, isopropylamine salt of glyphosate, low dose.

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) fornece matéria-prima que pode dar origem a grande diversidade de produtos, abrangendo três áreas estratégicas em contínuo desenvolvimento em todo o mundo, alimentos, energia e ambiente. O crescimento da cana-de-açúcar varia com a época de plantio, o tipo de muda utilizada e as condições ambientais. A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas do mundo, e referência no Brasil, sendo o maior produtor mundial com grande área de produção e possibilidade de expansão. Entretanto, a competição por área para produção de outras culturas induz a busca de maior produção de cana-de-açúcar por área. Assim, estudos envolvendo solo, uso da água, melhoramento de cultivares, adubação e época de cultivo vem sendo realizados objetivando maior produção. Espaço também existe para novas tecnologias como o uso de maturadores, plantio através de mudas pré-brotadas, e mais recentemente o surgimento de pesquisas voltadas ao efeito hormótico de substâncias consideradas tóxicas em níveis elevados.

O efeito hormótico é definido como o estímulo de crescimento de uma planta por baixas doses de um composto tóxico denominando-se “hormesis”, indicando um comportamento que provavelmente não é único, mas é pouco frequente entre os herbicidas. Dentre os herbicidas que causam efeito hormótico, o glyphosate é o mais utilizado atualmente.

Recentes pesquisas foram realizadas com subdoses de glyphosate no desenvolvimento inicial de diversas plantas e houve efeitos positivos no crescimento em altura, aumento da biomassa, desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular das

plantas estudadas, bem como incrementos na absorção e acúmulo de fósforo nas folhas. Também foi verificado efeito estimulante da aplicação de subdose de glyphosate no desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar.

Dentre as metodologias disponíveis atualmente, variáveis morfológicas e fisiológicas para mensurar o efeito hormótico causado pela aplicação de subdoses de glyphosate vêm sendo utilizados em pesquisas em alguns países, como Brasil, Estados Unidos e Alemanha, os quais proporcionaram resultados com bastante credibilidade. Além disso, devido ao acúmulo do ácido chiquímico causado pela inibição da enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato-sintase (EPSPs), medições da concentração deste e do ácido quínico, também vêm sendo utilizados, buscando relacionar esses resultados com o efeito benéfico da hormesis proporcionada pelas baixas doses de glyphosate.

Diante do exposto e considerando o desafio de se produzir elevada quantidade de alimentos com baixa disponibilidade de terras agrícolas, buscando dar ênfase na produção agrícola facilitado pelas novas tecnologias, tais como, uso de pesticidas induzindo o estimulo ao crescimento, pode ser uma boa estratégia para incremento da produção de cana-de-açúcar por área, uma vez que o aumento proporcionado pela adubação, irrigação e espaçamento já estão praticamente estabelecidos. Assim, o objetivo desta pesquisa foi verificar o efeito de subdose do herbicida glyphosate no crescimento, acúmulo de fósforo, concentrações de ácido chiquímico e quínico da parte aérea e na produção final de cana-de-açúcar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil

O valor econômico da cana-de-açúcar é baseado principalmente em três atributos: é altamente produtiva; utiliza eficazmente insumos agrícolas (água, fertilizantes, pesticidas, mão-de-obra); e pode ser processada localmente em produtos de valor agregado como açúcar, melaço, etanol e energia, todos passíveis de armazenamento e transporte. Coletivamente, esses atributos da cultura contribuem para tornar a cana-de-açúcar uma commodity do comércio primário dos países que a produzem (MOORE et al., 2014).

Cultivada em mais de 100 países, o Brasil lidera o ranking como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, seguido de Índia, China e Tailândia. É a cultura que produz maior biomassa colhida no mundo, em torno de 1,8 bilhões de toneladas em 26 milhões de hectares plantados no ano de 2012 (FAO, 2012).

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, cultivada desde a época da colonização. A produção total na safra 2014/15 está estimada em 659,10 milhões de toneladas, com uma área plantada de 9.098,03 mil hectares, distribuídas entre os estados produtores (CONAB, 2013). O Estado de São Paulo permanece como o maior produtor com 51,43% da área plantada e destaca-se como grande polo produtivo da cana-de-açúcar, seguido por Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Alagoas e Pernambuco. Esses sete estados são responsáveis por 92,07% da

produção nacional. Os demais estados produtores possuem áreas menores, com representações abaixo de 3%. (CONAB, 2013).

Para um bom desenvolvimento da cultura é de suma importância a escolha da época de plantio adequada que disponibilize condições climáticas ideais para a planta se desenvolver e produzir sacarose e também disponibilidade de água, temperaturas elevadas e alta incidência de radiação solar (VIANNA, 2014).

Na região centro-sul do Brasil, a cana-de-açúcar pode ser plantada durante todo ano, no entanto há algumas restrições referentes à disponibilidade hídrica, características das variedades quanto à maturação e ciclo fenológico. Comumente, a cana-de-açúcar plantada no período de setembro a novembro, é chamada de cana-de-ano, pois seu ciclo tem a duração de 12 meses. Essa época de plantio pode apresentar restrições quanto às condições climáticas, como déficit hídrico, que pode ocorrer durante o desenvolvimento da cultura, sendo assim desfavorável. Ainda, nesse sistema de plantio, a cana-de-açúcar apresenta produtividade abaixo de 100 t ha^{-1}, sendo colhida já na próxima safra, normalmente no final desta (SEGATO et al., 2006; BARBOSA, 2012). A chamada cana-de-ano-e-meio é plantada de janeiro a março/abril, e permite a colheita com 18 meses e a produtividade geralmente é acima de 120 t ha^{-1}. A cana-de-ano-e-meio tem taxa de crescimento restrita de maio a setembro em função do clima, com maior desenvolvimento de outubro a abril (SCARPARI, 2002; BARBOSA, 2012). A escolha das variedades também se torna fundamental para se obter matéria-prima com maturação adequada ao longo da safra, além de garantir a brotação da soqueira em diferentes épocas (SEGATO et al., 2006; BARBOSA, 2012). Há também a cana-de-inverno, plantada de maio a agosto, geralmente caracterizado pelo período seco na região centro-sul, e a produtividade se estabelece geralmente acima de 100 t ha^{-1}, porém neste período, a cultura necessita de irrigação, devido à baixa disponibilidade de água no solo (BARBOSA, 2012).

2.2 Fenologia da cana-de-açúcar

A fenologia vegetal objetiva descrever, sobre a perspectiva botânica, os diferentes estádios de desenvolvimento de uma cultura. Em relação à cana-de-açúcar, os estádios fenológicos foram recentemente descritos de maneira mais precisa do que em literaturas anteriores, abordando o desenvolvimento da cultura ao longo de todo o ciclo, de forma a contribuir para um melhor entendimento dos fatores ambientais e genéticos, bem como para o rendimento.

Recentemente, Bonnett (2014) descreveu detalhadamente os 10 estádios fenológicos da cana-de-açúcar, que foram divididos em: germinação, desenvolvimento das folhas, perfilhamento, alongamento do colmo, desenvolvimento dos colmos, emergência da inflorescência, floração, desenvolvimento do fruto, maturação das sementes e senescência. O autor considera a germinação/brotação, como sendo o estádio zero, e explica que tal estádio pode ser oriundo de sementes verdadeiras ou pela brotação de gemas de toletes, ou ainda através das gemas que permanecem na touceira após um corte.

Tradicionalmente o plantio da cana-de-açúcar é realizado através de toletes contendo gemas axilares posicionadas acima de cada entrenó. A utilização desse material vegetativo garante a integridade genética e propicia uniformidade da área plantada. Após o corte dos toletes, as gemas necessitam, além de umidade, temperaturas superiores a 12°C para iniciar o desenvolvimento dos tecidos nela agrupados. Segundo Segato et al. (2006), a faixa de temperatura ótima para a brotação pode variar entre variedades, contudo, considera-se que o processo de brotação é geralmente favorecido entre 28 e 34°C. Temperaturas inferiores a 21°C tornam este processo lento, enquanto temperaturas acima de 40° C são limitantes. A brotação inicia-se logo após a quebra da dominância apical, momento em que hormônios como auxina e citocinina estimulam a divisão e diferenciação celular. Ortiz-Morea (2013) afirma que os primórdios radiculares da cana-de-açúcar já são verificados microscopicamente após um dia de quebra da dominância apical e o processo de enraizamento inicial dura em média 30 dias.

A brotação das gemas remanescentes da cana cortada ocorre de forma mais rápida em comparação ao cultivo da cana-planta porque logo após a quebra da dominância apical, ou seja, logo após o corte, as gemas que permanecem na touceira já estão ligadas a um sistema radicular bem desenvolvido e capaz de suprir as necessidades hídricas e nutricionais, além de estarem localizadas de forma mais superficial e o desenvolvimento foliar encontra menor enfrentamento físico. O estabelecimento da nova touceira também pode ser favorecido pelas brotações que ocorrem antes da colheita. A capacidade de rebrota da touceira pode ser reduzida por temperaturas inferiores a 10,8°C (DONALDSON, 2009), deficiência hídrica ou por mau uso de inibidores de crescimento, como, por exemplo, o glyphosate utilizado como maturador.

Ainda conforme a classificação fenológica de Bonnett (2014), o primeiro estádio seria o desenvolvimento do caule, composto por repetidas unidades

vegetativas que apresentam um nó com uma folha a ele fixada, uma região denominada entrenó e uma gema axilar na base de cada entrenó.

O desenvolvimento do colmo culmina com a formação das folhas e por esta razão é possível acompanhar o desenvolvimento da cana-de-açúcar pelo número de folhas e nós. O sistema de contagem de folhas se dá pela ordem de formação no topo da planta, já que ao longo do ciclo da cultura, as folhas mais baixas envelhecem. Bonnett (2014) ainda afirma que logo após a total formação das folhas, inicia-se o alongamento celular e as folhas e nós de um mesmo nó passam por condições ambientais semelhantes até o florescimento. A contagem é iniciada a partir da primeira folha superior totalmente expandida, considerada a +1 e a partir desta, para as folhas totalmente expandidas os números são crescentes.

O desenvolvimento e alongamento foliar exige temperaturas elevadas, superiores a 32°C, segundo Bonnett et al. (2006). A taxa de protusão foliar em cana tem sido comparado com outras gramíneas tropicais por Allison et al. (2007), que demonstraram que a taxa de surgimento de folhas é muito mais baixa para a cana, em qualquer temperatura em comparação com o milho, milheto e capim elefante. Como o aumento no número de folhas tem potencial para aumentar a produtividade, diversos autores (RITCHIE et al., 1986; BONNETT et al., 2006; ALLISON et al., 2007; BONNETT, 2014) sugerem que futuros estudos devem ser direcionados para determinar a extensão da variação genética para esta característica.

O estádio subsequente à formação das folhas é o perfilhamento. Neste, inicia-se o processo de ramificação subterrânea que proporcionam a formação da touceira e o número de colmos necessários a rentabilidade agrícola. A formação de perfilhos novos se dá por meio do desenvolvimento e alongamento das celulas das gemas basais, já diferenciadas. O perfilhamento inicia-se em cerca de 40 dias após o plantio da cultura e a população máxima é alcançada entre 90 e 120 dias (DIOLA; SANTOS, 2012). Van Dillewijn (1952) explica que a duração do período vegetativo em cana é longo e, por esta razão, considera-se que há perfilhos primários (aqueles que se desenvolveram a partir do colmo primário), secundários (desenvolvidos a partir dos perfilhos primários) e assim sucessivamente.

Como o rendimento da cana depende do suficiente estabelecimento dos colmos, o perfilhamento é o processo mais associado à rentabilidade econômica. Bonnett (2014) afirma que o rendimento ideal depende do estabelecimento suficiente de

colmos, assim, o perfilhamento pode ser um processo de rendimento crescente. Os perfilhos são produzidos em excesso, até mais do que a cultura pode sustentar até a colheita. Com o excesso de perfilhamento, há competição por luz e nutrientes, levando à morte de até 50% dos perfilhos, e a partir de então a população é estabelecida.

Os fatores ambientais que mais interferem no desenvolvimento dos perfilhos são a luminosidade, temperatura e disponibilidade hídrica (JAMES, 2004). Dentre esses, a luz é considerado de extrema importância por estar associada diretamente com o desenvolvimento das gemas basais. Em relação aos fatores endógenos, Van Dillewijn (1952) considera que o perfilhamento é regulado pelas auxinas, hormônios sintetizados principalmente nos tecidos meristemáticos do ápice caulinar que promovem a diferenciação, divisão e alongamento de células. Este hormônio propicia concomitante ao desenvolvimento, a dominância apical, impedindo brotações laterais e consequentemente, reduz o perfilhamento. Sob o efeito de elevada luminosidade, a concentração de auxinas translocadas do ápice para a base dos colmos é diminuída, possibilitando o desenvolvimento de novos perfilhos. No caso da baixa intensidade luminosa, assim como em estações de dias curtos, o perfilhamento será diminuído ou cessado, dependendo do grau de manifestação da luminosidade, em termos de intensidade e duração (JADOSKI et al., 2010).

Outro fator igualmente importante é a temperatura. Van Dillewijn (1952) também cita que o perfilhamento aumenta à medida que a temperatura se eleva. Temperaturas superiores a 30°C e inferiores a 20°C retardam este processo.

Em revisão sobre cana-de-açúcar Jadoski et al. (2010) afirmam que solos de baixa fertilidade, principalmente deficientes em nitrogênio e fósforo, propiciam um ambiente deficitário ao perfilhamento, e nestes casos, é necessário utilizar maior número de toletes por área. Solos com baixa retenção de umidade ou com excesso também influenciam negativamente na formação de perfilhos, assim como o ataque intenso de pragas e doenças.

O terceiro estádio, conforme a classificação fenológica de Bonnett (2014), é o alongamento do caule. Neste estádio, os entrenós diferenciados durante o perfilhamento aumentam de tamanho e se expandem. Segundo Van Dillewijn (1952), um entrenó inicia a sua expansão quando a folha a ele acoplada já está totalmente expandida e seu crescimento máximo é atingido quando as quatro folhas superiores, mais jovens, já estiverem totalmente expandidas.

O crescimento da parte aérea é dependente da temperatura, umidade, fertilidade do solo, variedade cultivada, ataque de pragas e infestação de doenças, competição com plantas invasoras e época de cultivo (CHONG et al., 2010; JADOSKI et al., 2010; JAMES, 2004; RIPOLI; RIPOLI, 2009). O fator diretamente relacionado à expansão celular é a temperatura e Lingle (1999) e Smit e Singels (2006) afirmaram que o mínimo exigido está entre 16 e 18°C. Sabe-se que baixas temperaturas influenciam na atividade enzimática, reduzindo a velocidade de reações. Logo, é de se esperar que temperaturas superiores ao limiar estabelecido pelos autores acima, propiciem um crescimento satisfatório, com velocidades enzimáticas máximas atingidas até o limite superior de 36°C (SINGELS; INMAN-BAMBER, 2011).

Em relação à expansão foliar, Shih e Gascho (1980) observaram que o valor máximo foi obtido aos seis meses após o plantio, enquanto o máximo de colmos foi obtido aos cinco meses. A produção foliar é frequente e rápida durante esta fase e o índice de área foliar (IAF) alcança valores entre 6 e 7 (DIOLA; SANTOS, 2012) O aumento do IAF está associado a alta produção de fotossintatos e, consequentemente, de açúcares. Brzesowsky (1985) relacionou o aumento de produtividade com o aumento de IAF, e concluiu que um pequeno período de tempo de crescimento do IAF poderia causar fechamento rápido do dossel e melhor aproveitamento da radiação por mais tempo.

Como o colmo da cana-de-açúcar é o órgão vegetal economicamente explorável, a maturação e o acúmulo dirigido de sacarose é de extrema importância, pois garantem a rentabilidade do cultivo, e é descrito por Bonnett (2014) como sendo o quarto estádio de desenvolvimento da cana. Durante o desenvolvimento e crescimento, a atividade fotossintética e a síntese de sacarose são convertidos em esqueletos de carbono e outros suplementos que viabilizam estes processos.

Alexander (1973) afirma que nos meses iniciais, o crescimento é prioritário ao estoque e, portanto, a formação dos tecidos vegetais são drenos energéticos dos produtos fotossintéticos. Logo após a completa formação dos tecidos, a planta apresenta potencial de acúmulo de açúcar no tecido de armazenamento já formado, iniciando então o processo de maturação. Neste momento, inicia-se a concentração de açúcar até atingir os valores aceitáveis pela indústria, e Ripoli e Ripoli (2009) e Segato et al. (2006) consideram que a maturação determina a qualidade da matéria prima dos colmos industrializáveis. Cristofoletti Junior (2012) explicita que as variedades de cana-de-açúcar são classificadas em precoces, médias e tardias em relação à época em que acumulam

açúcar, logo, a concentração de sacarose nas diferentes variedades se altera até a colheita, com tendência de redução nos períodos mais quentes e úmidos, e mais elevada com temperaturas amenas ou em condições de estresse hídrico.

Após a maturação dos tecidos e colmos, apesar de, a cunho extrativista o ciclo da cultura estar encerrado, a cana-de-açúcar inicia o processo reprodutivo. Conforme Bonnett (2014), a emergência da inflorescência seria o quinto estádio e pode ser visualizado através de alterações morfológicas como o aumento do comprimento da bainha foliar e entrenós, tornando as folhas mais distante umas das outras e com um maior comprimento. As condições ambientais que induzem o florescimento são diversas e as informações sobre este processo são escassas. Duarte (2009) afirma que o controle da transição do meristema apical vegetativo para a forma floral é controlada rigidamente por fatores endógenos e externos. Dentre os fatores endógenos, pode-se destacar como participantes desta regulação os teores hormonais e o estado nutricional da cana-de-açúcar. Esta autora ainda afirma que tem sido observado que grande parte dos genes responsáveis pela formação de órgãos florais é controlada por balanços internos e externos, extremamente sensíveis ao comprimento do dia (fotoperíodo), temperatura ambiente, vernalização (exposição a longos períodos de frio) e disponibilidade hídrica.

Consoante à emergência da inflorescência, inicia-se o florescimento pleno, classificado por Bonnett (2014) como o sexto estádio. Morfologicamente, a inflorescência da cana é classificada como uma panícula com flores tipo espigueta emparelhadas. O desenvolvimento se dá no ápice do colmo, e a formação das espiguetas individuais ocorre de forma basípeta. Tanto o estigma quanto as anteras são desenvolvidas durante a noite e a deiscência ocorre ao amanhecer. A temperatura necessária para a produção de pólen fértil deve ser superior a 21°C. Existem poucos dados sobre a viabilidade do pólen e do estigma (BRETT, 1951).

O desenvolvimento dos frutos (sementes e plumas aderidas à inflorescência) e a maturação das sementes constituem os estádios sete e oito, respectivamente. Nestes, Bonnett (2014) explica que a sacarose e outros compostos, reservados principalmente no colmo, são sintetizados, metabolizados e translocados para a semente, como fonte energética para a formação do embrião e da semente.

O estádio final do ciclo da cana é a senescência, considerado como estádio nove por Bonnett (2014), que descreve que em ambientes naturais a cana pode senescer, por exemplo, após sombreamento, florescimento ou por ser danificada por vento

e ataques bióticos, mas a remoção de toda biomassa da parte aérea raramente ocorre, a não ser por incêndio. As folhas individuais senescem naturalmente ao longo do ciclo da cultura e a taxa de senescência pode ser acelerada por ocorrência de estresse hídrico ou falta de nitrogênio. Em termos práticos, o estádio nove ocorre entre a colheita e o início do crescimento da soqueira.

2.3 Glyphosate: características gerais

O glyphosate (N-fosfonometil glicina) foi originalmente sintetizado em 1964 como potencial quelante industrial e seu uso como herbicida foi descrito apenas em 1971. Devido à limitada solubilidade (1,2% a 25ºC) do ácido em água, os sais mais solúveis do ácido são preferidos para as formulações. É um herbicida sistêmico, não seletivo, de amplo uso, com translocação via simplasto. No solo, o glyphosate é rapidamente inativado, devido à adsorção pelos colóides, ou pela degradação microbiana, produzindo ácido aminometilfosfônico (AMPA) ou sarcosina. Há suspeitas de que o glyphosate seja também metabolizado pelas plantas, produzindo AMPA, glioxilato e sarcosina.

Seu mecanismo de ação é bastante singular, pois o glyphosate é o único herbicida capaz de inibir especificamente a enzima 5-enolpiruvil-chiquimato-3-fosfato-sintase (EPSPs) que catalisa a condensação do ácido chiquímico e do fosfato piruvato, evitando, assim, a síntese de três aminoácidos aromáticos essenciais: triptofano, fenilalanina e tirosina (GEIGER et al., 1986). Cada um dos aminoácidos aromáticos dá origem a diversos compostos: a fenilalanina, além de auxiliar na biossíntese de proteínas, também é utilizado como substrato para a via do fenilpropanoide que produz outros numerosos produtos secundários das plantas, tais como antocianinas, lignina, promotores e inibidores de crescimento e compostos fenólicos; o triptofano é o precursor do ácido indolacético, hormônio necessário para expansão celular, manutenção da dominância apical e muitos outros processos regulatórios; enquanto a tirosina é um precursor da vitamina E, alcaloides, pigmentos e quinonas (YAMADA; CASTRO, 2004; VELINI et al., 2009).

De modo geral, os aminoácidos aromáticos estão envolvidos na regulação do crescimento ou na defesa de plantas, fundamentais para o crescimento e desenvolvimento vegetal. A inibição da enzima EPSPs pela ação do glyphosate, afeta a rota metabólica do ácido chiquímico, responsável pela formação dos compostos fenólicos,

que podem representar até 35% da biomassa vegetal (MONQUERO et al., 2004; GOMES 2011).

De acordo com Velini et al. (2009), cerca de 20% de todo fluxo de carbono nas plantas são processados pela rota do ácido chiquímico. Os mesmos autores descrevem que este fluxo na planta é composto por sete passos metabólicos a seguir: primeiramente ocorre a condensação de dois compostos do metabolismo dos carboidratos, o fosfoenolpiruvato (PEP), da glicólise, e eritrose 4-fosfato, da via pentose-fosfato, para formar a 3-deoxi-d-arabino-heptulosonato-7-fosfato (DAHP), sendo catalisada pela enzima homodimérica 3-deoxi-d-arabino-heptulosonato-7-fosfato sintase (DAHPS), que é ativada pelo triptofano, assim como pelo Mn^{+2}.

Em seguida ocorre uma segunda reação da via do ácido chiquímico, que é a eliminação do fosfato pela DAHP para gerar 3-desidroquinato (DHQ), que é catalisada pela DHQ sintase (DHQS), uma enzima monomérica com peso molecular de 39,0 e a sua atividade requer CO_2+ e NAD+ como cofatores. O próximo passo é a desidratação do DHQ para 3-desidrochiquimato (DHS), catalisado pela DHQ desidratase,e , em seguida, a redução de DHS a chiquimato, catalisada pela chiquimato-desidrogenase (também conhecida como chiquimato NADP+ oxidoredutase) (VELINI et al.,2009).

Nos dois últimos passos descritos anteriormente, as enzimas que catalisam as reações são bifuncionais, e desempenham importante papel na regulação de metabólitos nos pontos de ramificação da rota para garantir a produção suficiente do composto desejado, e são encontrados no ponto de ramificação para a síntese de ácido quínico. Os compostos desidroquinato e desidrochiquimato podem ser relacionados para o metabolismo do ácido quínico. No quinto passo da rota, a enzima chiquimato quinase catalisa a fosforilação de chiquimato para produzir chiquimato-3-fosfato (S3P) (VELINI et al.,2009).

No próximo passo, ocorre a entrada da segunda PEP, que é condensada com S3P para formar 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato (EPSP) e fosfato orgânico. Esta reação reversível é catalisada pela EPSPs, uma enzima monomérica de peso molecular 48,0, e constitui o único alvo molecular do herbicida glyphosate. A última reação da rota é a eliminação dos fosfato pela EPSP para formar corismato, e é catalisada pela corismato sintase. Todos os intermediários do tronco principal da via do ácido chiquímico são pontenciais pontos de ramificação, levando a outras vias metabólicas. Por exemplo, o DHQ pode ser convertido a DHS ou a ácido quínico, um precursor do ácido

clorogênico, produto da condensação de ácido quínico (intermediário inicial da via do ácido chiquímico) e ácido cafeico, intermediário final do metabolismo dos fenilpropanoides (VELINI et al.,2009).

A rota acima descrita pode ser observada na Figura 1.

De maneira geral, ainda há poucas informações de como ocorre a regulação da rota do ácido chiquímico, estudos indicam que não se pode concluir que produtos distantes do sítio de ação do glyphosate (EPSPs) terão sua síntese bloqueada ou apenas reduzida. Sendo que a partir da aplicação de glyphosate podem ocorrer sistemas de controle da rota que podem compensar, ao menos em parte, a menor síntese de alguns compostos intermediários (VELINI et al., 2009).

Na Figura 1 pode-se observar que o composto 3-desidroquinato (DHQ) pode ser convertido a ácido quínico, no qual também pode acumular-se devido ao bloqueio da rota do ácido chiquímico pelo glyphosate. O ácido quínico tem sido considerado como um reservatório de carbono para a biossíntese de compostos aromáticos. Os ácidos chiquímico e quínico ocorrem em altas concentrações na maioria das plantas (VELINI et al., 2009).

Yoshida (1969) citou que há relação linear entre o teor de ácido quínico e crescimento, pois foi observada máxima concentração de ácido quínico e estiolamento de mudas de feijão, resultados semelhantes também ocorram com trigo e brotação de coníferas. A partir desses resultados pode-se concluir que o ácido quínico bem como o ácido chiquímico são ativamente metabolizados durante o crescimento das plantas. O mesmo autor ainda comenta que a ocorrência generalizada do ácido quínico em conjunto com o ácido chiquímico em plantas superiores sugere que o ácido quínico pode também desempenhar um papel importante na biossíntese aromática.

Velini et al. (2008) verificaram que a partir da aplicação de baixas doses de glyphosate ocorreu o bloqueio parcial da enzima EPSPs, resultando em estímulos de crescimento de várias espécies vegetais, como eucalipto, pinus, milho e soja convencional. Meschede (2009) também cita que através da aplicação de baixas doses de glyphosate em eucalipto houve redução da atividade da enzima EPSPs á níveis que elevaram a concentração de ácido chiquímico e implicou na taxa de crescimento de plantas jovens de eucalipto. Deste modo, concluiu-se que plantas intoxicadas acidentalmente com baixas doses de glyphosate apresentam menores níveis de resistência a doenças fúngicas e maior crescimento.

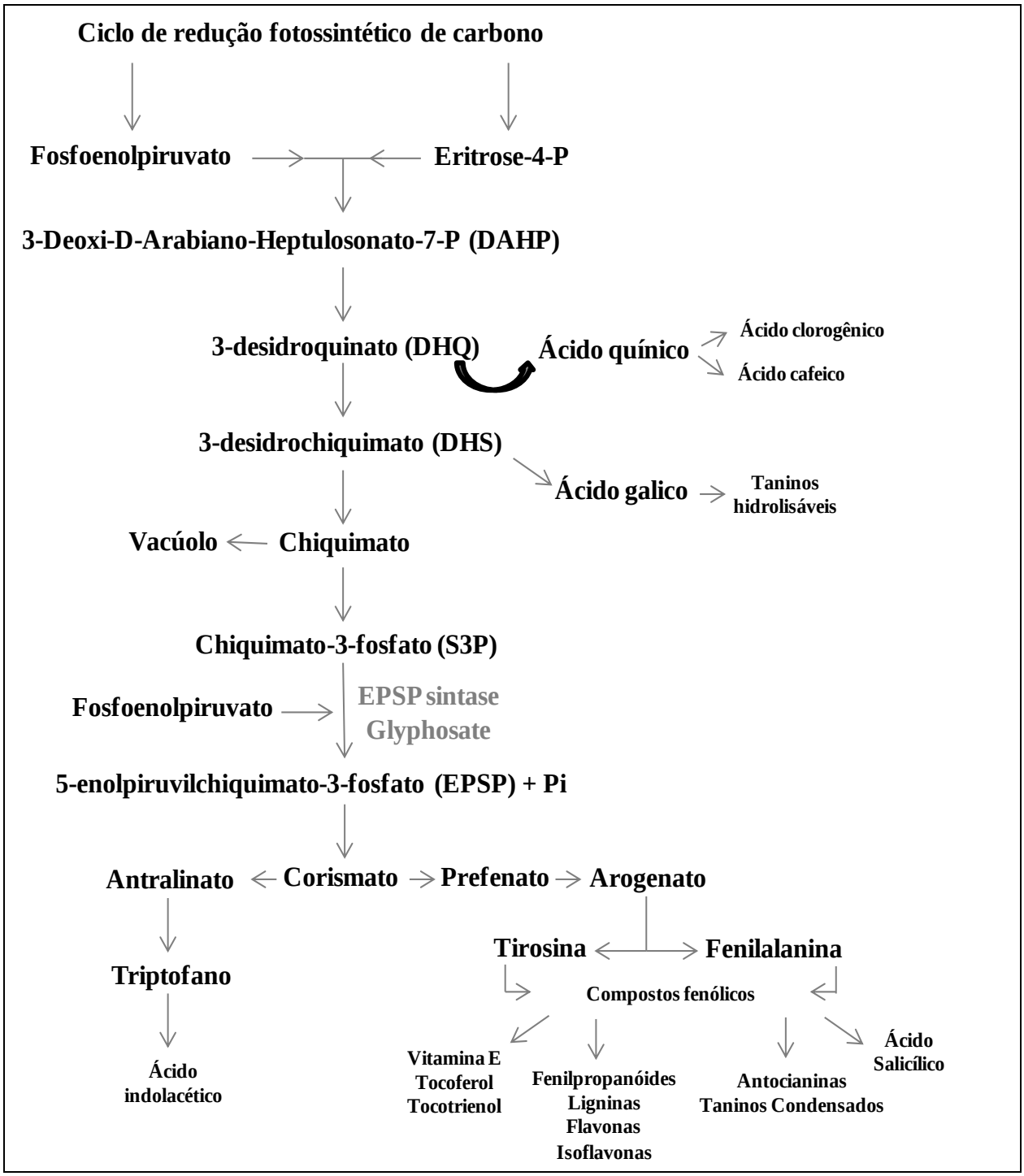


Figura 1. Esquema da produção de aminoácidos aromáticos e compostos fenólicos. Adaptado de Velini et al. (2012).

Com exceção das plantas transgênicas, todas as plantas são sensíveis ao glyphosate em maior ou menor intensidade, indicando uma variabilidade funcional nos pontos de ligação dos compostos com a enzima EPSPs (ARANTES, 2007; GODOY, 2007; GOMES, 2011). Essa enzima é requerida na síntese de aminoácidos

aromáticos e ácido chiquímico. Esses compostos estão envolvidos na produção de muitos compostos que pertencem ao metabolismo secundário de plantas, principalmente relacionados à regulação de crescimento, efeitos alelopáticos e resistência a pragas e doenças. Com a redução das concentrações dos três aminoácidos aromáticos nas plantas, todos os processos que demandam a participação de proteínas/enzimas são diretamente afetados (GODOY, 2007; VELINI et al., 2009).

Uma das mais importantes características do glyphosate é sua rápida translocação através do simplasto, das folhas da planta tratada para as raízes, rizomas e meristemas apicais (YAMADA; CASTRO, 2007; VELINI et al., 2009).

O modo de ação de um herbicida corresponde aos eventos que ocorrem desde o seu contato inicial com as plantas, a penetração (no apoplasto, reversível e sem gasto de energia), a absorção (para o simplasto, irreversível e com gasto energético), a movimentação na planta (entre órgãos, tecidos, células e organelas), o metabolismo e outras formas de inativação ou ativação, a interação com o sítio de ação até o desencadeamento de eventos que efetivamente levam as plantas à paralisação do crescimento ou à morte (VELINI et al., 2009). Já, a translocação via apoplasto é limitada, mas alguns pesquisadores verificaram a movimentação do apoplasto para o simplasto e demonstraram que proteínas de transporte de fosfatos de algumas plantas se ligaram à molécula de glyphosate, facilitando a absorção.

Segundo Rodrigues (2009), a translocação do glyphosate pelo floema segue a mesma rota dos açúcares produzidos na fotossíntese, deslocando-se das folhas para as raízes ou frutos, onde serão utilizados na respiração, assimilação ou acumulação depois de sua conversão a substâncias como amido, por exemplo.

O movimento do herbicida na planta é então influenciado pela quantidade de açúcar translocada para cada uma dessas partes durante o ciclo de vida da planta. Dessa forma, a translocação do glyphosate é facilitada por condições que favoreçam a fotossíntese na planta (MONQUERO et al., 2004). A quantidade de ácido chiquímico acumulada pela desregulação da rota representa um forte dreno de carbono no ciclo de Calvin, pelo desvio de eritrose-4-fosfato, que seria empregado na regeneração de ribulose bifosfato. Esse é um importante efeito da inibição causada pelo glyphosate, que reduz drasticamente a produção fotossintética (GOMES, 2011).

De modo geral, pouco se sabe sobre a degradação do glyphosate em plantas, acredita-se que sua metabolização pode ocorrer por meio de duas rotas

similares àquelas presentes em microrganismos, produzindo AMPA (ácido aminometilfosfônico) na primeira via e sarcosina, na segunda via (FRANZ et al., 1997; REDDY et al., 2004; RABELLO, 2010).

Segundo Toni et al. (2006), o glyphosate não é metabolizado pelas plantas, razão pela qual não apresenta seletividade. Contudo, a informação que tem sido aceita é que o glyphosate é pouco metabolizado pelas plantas (DUKE et al., 1988; MALIK et al., 1989; REDDY et al., 2008). O mais freqüente produto da degradação do glyphosate em plantas é o AMPA (REDDY et al., 2008). O AMPA é fitotóxico para espécies de plantas, contudo, é considerado menos ativo do que o glyphosate (HOAGLAND, 1980; FRANZ et al., 1997).

Os sintomas típicos de intoxicação das plantas pelo uso do herbicida glyphosate são a paralisação do crescimento, o amarelecimento dos meristemas e das folhas jovens, folhas com estrias ou avermelhadas com posterior necrose e morte das plantas (GOMES, 2011). Alguns desses efeitos têm sido atribuídos ao AMPA e à presença de surfactantes na formulação; em plantas daninhas, a presença de AMPA indica provavelmente um mecanismo de tolerância dessas plantas (REDDY et al., 2004).

2.4 Efeito hormótico

Os reguladores vegetais têm demonstrado cada vez mais importância na agricultura tropical à medida que as técnicas de cultivo evoluem, principalmente em culturas de alto valor econômico. São produtos sintéticos que possuem as mesmas características que os hormônios vegetais, ou seja, atuam promovendo, inibindo ou alterando os processos bioquímicos e fisiológicos nas diferentes estruturas celulares das plantas. Os que estimulam o crescimento estão relacionados à divisão, alongamento e diferenciação celular, e aqueles que inibem o crescimento referem-se à senescência, amadurecimento de frutos e dormência de sementes (CASTRO; VIEIRA, 2001).

Na cultura da cana-de-açúcar, o glyphosate é amplamente empregado como herbicida no controle de plantas daninhas, em doses que variam de 64,8 a 777,6 g e a ha^{-1} (BLANCO, 2003), além de ser utilizado como maturador, nas doses entre 108,0 e 216,0 g e a ha^{-1} (NETTO, 2006) e também na eliminação de soqueiras para fins de renovação da cultura, com doses de 1800 a 2160 g e a ha^{-1} (SILVA et al., 2006).

Diversos trabalhos indicam o glyphosate como uma alternativa técnica e econômica que permite flexibilizar o manejo de corte e manejar o comportamento

das variedades de cana-de-açúcar. Segundo resultados de pesquisas, observaram-se a melhoria na qualidade da matéria-prima para a indústria, a paralisação do florescimento, a otimização do potencial de maturação das variedades e a maximização da margem de contribuição agrícola e industrial quando o glyphosate é utilizado como maturador (CASTRO et al., 2002; ALMEIDA et al., 2003; LEITE, 2005).

O fato de muitos herbicidas terem sido originalmente desenvolvidos como regulador de crescimento sustenta a hipótese de hormesis ou efeito hormótico. O termo Hormesis, do grego "*hormaein"* significa "excitar", e foi originalmente definido por apresentar um comportamento bifásico, no qual uma característica biológica é estimulada por subdoses ou baixas doses de um composto, mas inibida por altas doses do mesmo (CALABRESE; BALDWIN, 2000; CALABRESE; BALDWIN, 2001; CALABRESE; BALDWIN, 2002).

Existem produtos químicos, originalmente utilizados como herbicidas, que em subdoses auxiliam no desenvolvimento da planta. Southam e Ehrlich (1943) relataram o efeito de extrato de casca de carvalho, submetido em subdosagens, o qual estimulou o desenvolvimento de fungos, e que, em doses elevadas foi tóxico e inibiu o crescimento.

Atualmente, tanto no setor de produção agrícola quanto nas diversas áreas da saúde humana, o efeito de subdoses de produtos aplicados, denominado como hormótico, vem sendo amplamente discutido e pesquisado, com o objetivo de compreender o mecanismo de ação estimulante e benéfica de diversas substâncias inicialmente consideradas como tóxicas.

Resultados de pesquisas referentes ao denominado efeito hormótico foram verificados, por meio de aplicações do herbicida Simazine, o qual proporcionou aumento proteico em plantas de aveia (PULVER; RIES, 1973). Assim como, o Oxyfluorfen ocasionou maior resistência a patógenos na cultura da soja (NELSON et al., 2002), e os herbicidas Dalapon, Bromoxynll e Terbacil estimularam o crescimento em plantas de trigo (WIEDMAN; APPLEY, 1972).

Dentre os herbicidas que causam efeito hormótico, o glyphosate é o mais estudado e utilizado atualmente (BELZ et al., 2011). O efeito hormótico geralmente é definido como um efeito estimulatório em atributos biológicos que pode ser maior que 30-60% em relação ao controle (CHAPMAN, 2001; BELZ; DUKE, 2014).

A resposta estimulatória é medida no crescimento com base no peso, altura ou área foliar, ou ainda mudanças fisiológicas, como teor de proteína. Por exemplo, alguns herbicidas, podem estimular o crescimento das raízes em baixas doses, mas não têm efeito estimulador sobre o crescimento de caules em qualquer outra dose (BELZ; DUKE, 2014).

Pesquisas foram realizadas com subdoses de glyphosate no desenvolvimento inicial de plantas de trapoeraba (*Commelina benghalensis*) (MESCHEDE et al., 2007), citrus (CARBONARI et al., 2007a) , eucalipto (*Eucaliptus grandis*) (CARBONARI et al., 2007b) e estes autores concluíram que há efeito positivo no crescimento, aumento da biomassa, desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular das plantas estudadas, bem como incrementos na absorção e acúmulo de fósforo nas folhas. Velini et al. (2008) observaram que doses subtóxicas de glyphosate (inferiores a 36 g e a ha^{-1}) estimularam o crescimento de várias espécies, tais como eucalipto, soja, milho, pinus e que essa estimulação ocorreu em diferentes partes da espécie avaliada, porém esses experimentos não foram desenvolvidos até a fase de produção dessas culturas.

Carvalho et al. (2013) trabalharam com subdose de glyphosate em cafeeiros e observaram incremento de 18% no diâmetro do caule, 31% na massa de matéria seca das folhas e 27% na massa de matéria seca total, atribuindo tais resultados à ocorrência de efeito hormótico. Os fatores que influenciam a resposta estimulatória de um composto de herbicida parecem estar ligados a fatores capazes de afetar o crescimento geral das plantas, padrões tais como: espécies, biotipo ou cultivar, a fase de crescimento da planta, estado fisiológico, densidade de plantas ou condições ambientais. Além disso, o tipo de composto, o tempo de exposição e as medidas dos parâmetros podem determinar o resultado hormótico (CARVALHO et al., 2013).

Diversos são os locais em que o efeito hormótico ocorre, e os parâmetros para analisar a ocorrência destes efeitos não seguem um padrão estabelecido, porém para tais fins a análise de crescimento torna-se uma ferramenta importante quando se deseja verificar o real crescimento de uma cultura. A análise de crescimento consiste na medida sequencial do acúmulo de matéria orgânica da planta, considerando a produção de massa de matéria seca, além de descrever as condições morfológicas da planta em diferentes intervalos de tempo, permitindo avaliar seu crescimento final como um todo e a contribuição dos diversos órgãos no crescimento total, levando-se em consideração também produção líquida derivada do processo fotossintético, na qual resulta do

desempenho do sistema assimilatório durante certo período de tempo (MAGALHÃES, 1985; BENINCASA, 2003; MARAFON, 2012). O método se baseia principalmente no fato de que cerca de 90% da massa seca produzida pela planta ao longo do seu crescimento resulta da atividade fotossintética (BENINCASA, 2003).

Outro parâmetro que pode ser mensurado com o objetivo de verificar se a subdose de glyphosate aplicada está ou não promovendo toxidez e declínio da fotossíntese é a condutância estomática, pois as plantas possuem a capacidade de controlar a abertura estomática permitindo, assim, responder rapidamente a um ambiente em transformação (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Segundo Yamada e Castro (2007), o glyphosate atua estimulando a produção de etileno, destruindo membranas, inibindo a síntese de aminoácidos aromáticos e clorofila, além de reduzir o fechamento estomático. Com o fechamento estomático, há diminuição da absorção de CO_2, consequentemente redução da fotossíntese e outros processos fisiológicos (YANNICCARI et al., 2012). Grantz (2014) descreve que o controle estomático, em cana-de-açúcar e em outras espécies de plantas, parece estar relacionado com a coordenação entre a fase de vapor e a fase líquida de condutância estomática, interagindo através da disponibilidade de água no solo e na epiderme das folhas. Essas regulações interagem com as respostas da célula-guarda, luz, CO_2 e sinalização de compostos dentro da planta. Deste modo, a condutância estomática se torna um atributo de suma importância a fim de se detectar se houve ação do herbicida na planta, influenciando desta forma as trocas gasosas.

De acordo com Carvalho (2011), a fotossíntese não é o sítio de ação primária do glyphosate, mas há estudos com deriva simulada e aplicações de doses recomendadas na qual foram observadas alterações na fotossíntese de culturas susceptíveis e resistentes. Este mesmo autor também cita que ao aplicar subdoses de glyphosate em plantas de citros, não houve redução de assimilação de carbono, contudo houve redução na condutância estomática e transpiração, e conclui que o tempo requerido para observar esses efeitos indica que a fotossíntese não é o modo primário de ação ou que o herbicida atua lentamente nos processos fotossintéticos. Passível de medidas, a fotossíntese assim como a máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II (*Fv/Fm*) tornam-se ferramentas de grande potencial para verificação de efeitos do glyphosate sobre o processo fisiológico em plantas.

Tratando-se de atributos fisiológicos, de modo direto ou indireto, a análise de clorofila também se torna uma ferramenta importante para o diagnóstico nutricional e fotossintético das plantas (MESCHEDE, 2009). Assim, métodos de quantificação e de estimativa de tais pigmentos também podem ser utilizados como ferramentas para detectar os efeitos do glyphosate nas plantas. Carvalho (2011) cita que a redução no teor de clorofila pode ser resultado da menor síntese ou da maior degradação da clorofila pelo glyphosate. Ainda há controvérsias em relação à interferência de herbicidas no conteúdo de clorofila, mas já foram verificados em alguns trabalhos, que o glyphosate pode diminuir os teores de clorofila por inibir a síntese de seu precursor, o ácido aminolevulinato.

Além das ferramentas já citadas para analisar o efeito hormótico, medidas como concentração de ácido chiquímico e também do ácido quínico vêm sendo utilizadas, buscando relacionar esses resultados com o efeito benéfico da hormesis proporcionada pelas baixas doses de glyphosate. Pois, segundo Carbonari et al. (2011), os elevados níveis de ácido chiquímico são utilizados como um indicador precoce e altamente sensível dos efeitos do glyphosate nos tecidos das plantas, assim como o ácido quínico, que acumulou nos tecidos da cana-de-açúcar após a aplicação de glyphosate

Diversos estudos relatam que as respostas hormóticas podem ser específicas e os mecanismos por trás desses compostos específicos raramente podem ser os mesmos (BELZ et al., 2011). Nem mesmo a influência sobre a fase de crescimento das plantas expostas às subdoses de herbicida para estímulo de hormesis é conhecida. A maioria dos estudos com hormesis não verificou diferença entre as respostas qualitativas e quantitativas que ocasionalmente podem ocorrer relacionadas à idade das plantas (BELZ; DUKE, 2014). Em recente pesquisa, Carvalho et al. (2013) verificaram diferenças na relação planta/idade e efeito hormótico do glyphosate sobre o café (*Coffea arabica L.*), de tal forma que as plantas expostas aos 10 dias após o transplante não foi observado estímulo de crescimento sob efeito hormótico, em contraste com as plantas expostas às subdoses 35 dias mais tarde. Por outro lado, Cedergreen et al. (2009) verificaram que há diferenças entre a idade e o efeito hormótico de glyphosate na produção de grãos de cevada, expostos em diferentes momentos durante o período de enchimento dos grãos. Sendo assim, a sensibilidade das respostas hormóticas podem ser específicas pelos diversos fatores que a influenciam, portanto, não há como definir um padrão geral das influências, que permanecem desconhecidos até o momento (BELZ; DUKE, 2014).

Alguns estudos permitiram verificar que o efeito do glyphosate não é sustentado ao longo do tempo. Assim, o intervalo de tempo entre a aplicação e a colheita parece de grande importância (BELZ; DUKE, 2014; CEDERGREEN, 2008). Segundo Belz et al. (2011), o incremento proporcionado pela hormesis pode ser transferido para época da colheita apenas se aplicado no momento correto, pois este efeito é limitado. Por outro lado, os efeitos da hormesis são dinâmicos, e acredita-se que algumas substâncias podem agir por longos períodos, e algumas apenas em um período significativo de estímulo, sendo assim, a hormesis é detectável e funcional.

Diante do exposto, há algumas teorias que tentam explicar o efeito hormótico de crescimento nas plantas à aplicação de subdoses de herbicidas. Alguns autores concordam que a planta tenta "escapar" desse fenômeno para superar as condições desfavoráveis de crescimento ou estresse químico e induzem um mecanismo de defesa através de radicais livres de oxigênio que podem levar ao aumento do crescimento na presença de baixas doses de fitotóxicos químicos (KOVALCHUK et al., 2003; CEDERGREEN et al., 2007; EL-SHAHAWY; SHARARA, 2011;). Por outro lado, algumas respostas hormóticas poderiam ocorrer a partir de sistemas de indução hormonal da planta, como foi estabelecida com as auxinas sintéticas (MORRE, 2000; EL-SHAHAWY; SHARARA, 2011). Podemos destacar também as conclusões de Velini et al. (2008) e Cedergreen e Olesen (2010), pois, sugerem que o efeito hormótico está de alguma forma relacionado com a inibição parcial da EPSPs em baixas doses de glyphosate. E a aplicação de baixas doses de glyphosate também permite os níveis de lignina diminuir significativamente, assim, as paredes celulares permaneceriam elásticas por mais tempo, permitindo maior expansão celular, e, portanto deve resultar em maior crescimento longitudinal (MESCHEDE et al, 2011a; CARVALHO et al., 2013; SOUSA, 2013).

Além dos efeitos apresentados acima, causados pela exposição da planta à subdoses de glyphosate, também foram observados acúmulos de fósforo nas folhas de plantas de feijão (RABELLO et al., 2012), milho (LATORRE et al., 2010), soja (GODOY, 2007), trapoeraba (*Commelina benghalensis*) (MESCHEDE et al., 2007), citrus (CARBONARI et al., 2007a) e *Eucaliptus grandis* (CARBONARI et al., 2007b).

Apesar de o fósforo ser um grande limitante da produção agrícola, há uma quantidade relativamente alta no solo, mas não é encontrado na forma lábil ou ao alcance da rizosfera, assim, se faz necessária a aplicação de fósforo na forma inorgânica no solo para que se alcance a produtividade esperada (GODOY, 2007).

O fósforo é um importante macronutriente, componente estrutural de macromoléculas, como ácidos nucléicos e fosfolipídeos, e também da adenosina trifosfato (ATP), sendo um elemento chave de várias vias metabólicas e reações bioquímicas, tais como inúmeras etapas das vias C_3 e C_4 do ciclo de Calvin e da glicólise (ALMEIDA, 2002). A presença do fósforo é necessária para a síntese de compostos fosforilados e a falta deste nutriente causa distúrbios imediatos no metabolismo e no desenvolvimento das plantas sua absorção e translocação para dentro da planta (SANTOS et al., 2010). A absorção de fósforo consiste em um complexo processo que requer numerosos transportadores (GODOY, 2007).

O glyphosate, um herbicida do grupo fosforado e translocado pelo simplasto, usa a mesma proteína transportadora de fosfato, assim, as proteínas transportadoras do grupo fosfato facilitam a absorção do glyphosate e vice-versa (CARBONARI et al., 2007b).

Fitzgibbon e Braymer (1988), trabalhando com *Pseudomonas* sp., observaram que a absorção de glyphosate foi induzida pela deficiência de fósforo e concluíram que o sistema transportador de fosfato, que tem uma ampla especificidade de substrato, pode ser responsável por essa absorção.

Deste modo, algumas pesquisas já comprovaram que subdoses de glyphosate levam a indução de genes transportadores de fósforo para dentro da planta, contudo, a verificação da concentração de fósforo nas folhas das culturas também pode ser uma ferramenta importante, a fim de se verificar a utilização de fósforo disponível e ganhos na produtividade (CARBONARI et al, 2007b; GODOY, 2007).

Diante do exposto é possível afirmar que diversos parâmetros podem auxiliar na avaliação do efeito hormótico da cultura da cana-de-açúcar, no entanto estudos que utilizaram essas ferramentas ainda são escassos na literatura, tornando esta uma ótima alternativa para trabalhos com esse enfoque.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Condições experimentais

Os dois experimentos foram instalados na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento (UPD) de Jaú, SP, da APTA (Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios) Pólo Centro-Oeste, cujas coordenadas geográficas da área experimental são latitude 22º17'' S, longitude 48º34'' W e altitude média de 580 m.

O solo da área experimental é um Latossolo Vermelho Escuro eutrófico, horizonte A moderado, textura argilosa, de acordo com classificação de Menk e Coelho (2000). O resultado da análise química do solo é apresentado na Tabela 1.

O clima predominante da região é o Aw (Köppen), com clima seco definido, temperatura média anual de 21,6ºC, umidade relativa média de 70%, com extremos de 97% em fevereiro e 19% em agosto. A média pluviométrica é em torno de 1.344mm (Figura 2).

A variedade utilizada nos dois experimentos foi a SP80-1842. Esta variedade foi escolhida por sua conhecida característica de pouco perfilhamento na cana-planta, sendo portanto uma das variáveis a ser avaliada pelo efeito hormótico, isto é, aumento da quantidade de perfilhos.

Os dois ensaios foram plantados no dia 05 de novembro de 2010, e conduzidos durante o ciclo de cana de ano em cana-planta. O plantio foi feito em sulcos a uma profundidade de 0,25 m, com um espaçamento entre linhas de 1,50 m. Realizou-se adubação de base com distribuição de fertilizantes nos sulcos, a qual constou da aplicação

de 400 kg/ha (N-P_2O_5-K_2O da fórmula 8:28:16). A densidade de plantio foi de 18 gemas m^{-1}.

Tabela 1. Análise química do solo na área de plantio.

Prof.[1]	P	MO[2]	pH	K	Ca	Mg	H+Al	SB[3]	CTC[4]	V[5]
cm	mg dm^{-3}	g dm^{-3}	$CaCl^2$	———			mmolc dm^{-3}	———		%
0 a 20	17	27	5,2	2,3	30	14	28	46	74	62
20 a 40	7	18	5,1	1,1	24	8	30	33	63	52

[1]Prof.: profundidade.[2]MO: Matéria orgânica. [3]SB: somas das bases.[4]CTC: capacidade de troca catiônica.[5]V: saturação de base (RAIJ; QUAGGIO, 1983).

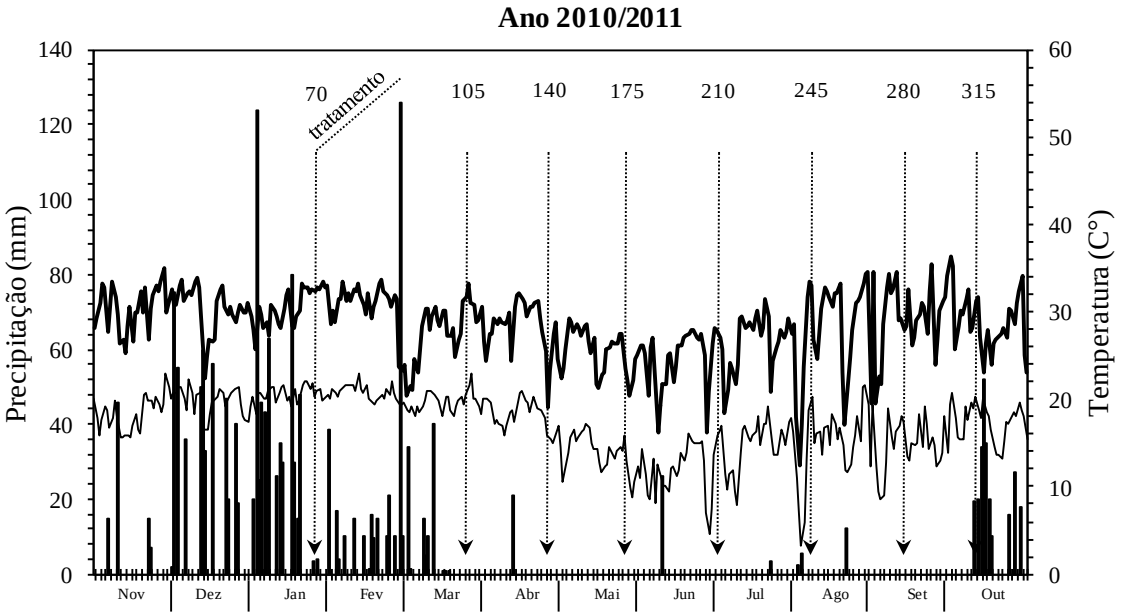


Figura 2. Total de precipitação (▌), média da temperatura máxima (▬) e mínima (─) diárias, para o período do experimento, compreendido entre novembro de 2010 a outubro de 2011. Fonte: Estação Meteorológica da APTA, Jaú-SP.

3.2 Aplicação dos tratamentos

Os tratamentos foram constituídos pela aplicação ou não de subdose de glyphosate (480 g L^{-1} de sal de isopropilamina de glyphosate ou 360 g L^{-1} do equivalente ácido). A subdose utilizada foi de 1,8 g e a ha^{-1} de glyphosate (Roundup original®) (SILVA et. al , 2009) sem adição de adjuvante.

A aplicação do glyphosate foi realizada aos 70 dias após o plantio das gemas, baseado no trabalho de Silva et al. (2009), e também por ser uma planta jovem e apresentar folhas com camada epicuticular mais fina na epiderme, na qual a penetração

de glyphosate se torna facilitada, ou seja, uma vez que o glyphoste é um herbicida hidrofílico as chances de penetração em camadas mais finas são maiores em plantas mais jovens (OLIVEIRA; BACARIN, 2011; CARVALHO et al., 2013).

Utilizou-se de um pulverizador costal pressurizado (CO_2), com barra de pulverização com ponta de pulverização de latão tipo Magnum defletor 0,50, volume de calda de 200 L ha^{-1} e pressão de aplicação de 2 bar. Foi realizada em horário com temperatura amena (24,6ºC) e baixa interferência de vento, e houve ocorrência de chuva (80mm) três dias após a aplicação.

3.3 Delineamento experimental

Dois experimentos foram instalados, 1- para avaliar o efeito hormótico durante o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar e 2- a produtividade de colmos e de açúcar.

Experimento 1

Neste experimento foi avaliado o efeito hormótico durante o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parcelas de três linhas por três metros foram arranjadas para avaliações em oito épocas, isto é 70, 105, 140, 175, 210, 245, 280 e 315 dias após o plantio (DAP), em um delineamento em blocos casualizados com seis repetições (Figura 3A). Para cada época de avaliação morfológica foi utilizado um metro linear da linha central da parcela.

Experimento 2

Ensaio realizado para estimar a produtividade de colmos e de açúcar em parcelas de cinco linhas por oito metros, dispostas em delineamento casualizado com seis repetições e a avaliação foi aos 315 dias após o plantio (Figura 3B).

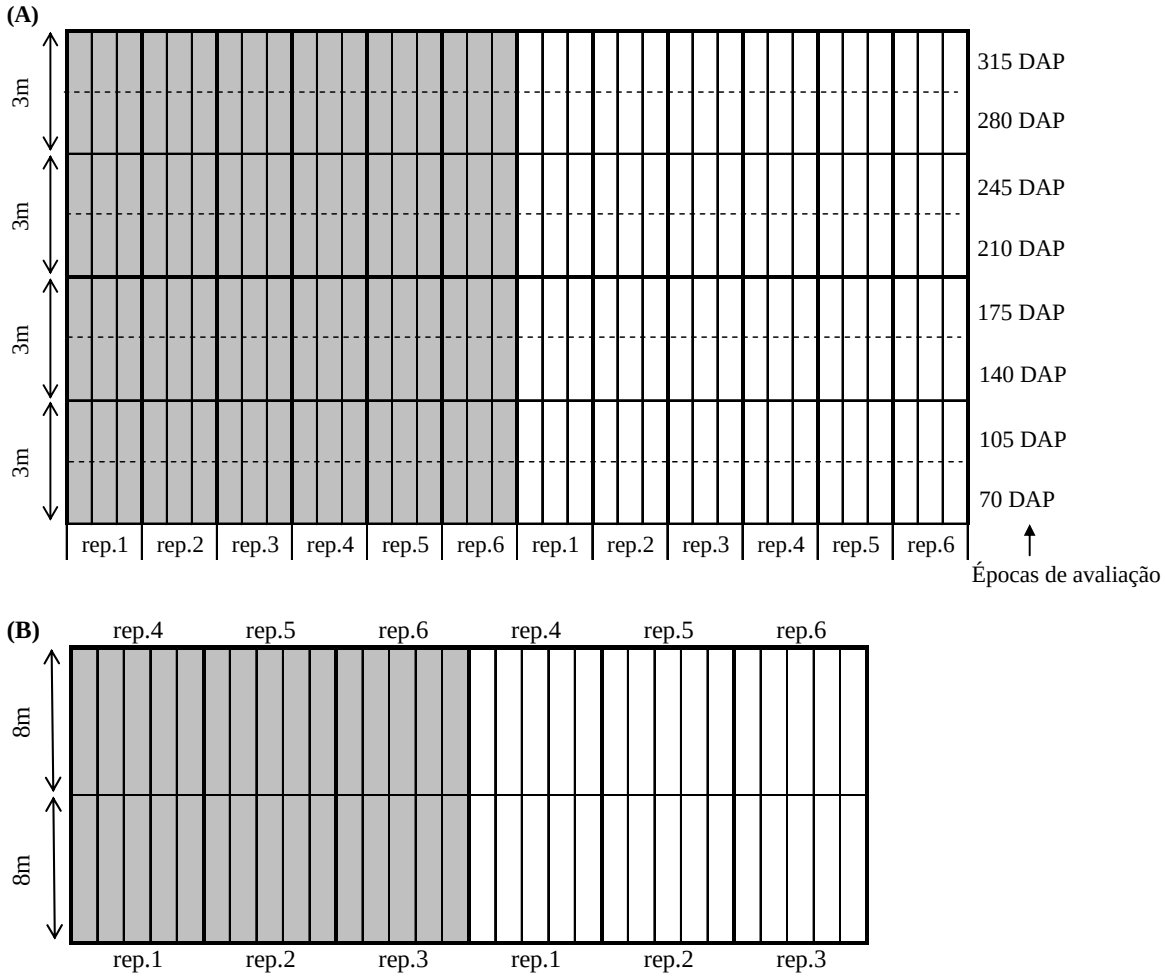


Figura 3. Croqui das áreas experimentais utilizadas para avaliar o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar (**A**) e para estimar a produtividade de colmos e de açúcar (**B**) da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (□) e com aplicação (■) de subdose de glyphosate.

3.4 Extração dos compostos: ácido chiquímico, ácido quínico, glyphosate e ácido aminometilfosfônico (AMPA)

Após as amostras passarem pelos processos de secagem e moagem, foi obtida a massa de cerca de 100 mg da mesma e acondicionada em tubo "falcon" com 15 mL de capacidade. Foi adicionado no tubo contendo a amostra, 10 mL de água acidificada a pH 2,5, com pipeta automática Gilson. Os tubos foram agitados para que a amostra seca fosse misturada com a água. Os tubos foram submetidos a banho de ultra-som com frequência ultra-sônica de 42 KHz, durante 30 minutos. Na sequência, foram centrifugados e o sobrenadante coletado, filtrado e acondicionado em vial.

As extrações de ácido chiquímico (µg g^{-1}), quínico (µg g^{-1}), glyphosate (µg g^{-1}) e AMPA (µg g^{-1}) nas amostras de folhas foram determinadas por meio de um Cromatógrafo Líquido de Alta Eficiência (HPLC) (Prominence UFLC, Shimadzu,

Chiyoda-ku, Tóquio, Japão), que combina análise *ultra-rápida* e excelente performance de separação, com alta confiabilidade de resultados; equipado com duas bombas LC-20AD, autoinjetor SIL-20AC, degazeificador DGU-20A5, sistema controlador CBM-20A (permite a operação totalmente automatizada) e forno CTO-20AC (para controle da temperatura da coluna). Acoplado ao HPLC está o espectrômetro de massas (3200Q TRAP, Applied Biosystems, Foster City, CA, EUA), híbrido triplo quadrupolo, onde Q1 e Q3 são utilizados como filtros de massa e Q2 é uma célula de colisão onde as moléculas intactas e fragmentos de Q1 são quebrados em fragmentos de massas menores.

A detecção e separação dos compostos foram realizadas no modo negativo (18 minutos), e cada composto possui um tempo de retenção na coluna cromatográfica, sendo eles: ácido chiquímico (3,301 minutos), ácido quínico (3,256 minutos), glyphosate (3,102 minutos) e AMPA (3,219 minutos). A Figura 4 apresenta os cromatogramas de padrões analíticos (300 ng mL^{-1}) obtidos para os compostos ácido chiquímico, quínico, glyphosate e AMPA nas condições descritas anteriormente.

De acordo com Gomes (2011), as respostas para a maioria das técnicas analíticas cromatográficas consta de uma relação linear de primeira ordem é observada entre a resposta do detector (y) e a concentração (x) do analito em estudo, podendo ser representada pela equação 8 da regressão linear descrita abaixo, que deve também ter um alto coeficiente de correlação (r > 0,9999).

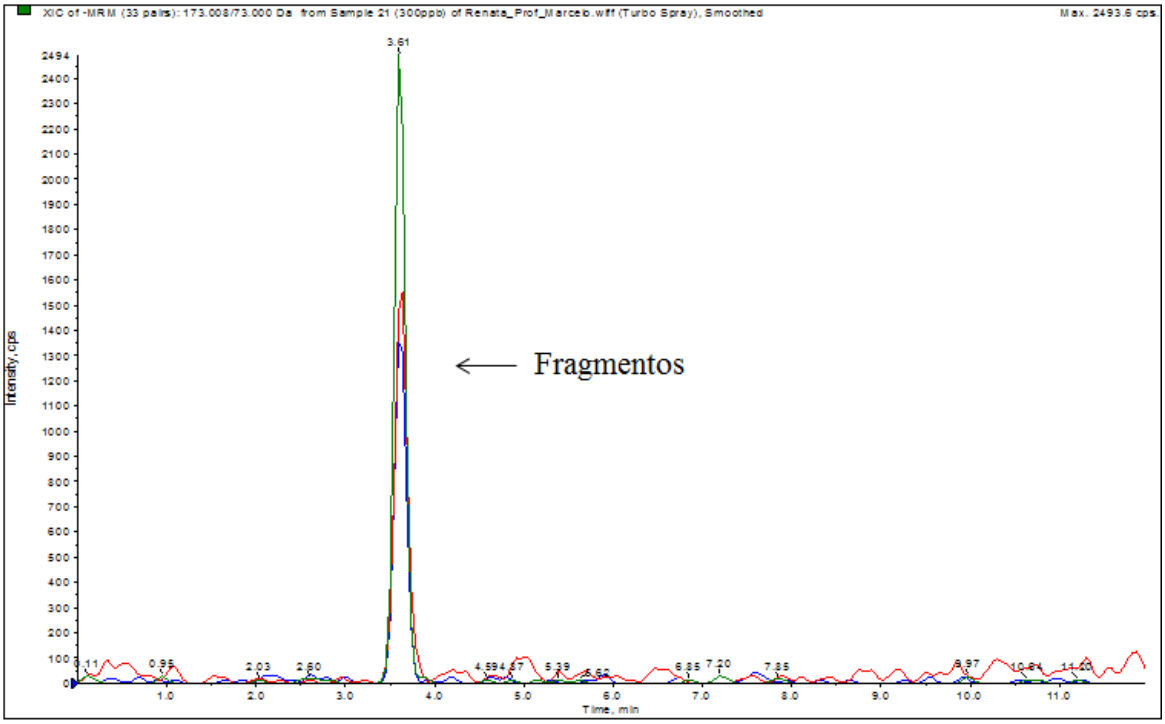
$$y = ax+b \quad (1)$$

Em que:

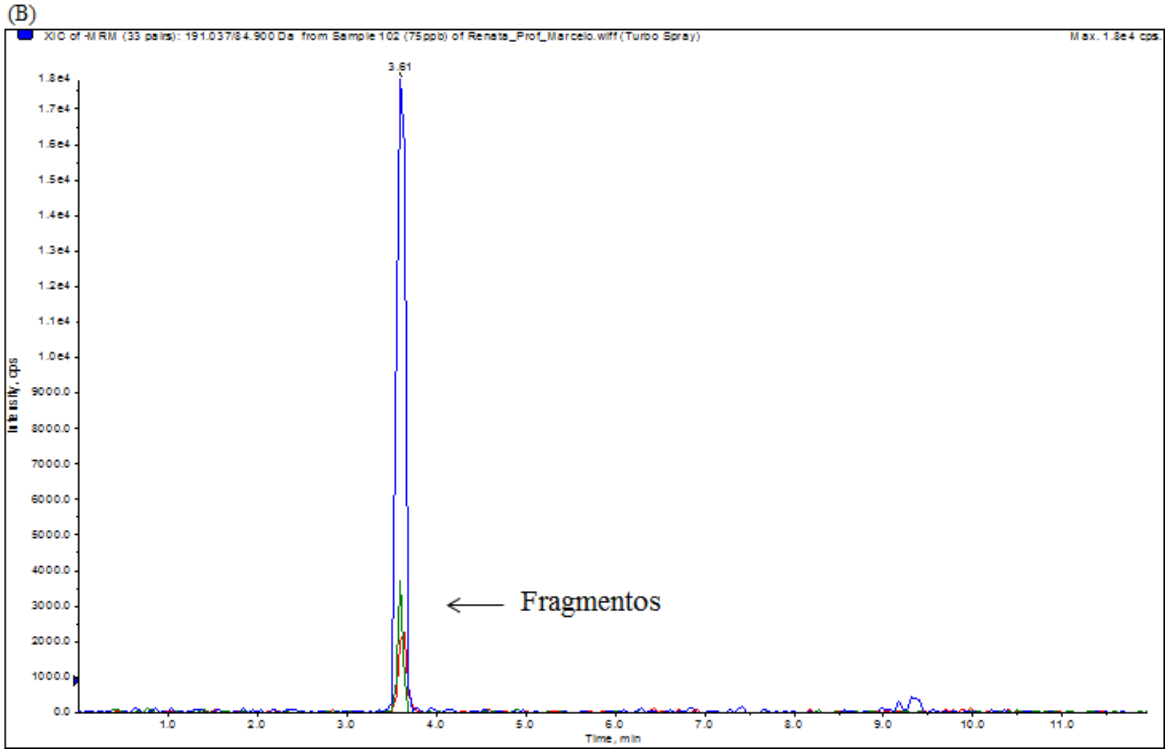
b é a intersecção da curva analítica e *a* é a inclinação da reta.

As curvas analíticas para os compostos foram construídas nas faixas de concentração descritas na Tabela 2.

(A)


XIC of -MRM (33 pairs): 173.008/73.000 Da from Sample 21 (300ppb) of Renata_Prof_Marcelo.wiff (Turbo Spray), Smoothed
Max. 2493.6 cps.
3.61
Fragmentos
Intensity, cps
Time, min

(B)


XIC of -MRM (33 pairs): 191.037/84.900 Da from Sample 102 (75ppb) of Renata_Prof_Marcelo.wiff (Turbo Spray)
Max. 1.8e4 cps.
3.61
Fragmentos
Intensity, cps
Time, min

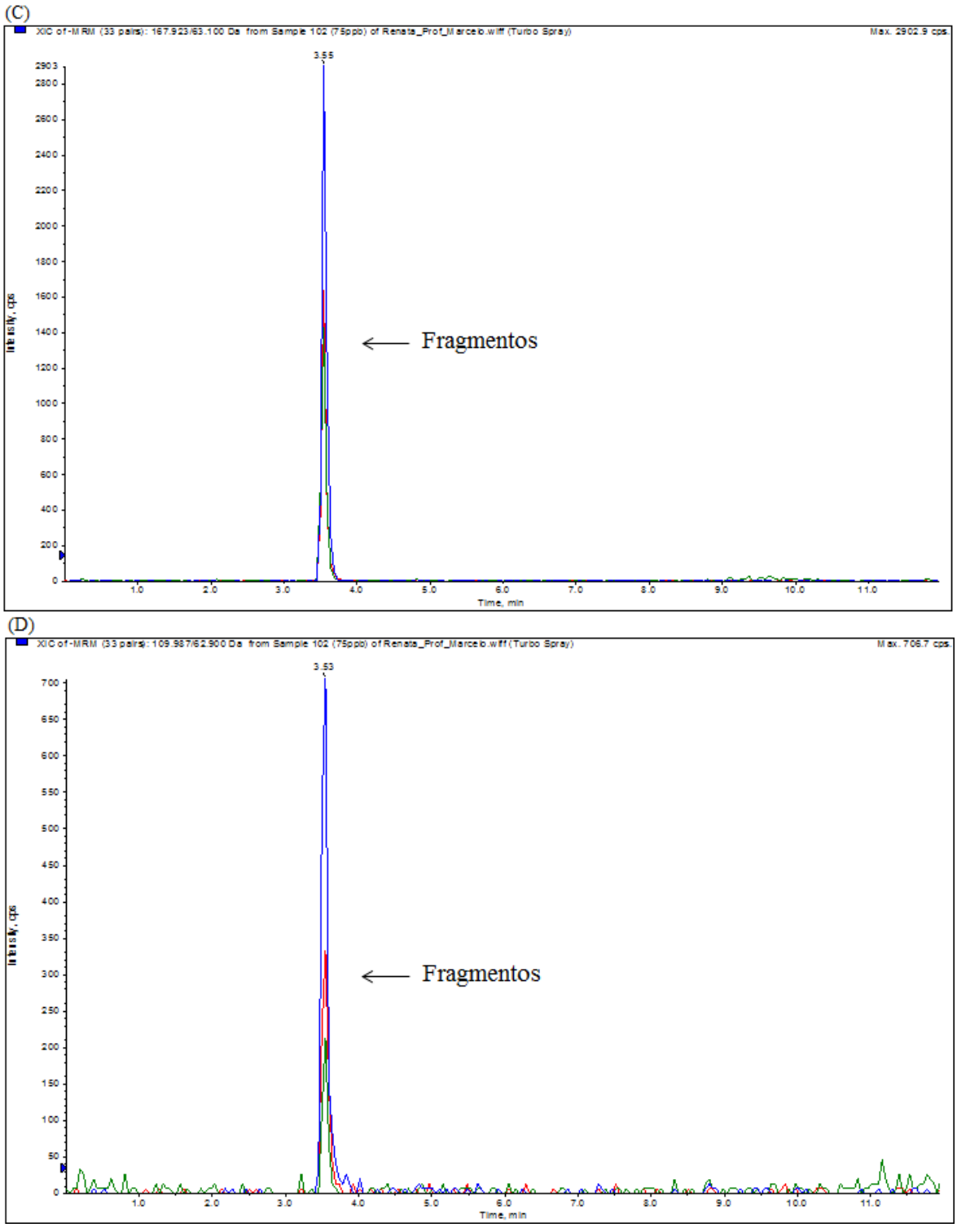


Figura 4. Cromatograma do ácido chiquímico (**A**), ácido quínico (**B**), glyphosate (**C**) e AMPA (**D**) com os fragmentos gerados na concentração de 300 ng mL^{-1}.

Tabela 2. Curvas analíticas e faixas de concentração para cada composto analisado.

Composto	**Equação da reta (y=ax+b)**	**R^2**	**Intervalo de uso do modelo (ng mL^{-1})**
Ácido chiquímico	y=38,9x+233	0,9809	18,75 – 2400
Ácido quínico	y=1,56e-003x-(-2,55e+003)	0,9866	2,34 – 75
Glyphosate	y=178x+(-79,4)	0,9921	2,34 – 300
AMPA	y=61,7x+150	0,9955	2,34 – 300

3.5 Teores de Fósforo

A cada coleta realizada, as subamostras de folhas foram secas em estufa de circulação forçada e renovação de ar por 72 horas, a uma temperatura de 35ºC. Depois de secas, obtiveram-se os dados de massa de matéria seca das folhas e posteriormente o material foi triturado e enviado para análise dos teores de fósforo (g kg^{-1}) no Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas do Departamento de Solos e Recursos Ambientais da Faculdade de Ciências Agronômicas/UNESP, Botucatu (SP).

3.6 Variáveis Morfológicas

As amostragens para obtenção dos dados biométricos ocorreram a cada 35 dias. A primeira avaliação foi considerada a data 0, ou seja, o marco inicial até os 315 DAP. Para cada época de avaliação morfológica de coleta de dados para a análise do crescimento foi utilizada a linha central da parcela, onde se retirou um metro dentro da parcela.

3.6.1 Número de perfilhos

A contagem do número de perfilhos foi realizada de maneira direta, em um metro linear, na linha central e no centro da parcela, em cada uma das repetições, no campo.

3.6.2 Número de folhas verdes

A contagem foi efetuada de maneira direta nos colmos utilizados para a contagem do número de perfilhos no metro linear.

3.6.3 Comprimento de colmos

As medidas de comprimento de colmos (cm) foram feitas no em campo, nos perfilhos avaliados em cada amostragem, dentro de um metro linear.

Utilizando-se uma fita graduada em centímetros, mediu-se o comprimento do início do colmo até a lígula aparente da folha + 1, de acordo com o sistema de Kuijper (Van DILLEWIJN, 1952).

3.6.4 Número de entrenós

Os valores de número de entrenós foram obtidos por meio da contagem em cada perfilho analisado durante a biometria do experimento.

3.6.5 Comprimento médio do entrenó

O comprimento médio (cm) do entrenó foi calculado através da divisão do comprimento do colmo pelo número de entrenós.

3.6.6 Diâmetro de colmos

O diâmetro de colmos (mm) foi medido com paquímetro digital (no campo), no primeiro terço do colmo, acima da superfície do solo em cada um dos perfilhos amostrados.

3.6.7 Área foliar

Para avaliação da área foliar (AF) foi utilizada a equação 2 descrita por Hermann e Câmara (1999):

$$AF\ (cm^2) = C \times L \times 0{,}75 \times (N+2) \qquad (2)$$

Em que:

C é o comprimento da folha +3

L é a largura da folha +3

0,75 é o fator de correção para área foliar da cultura

N é o número de folhas abertas com pelo menos 20% de área verde.

Os resultados referentes a área foliar foram convertidos de centímetros quadrado (cm) para decímetro quadrado (dm^2).

3.6.8 Massa da matéria seca de colmos, folhas e parte aérea

Após as mensurações realizadas a campo, foram cortados os perfilhos presentes em um metro linear e transportados para o Laboratório da UPD Jaú. No laboratório, cada perfilho foi cortado, separando-se colmos de folhas. Em seguida, o material foi submetido à secagem em estufa a 70ºC, por 72 horas. Em seguida, a massa da matéria seca de colmos (MMSC) e massa de matéria seca de folhas (MMSF) de cada touceira foi determinada em balança de precisão de duas casas, com resultados expressos em grama por metro quadrado.

A massa de matéria seca da parte aérea (MMSPA) foi calculada a partir da soma das massas de matéria seca de colmos e folhas.

3.7 Variáveis Fisiológicas

Assim como para as variáveis morfológicas, as avaliações para obtenção das variáveis fisiológicas ocorreram a cada 35 dias (70, 105, 140, 175, 210, 245, 280 e 315 DAP).

3.7.2 Condutância estomática

A condutância estomática (*gs*, mmol m^{-2} s^{-1}) foi determinada por porômetro (SC-1, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EUA), acompanhado da leitura do fluxo de radiação (μmol m^{-2} s^{-1}) realizada por meio de um medidor de radiação (QMSW-SS, Apogee Instruments, Inc., Roseville, CA, EUA). As leituras foram tomadas na região mediana da folha +1 as 10h.

3.7.1 Máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II

A máxima eficiência fotoquímica do fotossistema II (*Fv/Fm*) foi determinada em folhas +1 com um fluorômetro portátil (modelo, Opti-Sciences, Inc., Hudson, NH, EUA). Amostras das folhas foram pré-escurecidas por 30 minutos, por meio de clipes antes das medidas de fluorescência. O parâmetro *Fv/Fm* foi determinado seguindo os procedimentos de Maxwell e Johnson (2000).

3.7.3 Índice SPAD

A estimativa do conteúdo de clorofila foi obtida por meio do índice SPAD, empregando o clorofilômetro portátil SPAD-502 (Konica Minolta Corporation, Osaka, Japão). Esse índice foi obtido da média de três leituras realizadas em três locais da folha +1.

3.7.4 Conteúdo total de clorofila

Para obtenção do conteúdo total de clorofila (CC, μg^{-1} cm^2 unidade), dois discos foliares (1,1 cm^2 cada) foram amostrados da lâmina foliar por meio de um furador, entre a borda e a nervura central da folha. O CC foi determinado segundo a metodologia de Porra et al. (1989), o método se baseia na utilização de 1 mL do extrato de clorofila obtido à partir da extração por ácido dimetil-formamida (DMF). A solução foi

mantida protegida da luz durante 24 h para a completa extração. Logo após realizou-se a leitura de absorbância em espectrofotômetro (DU®720, Beckman Coulter, Inc., Fullerton, CA, EUA) nos comprimentos de onda de 647 e 664 nm; a leitura foi realizada em 1mL de extrato de clorofila diluído em 1mL de água deionizada.

3.7.5 Índice de área foliar

Calculou-se a relação da área foliar total da planta (m^2) por unidade de terreno (m^2) disponível para a planta (Equação 3) (WATSON, 1947):

$$IAF = AF/S \quad (3)$$

Em que: AF = área foliar total S = superfície do solo.

3.7.6 Área foliar específica

A área foliar específica (AFE, $dm^2\ g^{-1}$) relaciona a área foliar (AF) com a massa da matéria seca da própria folha (AF/MS_{folha}) (Equação 4). Esta medida é um indicativo da espessura foliar, a qual é determinada pelo número e tamanho de células do mesófilo (RADFORD, 1967; MARAFON, 2012).

$$AFE\ (dm^2\ g^{-1}) = AF/\ MS_{folha} \quad (4)$$

3.7.7 Razão de área foliar

A razão de área foliar (RAF, $dm^2\ g^{-1}$) é definida como a relação entre a área foliar e massa seca da parte aérea (MSPA), representando a área foliar disponível para ocorrer fotossíntese. A RAF é calculada de acordo com a expressão 5 (BRIGGS et al., 1920; GONZAGA, 2012):

$$RAF\ (dm^2\ g^{-1}) = AF/MSPA \quad (5)$$

3.7.8 Taxa de crescimento relativo

A taxa de crescimento relativo (TCR) é a medida mais apropriada para avaliação do crescimento vegetal, que é dependente da quantidade de material acumulado gradativamente. A TCR ($g\ g^{-1}\ dia^{-1}$), obtida por meio da equação 6, expressa o incremento na massa de matéria seca por unidade de massa inicial, em um dado intervalo de tempo (REIS; MULLER, 1979).

$$TCR\ (g\ g^{-1}\ dia^{-1}) = (lnMS_2 - lnMS_1) / (t_2 - t_1) \quad (6)$$

Em que:

ln = logaritmo neperiano;

MS_1 e MS_2 = massas de matéria seca nos tempos t_1 e t_2.

3.7.9 Taxa de assimilação líquida

A taxa de assimilação líquida (TAL) é o acúmulo de matéria seca por unidade de área foliar durante o período de crescimento. Assim como a TCC, a TAL não é uma medida das taxas de troca de carbono, mas pode ser usada para propósitos comparativos. A TAL é uma medida da eficiência fotossintética de uma planta. Segundo BRIGGS et al. (1920) a TAL é calculada por seus valores médios através da seguinte expressão 7:

$$TAL\ (g\ m^{-2}\ dia^{-1}) = (MS_2 - MS_1 / t_2 - t_1) x\ (lnAF_2 - lnAF_1 / t_2 - t_1) \quad (7)$$

Em que:

MS_1 e MS_2= massas de matéria seca da planta (g) nos tempos t_1 e t_2 (dias);

AF_1 e AF_2= áreas foliares das plantas (dm^{-2}) nos tempos t^1 e t^2 (dias)

ln = logaritmo neperiano.

3.7.10 Taxa de crescimento da cultura (TCC)

A taxa de crescimento da cultura (TCC) representa a quantidade total de matéria seca acumulada por unidade de área de solo (S), em um determinado tempo. A TCC corresponde à taxa de produção de matéria seca de uma comunidade vegetal, expressa em g m^{-2} dia^{-1}, e é obtida por meio da equação 8 (RADFORD, 1967; MARAFON, 2012):

$$TCC\ (g\ m^{-2}\ dia^{-1}) = (MS_2 - MS_1) / S / (t_2 - t_1) \quad (8)$$

Em que:

S representa a área amostrada ocupada pela cultura (m^{-2}) no terreno

MS_1 e MS_2, as massas de matéria seca nos tempos inicial (t_1) e final (t_2) da avaliação.

3.8 Qualidade tecnológica e Produtividade da cana-de-açúcar

Por ocasião da colheita, amostraram-se aleatoriamente 10 colmos em cada parcela experimental. Posteriormente, essas amostras foram identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Tecnologia da Associcana de Jaú, para análise da qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. Os índices associados ao rendimento industrial determinados neste trabalho foram teor de sacarose nos colmos (Pol% cana), Brix% caldo, Pureza do caldo (determinada pela relação Pol% caldo Brix% $caldo^{-1}$ x 100), Fibra% cana e Açúcar total recuperável (ATR).

As produtividades de colmos e de açúcar foram determinadas no mês de outubro de 2011, 11 meses após o plantio. A produtividade de colmos, expressa em tonelada de cana por hectare (TCH), foi obtida no momento da colheita por meio da massa dos colmos (Kg) de cada parcela, pesados através de um dinamômetro acoplado a uma carregadeira. A produtividade de açúcar (TPH) foi obtida pelo produto entre a TCH e a Pol% cana (sacarose) correspondente de cada parcela, dividido por cem.

3.9 Análise Estatística

Os dados das variáveis morfológicas, fisiológicas, qualidade tecnológica e produtividade foram submetidos à análise de variância, as quais ao longo do tempo foram ajustadas por meio de análise de regressão.

Os índices fisiológicos da análise de crescimento, obtidos a partir de fórmulas matemáticas, utilizando-se da massa da matéria seca da parte aérea, massa da matéria seca das folhas e área foliar, foram ajustadas em função do tempo, por equação exponencial cúbica (PORTES; CASTRO JUNIOR, 1991).

Esses índices fisiológicos, por serem dados calculados, não obedecem as pressuposições básicas para a análise de variância (BANZATTO; KRONKA, 1989). Portanto, os dados foram apresentados na forma de gráfico, avaliando-se o comportamento das curvas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Extração dos compostos: ácido chiquímico, ácido quínico, glyphosate e ácido aminometilfosfônico (AMPA)

O sítio de ação do glyphosate é a inibição da enzima EPSPs o que provavelmente ocasiona redução da disponibilidade dos aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina e triptofano e um consequente acúmulo de compostos como ácido chiquímico e ácido quínico.

A aplicação de subdose de glyphosate na cana-planta proporcionou maior concentração de ácido chiquímico e quínico, e diferença significativa entre os tratamentos aos 105 DAP, com acréscimo de 466% e 69% respectivamente, em relação ao tratamento sem aplicação de subdose (Figura 5 A e B). No decorrer do ciclo da cana-planta, essas concentrações apresentaram queda e depois se mantiveram estáveis, mas com diferença significativa entre os tratamentos, sendo os maiores valores nas parcelas com aplicação de subdose de glyphosate. Silva (2014) verificou em soja que também houve aumento da concentração de ácido chiquímico na dose de 1,8 g e.a. ha^{-1} de glyphosate em relação à testemunha, apesar de não diferir estatísticamente. Meschede e Velini (2010) observaram, em cana-de-açúcar, que a concentração de ácido chiquímico aumentou em relação à testemunha (13,33 µg g^{-1}), com aplicação de 200 e 400 mL ha^{-1} de glyphosate para 17,33 e 23 µg g^{-1}, e 25,66 e 32 µg g^{-1}, aos 30 e 60 DAA, respectivamente. Koger et al. (2005) verificaram em arroz que os picos na concentração de ácido chiquímico ocorrem até os 14 dias após o tratamento e que altos níveis foram detectados até 28 DAP do glyphosate. Neste trabalho, com cana-planta no ciclo de cana de ano, podemos observar que a

concentração máxima de ácido chiquímico ocorreu aos 35 DAA no valor de 114,1 µg g^{-1}, assim como Meschede e Velini (2010) que verificaram teores máximos até 60 DAA em cana-de-açúcar.

Anderson et al. (2001) relata que o acúmulo de ácido chiquímico está diretamente relacionado às concentrações de glyphosate. Sharma (2013) estudando o efeito do glyphosate em *Camellia sinensis*, verificou que este promoveu acúmulo no teor de ácido chiquímico após sua aplicação, e este incremento foi proporcional ao aumento das doses aplicadas (0, 0,5, 1,0 e 2,0kg ha-1).

O comportamento do ácido quínico nas folhas de cana-planta foi semelhante ao comportamento do ácido chiquímico, e houve diferença significativa entre os tratamento, a favor da aplicação da subdose de glyphosate ao longo do ciclo de cana-planta, exceto aos 140 DAP. Gomes (2011) verificou aumento na concentração de ácido quínico de aproximadamente 4,6 vezes maior que a testemunha aos 2 DAA em folhas de milho. Orcaray et al. (2010) observaram que com aplicação de glyphosate houve aumento de 1,4 vezes na concentração de ácido quínico em ervilhas, em comparação à testemunha aos 15 DAA. Os autores citam que assim como ocorre com o ácido chiquímico, o ácido quínico também é acumulado devido a inibição da enzima EPSPs provocada pela aplicação de glyphosate, por pertencer a um ramo lateral da via do chiquimato. Este pode ser um efeito fisiológico geral no modo de ação de inibidores de aminoácidos, com importante papel na toxidade provocada por diferentes herbicidas. Yoshida (1969) cita que a concentração de ácido quínico no metabolismo das plantas possue relação linear com o crescimento, pois foi observada em diversas plantas, como feijão, trigo, coníferas e maçã. A partir desses resultados infere-se que o ácido quínico bem como o ácido chiquímico são ativamente metabolizados durante o crescimento das plantas.

O glyphosate foi detectado aos 210 e 245 DAP, mesmo que não observado nas avaliações subsequentes à aplicação da subdose, observa-se que houve efeitos residuais que podem ser conferidos por meio das concentrações de ácido chiquímico e quínico (Figura 5 C). Não foi detectado metabólitos de glyphosate, ou seja, AMPA (ácido aminometilfosfônico), nas massas das folhas de cana-de-açúcar tratados com subdose de glyphosate durante o período de avaliação do experimento.

Carbonari et al. (2004) atribuíram que o nível de glyphosate nas plantas pode estar relacionado com a lenta absorção de doses mais baixas nas folhas, com a menor concentração de herbicida usada no preparo, e a taxa de difusão mais lenta nas

folhas, ou uma maior exsudação na dose mais elevada, como resultado da translocação de grandes quantidade de herbicida pela planta, ou até mesmo para o metabolismo do glyphosate nas plantas.

A rota de degradação do glyphosate em plantas superiores não é bem compreendida. Alguns resultados publicados sobre metabolismo de glyphosate são divididos em dois grupos: aqueles que não encontraram metabolismo e aqueles estudos nos quais foram detectados metabólitos (principalmente o AMPA) (MONQUERO et al, 2004).

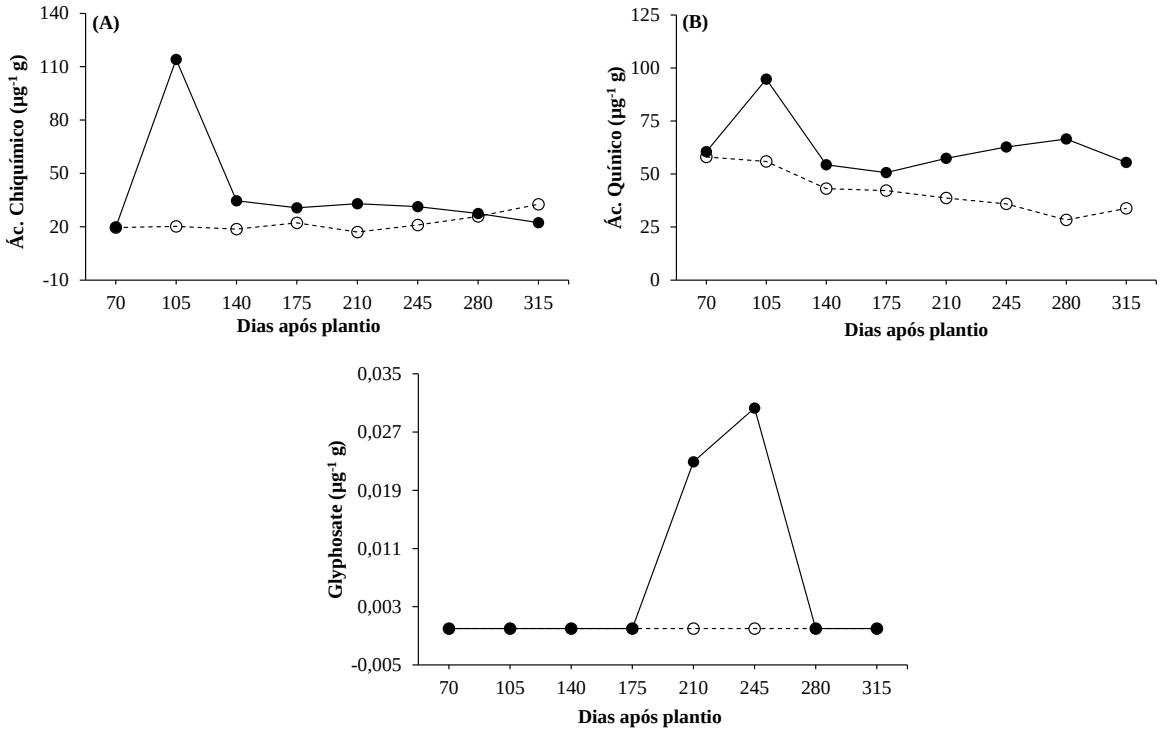


Figura 5. Conteúdo de ácido chiquímico (**A**), ácido quínico (**B**) e glyphosate (**C**) nas folhas durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (--○--) e com aplicação de subdose de glyphosate (–●–).

4.2 Teores de Fósforo

Diversos trabalhos citam que é possível o glyphosate utilizar proteínas transportadoras de fosfato, e assim, induzir os aumentos de absorção e transporte deste nutriente (RABELLO et al, 2012; VELINI et al 2012; LATORRE et al., 2011).

A aplicação de subdose de glyphosate influenciou positivamente o acúmulo do teor de fósforo (P) nas folhas, a partir dos 105 DAP, com diferenças significativas entre os tratamentos durante todo ciclo de cana-planta (Figura 6). Os valores dos teores foliares de P obtido neste trabalho estão dentro da faixa classificada como média e adequada para a cultura, de acordo com Espironelo et al. (1986) e Moura Filho et al. (2010), que obtiveram valores de 1,4 à 2,0 e 1,0 à 2,1, respectivamente. Por outro lado, apenas os valores obtidos com aplicação de subdose de glyphosate estão de acordo com o considerado adequado de 1,8 a 2,0 e 1,9 g kg^{-1}, segundo Malavolta et al. (1997) e Reis Junior e Monnerat (2002). Desta forma os resultados indicam que a subdose de glyphosate contribuiu para melhorar a nutrição por P na cana-de-açúcar.

Esses resultados sugerem que a aplicação da subdose de glyphosate proporcionou melhor nutrição de P pela cana-planta uma vez que foi verificado menor teor deste nutriente no tratamento sem aplicação.

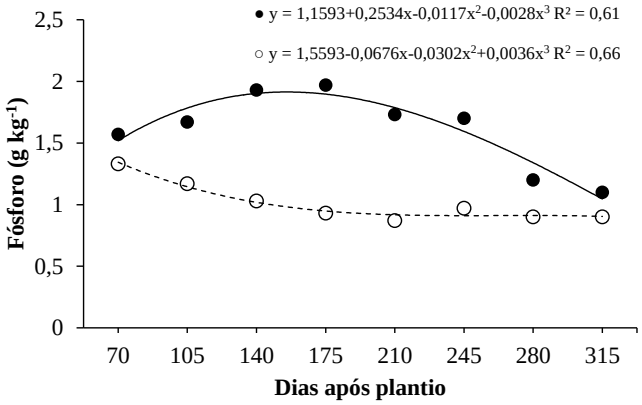


Figura 6. Teores de fósforo em folhas durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (--○--) e com aplicação de subdose de glyphosate (–●–).

Com a aplicação da subdose de glyphosate, foi observado aumento no teor de P das folhas em até 112% aos 175 DAT, em comparação às plantas sem aplicação (Figura 7).

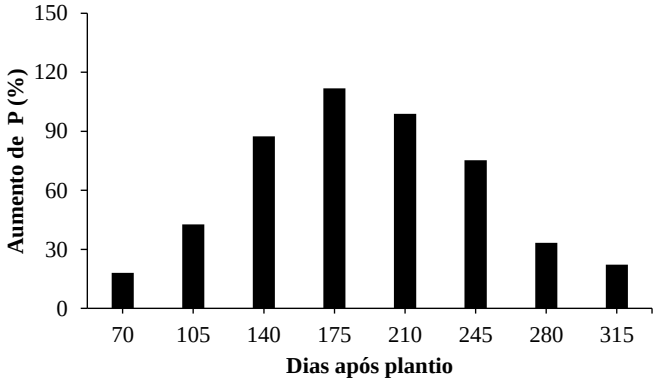


Figura 7. Percentual de incremento do teor de fósforo em folhas durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 com aplicação de subdose de glyphosate.

Carbonari et al. (2007) também verificaram que o glyphosate em doses entre 1,8 e 720 g e a ha^{-1} promoveu incrementos na absorção de P nas folhas de eucalipto, independente da dose de P no solo. Godoy (2007) constatou que em soja convencional as subdoses de glyphosate aumentaram a absorção de P, principalmente na menor concentração deste nutriente no solo. Com a aplicação de 18 g e a ha^{-1}, o teor de P nas folhas aumentou a 2,61 vezes, já, em soja convencional, o teor de P foi elevado em 37% pela aplicação de subdose de glyphosate na dose de 720 g ea ha^{-1}.

Bott et al. (2011), em experimento conduzido em solo com baixa resposta à adubação de P, verificaram que a aplicação de subdose de glyphosate (3,2 mg e a ha^{-1}) aumentou a biomassa e o teor de P da parte aérea da soja, e atribuíram isso ao efeito hormótico à subdose aplicada; diferente de Rabello et al. (2012) que não verificaram efeito das subdoses sobre o teor de P nas folhas de feijoeiro.

4.3 Variáveis Morfológicas

Foi observado na cana-de-açúcar exposta à aplicação de subdose de glyphosate aumento de diversas características biométricas ao longo do ciclo da cultura como, número e comprimento de colmos.

Em relação ao número de perfilhos por metro de sulco, a variedade SP80-1842 seguiu o padrão de desenvolvimento da maioria das variedades de cana-de-açúcar, ou seja, aumento no perfilhamento até 120 dias após o plantio, em que a população máxima é alcançada, e dos 150-180 dias, pelo menos 50% dos perfilhos morrem e uma população estável é estabelecida (JADOSKI et al., 2010).

A aplicação da subdose de glyphosate conferiu maiores valores no número de perfilhos do que plantas sem aplicação (Figura 8 A). Esse resultado pode ser atribuído pelos incrementos nos teores de P, obtidos ao longo do ciclo da cultura. Segundo Tomaz (2009), em cana-de-açúcar o P assume grande importância no perfilhamento, e portanto, na produtividade final da cultura. Pois de acordo com Cantarutti et al. (2002) no estádio inicial de desenvolvimento, há intensa atividade meristemática, em virtude do desenvolvimento do sistema radicular, do perfilhamento, da emissão de novos perfilhos e do fato de o fósforo ser o essencial para a divisão celular, pelo seu papel na estrutura dos ácidos nucléicos.

Considerando o comprimento de colmos, as plantas com aplicação da subdose de glyphosate apresentaram comprimentos maiores em relação às sem aplicação (Figura 8 B). As plantas submetidas à aplicação de subdose apresentaram incremento de 49% aos 105 DAP e a partir dos 140 DAP obteve-se incremento médio de 23%. Tal resultado comprova que a aplicação de subdose de glyphosate em cana-de-açúcar não inibe completamente a enzima EPSPs e a rota do chiquimato, a qual também é precursora da produção do ácido indolacético (AIA), responsável pela expansão celular, ou seja, a planta ainda pode ser estimulada à promover crescimento e alongação celular. E tais incrementos validam que há feito de dose-resposta, assim como descrito por Velini et al. (2008), de que há estímulos de crescimento quando aplicado glyphosate em doses baixas (variando de 1,8-36 g e a ha^{-1}).

Silva et al. (2012a) também concluíram que a dose de 1,8 g e a ha^{-1} foi a que promoveu maior altura de plantas em soja, do mesmo modo, Silva et al. (2009) constataram aos 25 dias após aplicação de 1,8 g e a ha^{-1} de glyphosate, maior altura do perfilho primário de cana-de-açúcar, dentre todas as outras doses aplicadas. Neves et al. (2009), em estudo com algodoeiro, observaram estímulo de 15% para essa variável, em relação à testemunha, nas doses de 18-33,5 g i a ha^{-1}, com máxima resposta de 16,4%, na dose de 27 g i a ha^{-1} (correspondente a 75 mL do produto comercial). Já, Silva et al. (2014), avaliando o desenvolvimento de picão preto em resposta à aplicação de subdoses de glyphosate, não obtiveram resposta quanto ao incremento na altura das plantas tratadas com 1,8 g e a ha^{-1}, entretanto, incremento de 10% na altura foi observado com a subdose de 3,15 g e a ha^{-1}.

Cedergreen (2008) atribuiu o real aumento de crescimento das plantas de cevada tratadas com subdose de glyphosate, à teoria da compensação, na qual

ocorre ao longo do tempo, no qual as plantas apresentam aumento no crescimento inicial seguido de ligeira depressão. Para o mesmo autor, outra razão teórica para o crescimento é a ocorrência de alocação de recursos que foram alterados entre a raiz e a parte aérea. Assim, o crescimento observado pelo estímulo de glyphosate como efeito hormótico foram reais, e parece ter eficácia ao longo do tempo. Outra hipótese para se explicar o crescimento das plantas, pode ser pela ocorrência do aumento nas taxas fotossintéticas, pelo maior aproveitamento de luz e / ou a eficiência de fixação de carbono (CEDERGREEN; OLSEN, 2010).

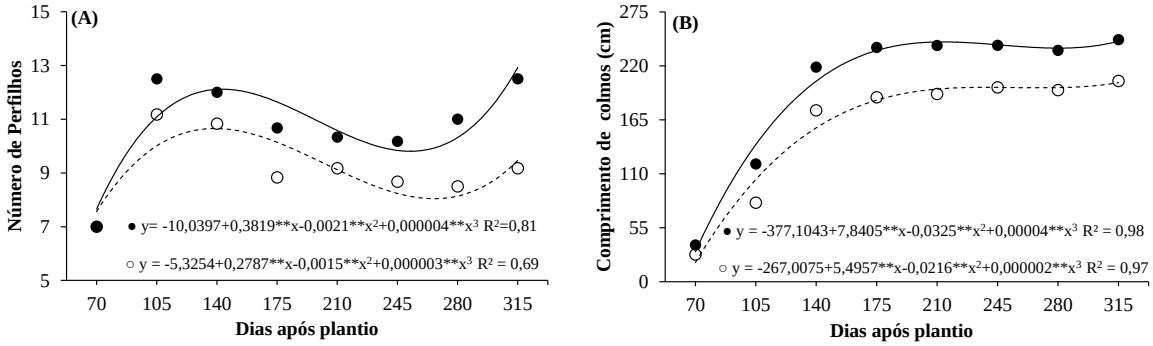


Figura 8**.** Número de perfilhos (**A**) e comprimento de colmos (**B**) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (--○--) e com aplicação de subdose de glyphosate (–●–).

Os valores de número de entrenós e comprimento médio de entrenós, tanto sem aplicação quanto com aplicação de subdose de glyphosate apresentaram o comprimento médio de entrenós inversamente relacionado ao número de entrenós, ou seja, quanto maior o número, menor o comprimento. Foi observado aumento do número de entrenós com aplicação da subdose de glyphosate durante todo ciclo da cultura (Figura 9 A). Aos 280 DAP, período de pouca disponibilidade hídrica, houve incremento de 22% em relação às plantas sem tratamento. Tal resultado pode ser atribuído devido ao aumento no comprimento de colmos, indicando que mesmo sob deficiência hídrica (Figura 2), há efeito da subdose de glyphosate no incremento do número de entrenós.

De acordo com Arantes (2012) o número de entrenós acompanha o crescimento em altura das plantas de cana-de-açúcar, por participar diretamente no processo de divisão e alongamento das células meristemáticas.

O comprimento médio de entrenó das plantas tratadas com aplicação de subdose de glyphosate apresentaram aumento apenas em algumas avaliações

durante o ciclo da cultura (Figura 9 B). O comprimento de entrenó está diretamente relacionado com o comprimento de colmo que por sua vez, é decorrente do crescimento dos tecidos, o qual foi influenciado pela aplicação da subdose de glyphosate.

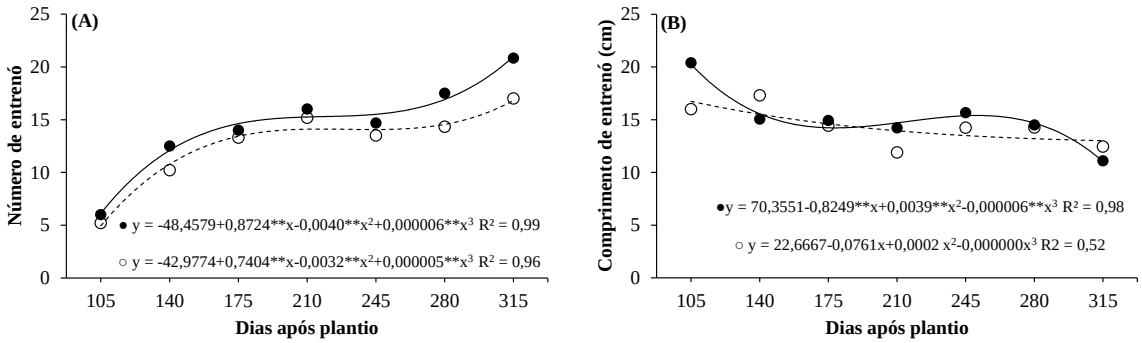


Figura 9. Número de entrenós nos colmos (**A**) e comprimento médio de entrenó (**B**) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (--○--) e com aplicação de subdose de glyphosate (–●–).

Se tratando de diâmetro dos colmos, apesar da pouca diferença entre os tratamento, foi possível observar maiores valores no tratamento com aplicação de subdose de glyphosate em alguns períodos do ciclo da cultura, com incrementos de 14% aos 210 DAP (Figura 10 A).

Carvalho et al. (2013) observaram incremento de 18% no diâmetro do caule de cafeeiros, com uso subdose de glyphosate, atribuindo tal resultado à ocorrência de efeito hormótico. Silva et al. (2014), também trabalhando com subdoses de glyhosate, observaram aumento do diâmetro do caule de picão-preto na ordem de 6% a 26%, estes resultados foram semelhantes ao encontrado por Meschede et al. (2008) estudando subdose de glyphosate em *Commelina benghalensis*. Já, Kappes et al. (2012) não observaram diferença significativa de diâmetro de caules com a aplicação de subdose de glyphosate em crotalária.

A área foliar, de maneira geral, foi reduzida durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, mas as plantas tratadas com aplicação subdose de glyphosate apresentaram maior área foliar quando comparadas às sem aplicação (Figura 10 B).

Em períodos de pouca pluviosidade, como ocorreu aos 140 à 245 DAP (Figura 2), uma das alterações morfofisiológicas das plantas é reduzir o tamanho e o surgimento de novas folhas, assim, diminuem a superfície transpirante e o gasto metabólico para manutenção dos tecidos (SMIT; SINGELS, 2006). Pincelli e Silva (2012)

também encontraram redução na área foliar da cana-de-açúcar submetidas à estresse hídrico.

Segundo Carbonari et al. (2007a) as baixas doses de glyphosate afetaram positivamente o crescimento das plantas, aumentando a área foliar e biomassa. Jadoski et al. (2010), em revisão, relataram que a cana de ano plantada em setembro-outubro, tem seu máximo desenvolvimento de novembro a abril, diminuindo após esse mês devido às condições climáticas adversas, com possibilidade de colheita, dependendo da variedade, a partir do mês de julho, corroborando assim, com os resultados obtidos neste experimento.

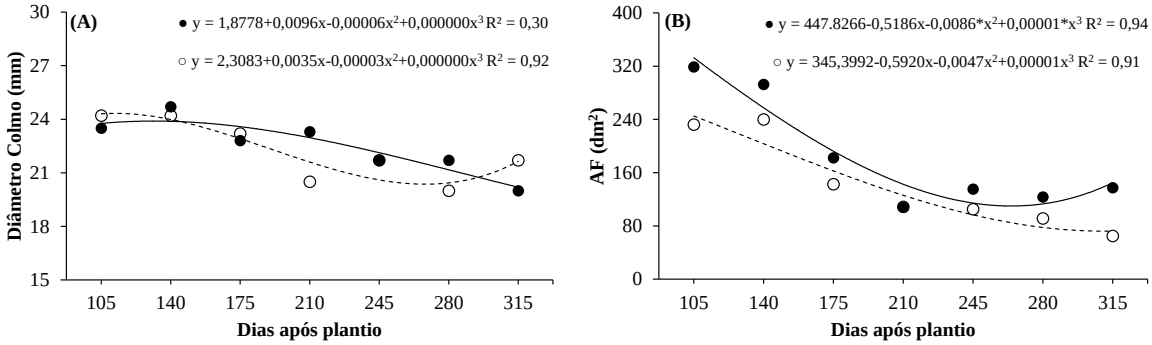


Figura 10. Diâmetro do colmo (**A**) e área foliar (**B**) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (--○--) e com aplicação de subdose de glyphosate (–●–).

Houve maior acúmulo de massa de matéria seca de colmos (MMSC) em plantas tratadas com subdose de glyphosate (Figura 11 A). Resultado esse que pode ser atribuído ao aumento do número de perfilhos e do comprimento dos colmos nas plantas que foram submetidas à aplicação da subdose de glyphosate.

De acordo com Gava et al. (2001), estudando acúmulo de massa seca diário, também da variedade SP80-1842, observaram que a época de maior crescimento da cultura foi de novembro à março, decrescendo no período de abril à maio, e voltando a crescer novamente de junho à julho. Tal comportamento também foi observado neste experimento.

Gomes et al. (2013) observaram, em milho, que também ouve maior acúmulo de massa seca do colmo àquelas submetidas a subdose de glyphosate, quando comparado com plantas sem aplicação.

Quanto à massa de matéria seca da folha (MMSF) houve comportamento semelhante à MMSC, ou seja, maior incremento nas plantas com aplicação de subdose de glyphosate do que nas plantas sem aplicação (Figura 11 B).

Silva et al. (2014) também verificaram que houve maiores valores de MMSF com aplicação de subdose de glyphosate em picão-preto.

Em relação a massa de matéria seca da parte aérea (MMSPA), verificou-se incrementos com aplicação da subdose de glyphosate durante o ciclo de desenvolvimento da cultura (Figura 11 C). O incremento máximo foi de 85% aos 280 DAP. Esses resultados podem ser atribuídos à eficácia da aplicação de subdose de glyphosate. Velini et al. (2008) observaram que o peso seco total aumentou significativamente em soja convencional e transgênica, pinus, eucalipto e milho após aplicação de subdose de glyphosate.

Belz et al. (2011) também observaram na MMSPA, incremento máximo de 36% dos 7 aos 49 dias após tratamento, em plantas de cevada tratadas com subdose de glyphosate.

Silva et al. (2009) trabalhando com cana-de-açúcar, obtiveram incremento de 1,81 vezes mais na MMSPA com subdose de 1,8 g e a ha^{-1} aos 25 dias após o tratamento do que na testemunha. Carvalho et al. (2013) obtiveram efeitos estimulatórios de 27% na MMSPA em plantas de café expostas a 513 g e a ha^{-1}, estes autores concluíram que houve efeito hormótico.

Velini et al. (2008) obtiveram ganhos de MMSPA na ordem de 108% em soja convencional, 110% em soja transgênica e 99% em milho, ambos tratados também com 1,8 g e a ha^{-1}.

Belz et al. (2008) observaram ligeiro efeito hormótico aos 14 dias após o tratamento com 13% no estímulo de massa seca, 21% no comprimento da parte aérea e 38% no crescimento de folhas, usando o herbicida natural *Pathernin* em alface.

Os incrementos em massa de matéria seca foram proporcionais tanto nas parcelas sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate, não havendo, portanto, crescimento apenas dos colmos ou das folhas com aplicação da subdose de glyphosate (Figura 12).

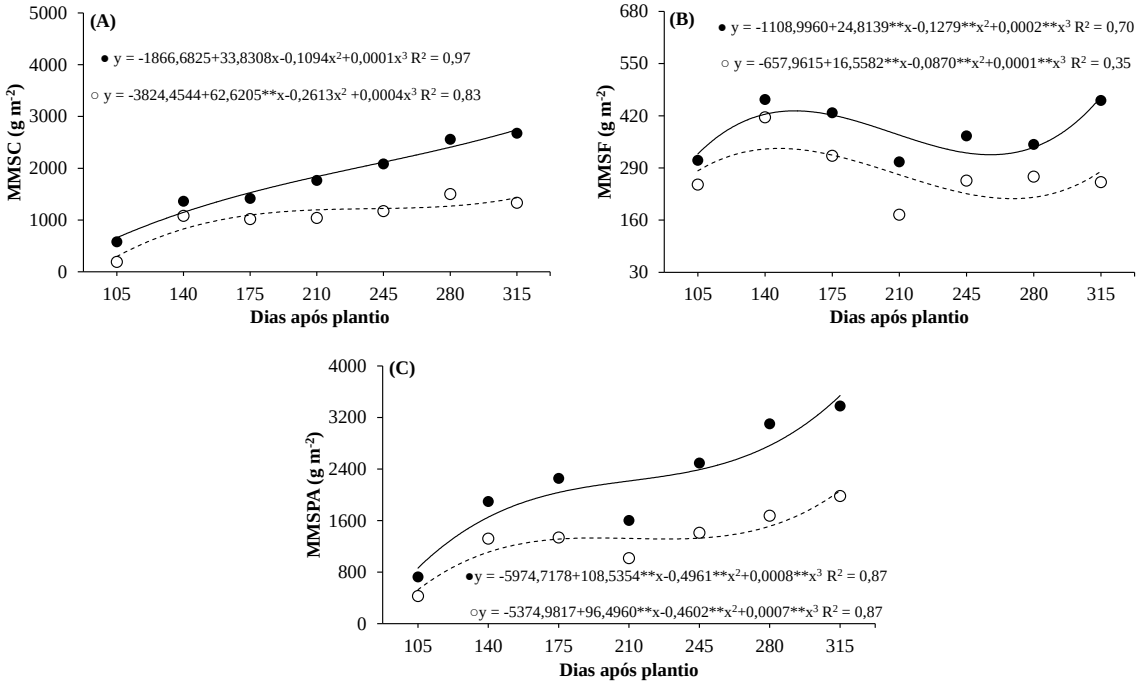


Figura 11. Massa de matéria seca do colmo (MMSC) (**A**), massa de matéria seca das folhas (MMSF) (**B**) e massa de matéria seca da parte aérea (MMSPA) (**C**) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (--○--) e com aplicação de subdose de glyphosate (–●–).

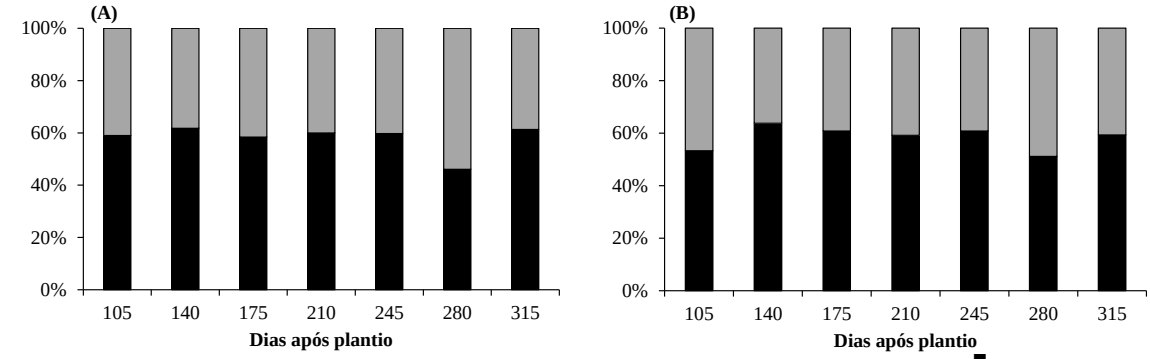


Figura 12. Percentual de acúmulo de massa de matéria seca do colmo (▌) e massa de matéria seca das folhas (▌) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (**A**) e com aplicação de subdose de glyphosate (**B**).

4.4 Variáveis Fisiológicas

A condutância estomática (*gs*), que está ligada à eficiência do uso da água pelas plantas, é uma variável que pode ser afetado pelo glyphosate.

A aplicação da subdose de glyphosate permitiu maiores valores absolutos de *gs* dos 70 aos 175 dias após plantio, período de máximo desenvolvimento da cultura, sugerindo que houve maior captação de CO_2 para ser utilizada na fotossíntese,

favorecendo o crescimento das plantas (Figura 13 A). Aos 245 e 280 DAP houve queda da *gs*, período em que houve ligeiro déficit hídrico, mas aos 315 DAP, com a retomada das chuvas, a recuperação da *gs* nas plantas sob ação da subdose de glyphosate foi mais rápida, diferindo significativamente das plantas não tratadas.

A abertura estomática permite que haja concentração e fluxo livre de CO_2 e O_2 nos espaços intercelulares, na qual a fotossíntese é dependente. Sendo assim, qualquer efeito, causado por herbicidas, que leve à menor absorção ou à translocação de água pode alterar primeiramente a condutância estomática, reduzindo a taxa fotossintética (TORRES et al. 2012).

Um aumento nas taxas de fixação do carbono tanto pode ser causado pela eficiência na captação de luz, o que aumentaria o crescimento sob condições limitantes de crescimento sob irradiância, ou por uma maior eficiência da fixação do carbono. A eficiência das taxas de fixação de carbono podem aumentar através de um aumento na condutância estomática. A condutância estomática é regulada principalmente por hormônios vegetais, como ácido abscísico, citocininas e giberelinas, facilitando o transporte de CO_2 ao longo da parede celular (CEDERGREEN; OLESEN, 2010).

Gravena (2006) observou que subdoses de glyphosate aplicadas em planta de citros não reduziram a taxa de assimilação de carbono durante 12 dias avaliados após a aplicação de 720 g de glyphosate por hectare. Contudo, a *gs* e a transpiração reduziram após oito dias da aplicação, mas se recuperaram após quatro dias.

Carvalho e Alves (2011) observaram maior *gs* nas doses de 262 e 185 g e a ha^{-1}, em plantas de café submetidas à subdose de glyphosate, aos dois e 14 dias após aplicação (DAA), respectivamente, em plantas com 10 dias após transplante. E aos 45 dias após transplante as plantas apresentaram maior *gs* na dose de 441 e 447 g e a ha^{-1} aos dois e 14 DAA, respectivamente. Portanto, para atingir maior *gs*, as plantas com 45 dias após transplante tiveram que receber doses de glyphosate 1,7 (aos 2 DAA) e 2,4 (aos 14 DAA) vezes maior do que aquelas com 10 dias após transplante. Estes autores concluíram que plantas mais jovens apresentam maior sensibilidade ao glyphosate, enquanto que plantas mais velhas toleram mais o herbicida.

A aplicação de subdose de glyphosate permitiu a planta de cana-de-açúcar manter elevados valoress de F_v/F_m durante todo ciclo de desenvolvimento, em comparação com a cana-de-açúcar não tratada com subdose (Figura 13 B).

Cedergreen e Olsen (2010), também observaram que o uso de subdoses de glyphosate pode apresentar estímulo na fotossíntese, caracterizando o fenômeno da hormese. Essa tendência de estímulo ocorreu poucas horas após aplicação da subdose em cevada e persistiu até o período da colheita. Os mesmos autores ainda concluem que a taxa de fotossíntese, em razão da área foliar específica, foi de aproximadamente 20% mais elevada, do que plantas controle, e que esse aumento não se deu pelo uso eficiente da luz pelas folhas.

Vários trabalhos demonstram que o glyphosate (em doses comerciais) afeta drasticamente a eficiência fotossintética das plantas, pois, a quantidade de chiquimato acumulado devido à ação do glyphosate apresenta-se como um forte dreno de carbono no ciclo de Calvin, causado pelo desvio da eritrose-4-fosfato (VELINI et al., 2012). Machado et al. (2010) observaram incremento na taxa fotossintética aos 21 DAA com a dose de 43,2 g e a h^{-1}, este fato está diretamente relacionado com o consumo de CO_2 do meio e com o aumento de massa da planta.

A técnica do rendimento quântico do fotossistema II (PSII), obtido a partir da fluorescência da clorofila *a*, pode estimar a integridade do PSII de uma determinada folha, pois revela o nível energético de excitação dos pigmentos que dirigem a fotossíntese (SCHOLES; HORTON, 1993). Quando uma planta está com seu aparelho fotossintético intacto, a razão F_v/F_m (rendimento quântico máximo) varia entre 0,75 e 0,85 e a queda nesta razão reflete a presença de dano fotoinibitório nos centros de reação do PSII (SILVA et al., 2006).

Em relação ao índice SPAD e conteúdo de clorofila total, houve maiores valores absolutos quando aplicada subdose de glyphosate entre os tratamentos com e sem aplicação de subdose ao longo do ciclo da cultura (Figura 13 C). Aos 70 DAP, os valores de índice SPAD foram praticamente iguais nos dois tratamentos. Já aos 105 e 140 DAP, houve aumento no índice SPAD de 9,7% e 14,5%, respectivamente.

Incrementos similares foram observados por Silva et al. (2014), que aos 20 dias após aplicação em picão-preto, verificaram efeito positivo do índice SPAD com aplicação de subdose de glyphosate, com aumento de 14% e 6%, respectivamente.

Gravena (2006), avaliando a aplicação de glyphosate em citrus, dos 0 aos 12 dias após aplicação, nas doses de 0, 180, 360 e 720 g e a ha^{-1}, verificou que teores de clorofila foram crescentes durante o período de avaliação, mas não diferiram significativamente e não foram afetados pela aplicação de glyphosate.

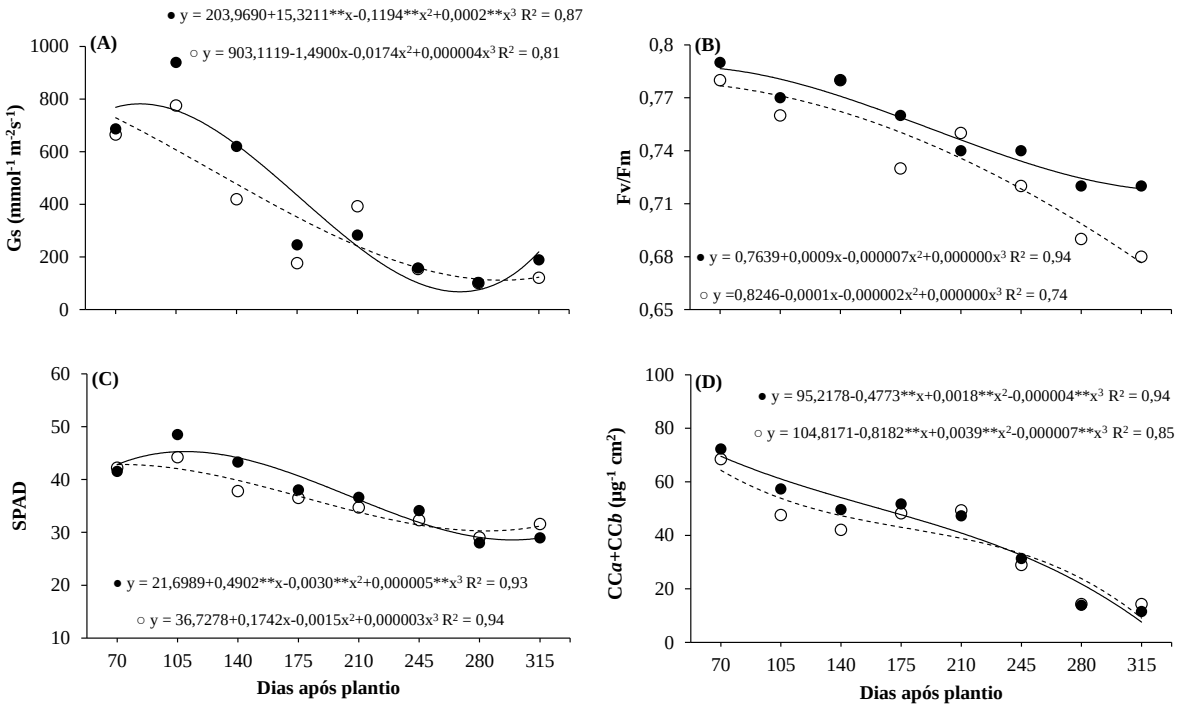


Figura 13. Condutância estomática (Gs) (**A**), eficiência fotoquímica (Fv/Fm) (**B**), índice SPAD (**C**) e conteúdo de clorofila total (CC*a*+CC*b*) (**D**) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (--○--) e com aplicação de subdose de glyphosate (–●–).

A importância da verificação do conteúdo de clorofila se dá por ser um dos principais pigmentos relacionados à eficiência fotossintética e, consequentemente, ao crescimento e adaptação das plantas a diversos ambientes (MESCHEDE et al. 2011b).

Durante o ciclo da cana-planta o conteúdo de clorofila total (CC*a*+CC*b*) teve comportamento semelhante entre os tratamentos (Figura 13 D). Pode-se observar também que o comportamento desta variável foi semelhante ao índice SPAD, já que há relação entre o índice de esverdeamento (SPAD) e o teor de clorofila das folhas em várias espécies de plantas (JIFON et al., 2005).

Ketel (1996) observou incrementos no conteúdo de clorofila e na fotossíntese das plantas de *Chenopodium album* tratadas com subdose de glyphosate, e verificou que houve 1,8 e 2 vezes mais clorofila por unidade de massa fresca de folha quando tratado com 1,25 e 0,62 mL ha^{-1} de glyphosate, respectivamente. O mesmo autor ressalta que, a recuperação da fotossíntese tem sido sugerida como a razão para a degradação tardia de clorofila sob condições de baixas ações fitotóxicas.

Meschede et al. (2011b), em experimento com aplicação de herbicidas na cana-de-açúcar, verificaram que a dose de 400 mL ha^{-1} de glyphosate apresentou redução significativa do conteúdo de clorofila *a* e *b* e exibiu efeitos deletérios em relação a testemunha; contudo, esse efeito não se mantém quando se reduz a dose para 200 mL ha^{-1}.

As equações de ajuste entre massa da matéria seca da parte aérea (MMSPA), massa da matéria seca de folhas (MMSF) e área foliar (AF) e R^2 para cada um dos índices fisiológicos (IAF, AFE, RAF, TCR, TAL e TCC) podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3. Equações de ajuste da massa de matéria seca da parte aérea (MMSPA), massa de matéria seca das folhas (MMSF) e área foliar (AF) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após tratamentos sem aplicação (0 g e a ha^{-1}) e com aplicação (1,8 g e a ha^{-1}) de subdose de glyphosate.

Subdose Aplicada	**Equações**	**R^2**
0 g e a ha^{-1}	Y (MMSPA) = (-506,5071)+(15,8796)x+(-8,718322E-02)x^2+(1,468619E-04)x^3	0,85
	Y (MMSF) = (-428,0389)+(12,93132)x+(-6,882329E-02)x^2+(1,099023E-04)x^3	0,65
	Z (AF) = (240,3898)+(,6790838)x+(-9,725971E-03)x^2+(1,890863E-05)x^3	0,95
1,8 g e a ha^{-1}	Y (MMSPA) = (-6030,261)+(108,1707)x+(-,4959672)x^2+(7,901913E-04)x^3	0,96
	Y (MMSF) = (-4239,221)+(74,60301)x+(-,3277586)x^2+(7,85768E-04)x^3	0,91
	Z (AF) = (-273,3943)+(11,37579)x+(-6,755001E-02)x^2+(1,137984E-04)x^3	0,97

Y (MMSPA) = ajuste da massa de matéria seca da parte aérea em função do tempo.
Y (MMSF) = ajuste da massa de matéria seca da folha em função do tempo.
Z (AF) = ajuste da área foliar em função do tempo.

Em relação ao índice de área foliar (IAF), a aplicação de subdose de glyphosate apresentou características de efeito hormótico, pois os valores máximos IAF foram obtidos nas plantas com aplicação de subdose de glypohsate (Figura 14 A).

Alguns autores consideram que o IAF ótimo ocorre nas primeiras fases de crescimento, quando o sombreamento e o auto-sombreamento são mínimos (SHIH;GASCHO,1980; MARAFON, 2012).

A área foliar específica (AFE) foi maior em valores absolutos nas plantas tratadas com subdose de glyphosate (Figura 14 B). Após esse período os valores de AFE foram diminuindo ao longo do ciclo.

Os maiores valores de AFE no início do desenvolvimento, segundo Benincasa (2003), revelam folhas pouco espessas, essa diferença no espessamento permite verificar se as plantas estão acumulando fotoassimilados em suas folhas ou translocando-os para outros órgãos (SILVA et al. 2005). Os valores decrescem com o desenvolvimento da cultura, mostrando que a cultura da cana-de-açúcar transloca suas reservas das folhas para outras partes da planta, principalmente para os colmos (SILVA et al., 2005).

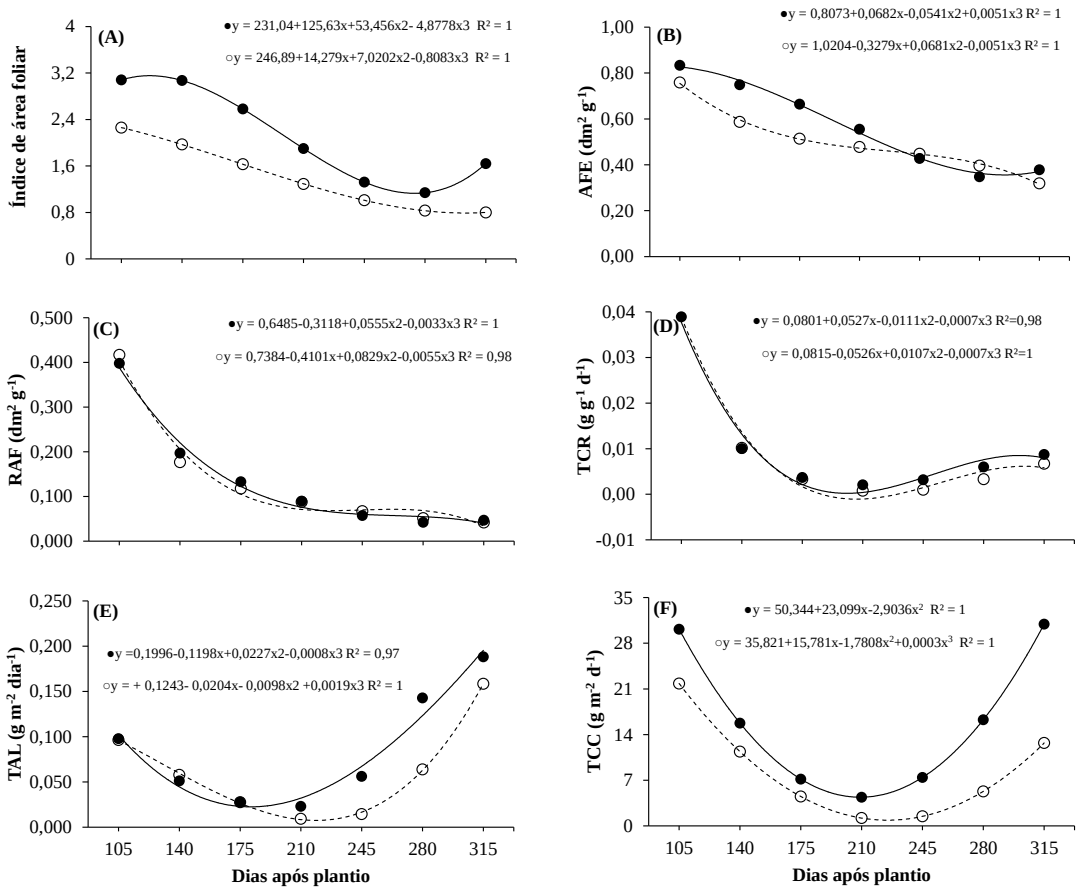


Figura 14. Índice de área foliar **(A),** área foliar específica (AFE) **(B)**, razão da área foliar (RAF) **(C)** taxa de crescimento relativo (TCR) (**D**), taxa de assimilação líquida (TAL) (**E**), taxa de crescimento da cultura (TCC) (**F**) durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação (--○--) e com aplicação de subdose de glyphosate (–●–).

Aboagye et al. (2003), trabalhando com crescimento inicial de cana-de-açúcar, avaliando o plantio na densidade normal e em altas densidades com

aplicação de giberelina, obteveram valores de AFE semelhantes aos deste experimento, indicando que tanto a aplicação de giberelina quanto de glyphosate pouco influenciam a AFE.

Quanto à razão de área foliar (RAF), que representa a área foliar disponível para ocorrer fotossíntese (BRIGGS et al., 1920; MARAFON, 2012), pode-se observar que com a aplicação de subdose de glyphosate não houve mudança no comportamento ao longo do ciclo da cultura (Figura 14 C). Os valores máximo obtidos para RAF ocorreu no início do ciclo da cultura, para ambos os tratamentos, época em que a maior parte do material fotossintetizado é utilizada no desenvolvimento das folhas para aumentar a captação de luz (FERRARI et al., 2008).

Após esse período observa-se queda na produção de folhas prevalecendo até o final do desenvolvimento da cultura. Tais resultados corroboram com Barreiro et al. (2006) e Ramesh (2000), que relataram RAF elevada no início do ciclo vegetativo, decrescendo com a maturação da planta.

A taxa de crescimento relativo (TCR) é a medida mais apropriada para avaliação do crescimento vegetal, que é dependente da quantidade de material acumulado gradativamente (REIS; MULLER, 1979; MARAFON, 2012). Verifica-se que em ambos os tratamentos não houve diferença dos valores durante o ciclo da cultura (Figura 14 D).

Os fatores que influenciam diretamente nesse comportamento são atribuídos ao aumento da competição intraespecífica pelos principais fatores ambientais responsáveis pelo crescimento (GAVA et al. 2001).

O declínio de TCR é esperado conforme a planta vai atingindo a maturidade, já que com o aumento da massa de matéria seca acumulada pelas plantas ocorre aumento da necessidade de fotoassimilados disponível para manutenção de órgãos já formados, o que diminui a quantidade de fotoassimilados para o crescimento (BENINCASA, 2003). A TCR também diminui à medida que a planta cresce em virtude do auto-sombreamento das folhas. Nas variedades mais produtivas, que geralmente desenvolvem mais rapidamente o seu IAF, os valores de TCR são maiores. Portanto, a TCR exerce maior influência na fase de desenvolvimento da área foliar. Quando a planta alcança um IAF relativamente elevado, a correlação entre TCR e produtividade econômica, se reduz (MARAFON, 2012). Tais comportamentos também foram observados por Singh

et al. (2013), Batista (2012), Tavares (2009), Oliveira et al. (2005), Silva et al. (2005), Oliveira (2004), Ramesh (2000) em cana-de-açúcar.

A taxa de assimilação líquida (TAL) representa o incremento em massa de matéria seca acumulada na planta por unidade de área foliar disponível, durante um determinado intervalo de tempo (MARAFON, 2012; BRIGGS et al., 1920).

O comportamento em ambos os tratamentos foi igual até os 210 DAP e a partir daí houve diferença, no qual plantas tratadas com subdose de glyphosate apresentaram maiores valores absolutos de TAL, representando maior potencial de produção de massa de matéria seca da parte aérea no final do ciclo (Figura 14 E). Este comportamento também foi observado por Oliveira et al. (2005) em cana-de-açúcar.

Os resultados referentes a AFE e TAL corroboram com Watson (1952), o qual relata que a TAL expressa o balanço entre a fotossíntese e a respiração, sendo, portanto, mais influenciada pelas condições climáticas, do que pelo potencial genético do vegetal. Além disso, a AFE e a TAL são inversamente proporcionais, porque à medida que a AFE diminui, ocorre aumento na TAL, o que é verificado a partir dos 245 DAP (Figura 14 B e E).

Quanto à taxa de crescimento da cultura (TCC), a aplicação de subdose de glyphosate possibilitou valores absolutos mais elevados em comparação com as plantas sem aplicação (Figura 14 F). Esses resultados sugerem que a TCC possui alta relação com a TAL, uma vez que foi verificado comportamento semelhantes das duas variáveis durante o período experimental. Segundo a literatura, a TCC é descrita como sendo a representação da quantidade total de matéria seca acumulada por unidade de área de solo, em um determinado tempo (REIS; MULLER, 1979; BENINCASA, 1988; MARAFON, 2012). Além disso, Surendar et al. (2013) também definem TCC como uma função de interceptação de luz pela AF de uma determinada cultura.

4.5 Qualidade tecnológica e Produtividade da cana-de-açúcar

Com exceção ao percentual de pureza, verificou-se que a aplicação de subdose de glyphosate promoveu redução da Fibra% cana, aumentou o Brix% e Pol% cana (PC). Estes resultados indicam que o tratamento com glyphosate melhorou as variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar (Tabela 4). Segundo Ripoli e Ripoli (2009), a porcentagem da fibra da cana reflete a eficiência da extração da moenda, ou seja, quanto

mais alta a fibra da cana, menor será a eficiência de extração. Deuber (1988) descreve que quanto maior o Pol% cana melhor o rendimento de sacarose.

Tabela 4. Porcentagem de fibra, brix, pureza, pol (PC), açúcar total recuperável (ATR), tonelada de cana por hectare (TCH) e tonelada de pol por hectare (TPH) no ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após os tratamentos sem aplicação e com aplicação de subdose de glyphosate[(1)].

Tratamentos	Fibra	Brix	Pureza	PC	ATR	TCH	TPH
	(%)				(kg açúcar t^{-1})	(t cana ha^{-1})	
Sem aplicação	15,5a	22,17b	89,67a	16,0b	156,5b	51,17b	8,17b
Com aplicação	14,5b	23,33a	89,33a	17,0a	166,33a	70,50a	12,0a
C.V. (%)	4,22	3,06	3,03	0,00	1,99	11,26	8,20

[(1)]Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade.

Nos resultados referentes a açúcar total recuperável (ATR), pode-se observar o efeito significativo da aplicação da subdose de glyphosate em relação à não aplicação (Tabela 4). Os incrementos na ATR com aplicação de subdose de glyphosate chegaram à 6,3%. Esses resultados provavelmente se devem à maior influência que a sacarose apresenta sobre os açúcares totais. Segundo Viana (2011), o açúcar total recuperável (ATR) é utilizado para estimar a quantidade de sacarose na matéria-prima que poderá ser recuperada como açúcar cristal, este parâmetro é de suma importância para a indústria sucroalcooleira. Para quantificar o açúcar total recuperável e a produtividade de sacarose aparente foram criados os termos ATR, expresso em quilogramas por tonelada cana.

Em relação à produtividade de cana (TCH) e de açúcar (TPH), verificou-se efeito significativo para aplicação de subdose de glyphosate. Observou-se que a diferença entre os tratamentos foi superior em 38% para TCH e 47% para TPH nas parcelas tratadas com subdose no início do desenvolvimento vegetativo da cultura.

De acordo com Landell e Silva (2004), a produção de cana-de-açúcar é reflexo dos seus componentes de produção, tais como o diâmetro, o comprimento e o número de colmos, dessa maneira infere-se sobre a relação positiva dos maiores número de perfilhos e comprimento de colmos observados após a aplicação da subdose de glyphosate (Figura 8 A e B) na produtividade. Além disso, o incremento na produtividade pode estar relacionado com a maior disponibilidade de fósforo que foi obtida durante todo ciclo da cultura pela aplicação de subdose de glyphosate (Figura 6).

Silva et al. (2012b) estudaram o efeito de subdose de glyphosate em feijoeiro, e observaram aumento da produtividade na cultivar Juriti, com a subdose de 10 g i a ha^{-1}, proporcionando incremento em torno de 7,5 a 10%, em relação à testemunha. Cedergreen et al. (2009) verificaram que a aplicação de glyphosate, no intervalo de dose de 2,5-20 g e a ha^{-1}, aumentou a produção de grãos de cevada em 12-15%, quando aplicada no momento de enchimento do grão, obtendo-se assim produtividade bastante expressiva. Os autores ainda afirmam que o rendimento de 12% equivale a 10 vezes mais do que pode ser alcançado na média anual utilizando-se como base o melhoramento atual e tecnologias moleculares. El-Shahawy e Sharara (2011), trabalhando com efeito hormótico de glyphosate em feijão guandu, verificaram que a aplicação apenas uma vez das subdoses foi suficientemente mais eficaz do que aplicado por duas vezes. Deste modo, resultou em aumento da produtividade de 59% e 65% na produção de sementes em relação ao controle, na primeira e segunda temporada, respectivamente.

De maneira geral, a subdose de glyphosate apresenta efeito hormótico na fenologia da cana-de-açúcar cultivada no ciclo de cana-de-ano, aumentando a sua produtividade

5 CONCLUSÕES

Aplicado na subdose de 1,8 g e a ha^{-1} o glyphosate foi absorvido e apresentou atividade em plantas de cana-de-açúcar induzindo ao acúmulo de ácido chiquímico e ácido quínico;

A aplicação da subdose de glyphosate estimulou a absorção e transporte de fósforo na parte aérea durante todo ciclo de cana-de-ano;

As variáveis morfológicas número de perfilhos, comprimento de colmos, número de entrenó, área foliar, massa de matéria seca do colmo, da folha e da parte aérea foram incrementados com aplicação da subdose de glyphosate durante todo ciclo de cana-de-ano;

A subdose da glyphosate proporcionou aumento em algumas variáveis fisiológicas, como máxima fluorescência do fotossistema II (Fv/Fm), índice de área foliar e taxa de crescimento da cultura;

Houve incrementos de brix% caldo, pol% cana e açúcar total recuperável (ATR) com aplicação da subdose de glyphosate;

As produtividades de cana e de açúcar foram incrementadas com a aplicação de subdose de glyphosate.

6 REFERÊNCIAS

ABOAGYE, L. M.; TERAUCHI, T.; MATSUOKA, M. Characterization and preliminary evaluation of factors for early growth in sugarcane (*Saccharum officinarum*). **Ghana Journal Agriculture Science**, Accra, v. 36, n. 1 , p. 121-13, 2003.

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

ALLISON, J. C. S.; PAMMENTER, N. W.; HASLAM, R. J. Why does sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) grow slowly? **South African Journal of Botany**, Amsterdam, v.73, n.4, p.546-551, 2007.

ALMEIDA, J. C. V. et al. Eficiência agronômica de sulfometuronmethil como maturador na cultura da cana-deaçúcar. **STAB**, v. 21, n. 3, p. 36-37, 2003

ALMEIDA, R. S. **Identificação e caracterização de genes de transportadores de fosfato em cana-de-açucar (*Saccharum* spp.)**. 2002. 90p. Dissertação (Mestrado em Ciências/ Fisiologia e Bioquímica de Plantas). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ANDERSON, K. A.; COBB, W. T.; LOPER, B. R. Analytical method for determination of shikimic acid: shikimic acid proportional to glyphosate application rates. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v.32, n.17-18, p.2831-2840, 2001.

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

ARANTES, S. A. C. M. **Retenção e degradação de ^{14}C-glifosato e remobilização dos seus resíduos ligados em diferentes classes de solo**. 2007. 122f. Tese (Doutorado em

Agronomia)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. FUNEP, Jaboticabal, Brasil, 247p, 1989.

BARBOSA, V. F. A. M. Plantio. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDA, C.; **Cana-de-açúcar:** bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas. 2.ed. Viçosa, 2012. p. 51-72.

BARREIRO, A. P et al. Análise de crescimento de plantas de manjericão tratadas com reguladores vegetais. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 4, p. 563-567, 2006.

BATISTA, E. L. S. **Efeito do estresse hídrico sobre o crescimento de cultivares de cana-de-açúcar**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa,Viçosa, 2012.

BELZ, R. G. Is hormesis an underestimated factor in the development of herbicide resistance? In: 26th GERMAN CONFERENCE ON WEED BIOLOGY AN WEED CONTROL, 2014, Braunschweig, Germany. **Julius Kuehn-Archiv**, Quedlinburg v. 443, p. 81-91, 2014.

BELZ, R. G.; CEDERGREEN, N.; SØRENSEN, H. Hormesis in mixtures - can it be predicted? **Science Total Environment**, Amsterdan, v. 404, n. 1, p. 77-87, 2008.

BELZ, R. G.; DUKE, S. O. Herbicides and plant hormesis. **Pest Management Science**, Chichester, v. 70, n. 5, p.698-707, 2014.

BELZ, R.; CEDERGREEN, N.; DUKE, S. O. Herbicide hormesis - can it be useful in crop production? **Weed Research**, Chichester, v. 5, n. 4, 321-332, 2011.

BENETT, C. G. S. et al. Produtividade e desenvolvimento da cana planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p.1661-1668, 2011.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas:** noções básicas. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 41 p.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas**: noções básicas. Jaboticabal : FUNEP, 1988. 42p.

BLANCO, F. M. G. Controle das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar. In: REUNIÃO ITINERANTE DO INSTITUTO BIOLÓGICO, 9, 2003, Catanduva, SP. **Anais...** Catanduva: Instituto Biológico, 2003, p. 91-97.

BONNETT, G. D. Developmental Stages (Phenology). In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (Ed.). **Sugarcane:** physiology, Biochemistry, and Functional Biology**.** Ames: John Wiley & Sons, 2014. p. 35-53.

BONNETT, G. D. Rate of leaf appearance in sugarcane, including a comparison of a range of varieties. **Australian Journal of Plant Physiology**, Victoria, v. 25, n.7, 829–834. 1998.

BONNETT, G. D.; HEWITT, M. L.; GLASSOP, D. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. **Australian Journal of Agricultural Research**, Victoria, v. 57, n. 10, p. 1087–1095, 2006.

BOTT, S. et al. . Phytotoxicity of glyphosate soil residues re-mobilized by phosphate fertilization. **Plant Soil**, Dordrecht, v. 342, n. 1, p. 249-263, 2011.

BRETT, P. G. C. Flowering and pollen fertility in relation to sugar cane breeding in Natal. **Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists**, Brisbane, v. 7, n. 1, p. 43-56, 1951.

BRIGGS, G. E.; KIDD, F. A.; WEST, C. A quantative analysis of plant growth. Annals of **Applied Biology**, Oxford, v.7, p. 202-223, 1920.

BRZESOWSKY, W.J. Factor affecting sugarcane: 1: cane growing. **Agriculture International**, Burnham, v.37, n.7, p.256-260, 1985.

CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. Chemical Hormesis: its historical foundations as a biological hypothesis. **Human and Experimental Toxicology**, London, v. 19, n. 1, p 02-31, 2000.

CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. Hormesis: U-shaped dose responses and their centrality in toxicology. **Trends in Pharmacological Science**, Oxford, v. 22, n. 6, p. 285-291, 2001.

CALABRESE, E. J.; BALDWIN, L. A. Defining Hormesis. **Human and Experimental Toxicology**, London, v. 21, n. 2, p. 91-97, 2002.

CANTARUTTI, R. B. et al. Adubação de pastagens: uma análise crítica. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 1., 2002, Viçosa. **Anais...**Viçosa: SIMFPR, 2002. p.43-84.

CARBONARI, C. A. et al. Alterações metabólicas de cana-de-açúcar após a aplicação de glyphosate como maturador. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 3, 2011. Botucatu. **Anais...**Botucatu-SP: Fepaf, 2011. p101-103.

CARBONARI, C. A. et al. Acúmulo de fósforo em plantas de eucalipto de diferentes doses de glyphosate. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu,SP. **Anais...** Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, 2007b. v. 1. 342 p. p.76-78.

CARBONARI, C.; MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D. Efeitos da aplicação de glyphosate no crescimento inicial de mudas de eucalipto submetidas a dois níveis de adubação fosfatada. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1, 2007a, Botucatu. **Anais...** Botucatu-SP: Fepaf, 2007a. p. 68-70.

CARVALHO, F. P. **Características fisiológicas do cafeeiro após aplicação do Glyphosate**. 2011. 48 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal)-Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2011.

CARVALHO, L. B.; ALVES, P. L. C. A.; DUKE, S. O. Hormesis with glyphosate depends on coffee growth stage. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 85, n. 2, p. 813-821. 2013.

CARVALHO, L. B.; ALVES, P. L. C. Efeitos do glyphosate na fotossíntese do cafeeiro. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE. 2011. Botucatu, SP. **Anais**…Botucatu: FEPAF. 2011. p.86-89.

CASTRO, C.R.P.; VIEIRA, L.E. Aspectos gerais dos reguladores vegetais. In: CASTRO, C.R.P.; VIEIRA, L.E. **Aplicações de reguladores vegetais na agricultura tropical.** Guaíba: Agropecuária, 2001. Cap. 5, p. 25-33.

CASTRO, P. R. C. et al. Ação comparada de ethrel, fuzilade e roundup, em duas épocas de aplicação, na maturação e produtividade da cana-de-açúcar 'SP 70-1143'. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 77, n. 1, p. 23-38, 2002.

CEDERGREEN, N. Is the growth stimulation by low doses of glyphosate sustained over time? **Environmental Pollution**, Kidlington, v. 156, n. 3, p. 1099-1104, 2008.

CEDERGREEN, N.; FELBY, C.; PORTER, J. R.; STREIBIG, J. C. Chemical stress can increase crop yield. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 114, n. 1, p. 57-57, 2009.

CEDERGREEN, N.; OLESEN, C. F. Can glyphosate stimulate photosynthesis? **Pesticide Biochemistry and Physiology**, Maryland Heights, v. 96, n. 3, p. 140-148, 2010.

CEDERGREEN, N.; STREIBIG, J. C.; KUDSK, P., MATHIASSEN, S. K.; DUKE, S. O. The occurrence of hormesis in plants and algae. **Dose-Response**, Amherst, v. 5, n. 2, p. 150-162, 2007.

CHAPMAN, P.M. The implications of hormesis to ecotoxicology and ecological risk assessment. **Human & Experimental Toxicology**, London, v. 20, n. 10, p. 499-505, 2001.

CHONG, B. F.; MILLS, E., BONNETT, G. D.; GNANASAMBANDAM, A. Early exposure to ethylene modifies shoot development and increases the sucrose accumulation rate in sugarcane. **Journal of Plant Growth Regulation**, New York, v. 29, n. 2, p.149-163, 2010.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: segundo Levantamento - ago. 2014. Brasília, DF: **Conab**, v.1, 2013,18p.

CRISTOFOLETTI JUNIOR, S. C. **Fisiologia da emergência e perfilhamento em mini-toletes de variedades de cana-de-açúcar.** 2012. 92f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

DEUBER, R. Maturação da cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil: In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4., 1988, Piracicaba. **Anais...** p. 33-40.

DIOLA, V.; SANTOS, F. Fisiologia. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDA, C.; **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas**. 2.ed. Viçosa. 2012. p. 25-49.

DONALDSON, R. A. **Season effects on the potential biomass and sucrose accumulation of some commercial cultivars of sugarcane**. 2009. 173 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Crop Science)-Faculty of Science and Agriculture, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg, 2009.

DUARTE, A. M. A. **Crescimento e Maturação da cana-de-açúcar sob condições de cultivo irrigado, em Janaúba-MG**. 2009. 38 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal no Semiárido)-Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, 2009.

DUKE, S.O. Glyphosate. In: Kearney, P. C., Kaufman, D. D, **Herbicides: Chemistry, Degradation, and Mode of Action**. New York: Dekker, p. 31-70, 1988.

DUKE, S. O. et al. Hormesis: Is it an important factor in Herbicide use and Allelopathy? **Outlooks on Pest Management**, Burnham, v. 17, n. 1, 2006, p. 29-33.

EL-SHAHAWY, T. A.; SHARARA , F. A. A. Hormesis influence of glyphosate in between increasing growth, yield and controlling weeds in Faba Bean. **Journal of American Science**, Lansing, v. 07, n. 02, p. 139-144, 2011.

ESPIRONELO, A. et al. Efeitos da adubação NPK nos teores de macronutrientes das folhas de cana-de-açúcar (cana-soca). **Bragantia**, Campinas, v.45, n.2, p.377-382, 1986.
FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**. Production 2012. <http://faostat.fao.org/>. Acesso em: setembro, 2014.

FERRARI, T. B. et al. Efeito de reguladores vegetais nos índices da análise de crescimento de plântulas de maracujazeiro-doce (*Passiflora alata* Curtis). **Biotemas**, Florianópolis, v. 21, n. 3, p. 45-51, 2008.

FITZGIBBON , J.; BRAYMER, H. D. Phosphate starvation induces uptake of glyphosate by *Pseudomonas* sp. strain PG2982. **Applied Environmental Microbioly**, New York, v. 54, n.7, p. 1886–1888, 1988.

FRANZ, J.E. et al. Glyphosate: A Unique Global Herbicide. ACS Monograph 189; **American Chemical Society**: Washington, DC, 653 p., 1997.

GAVA, G. J. C. at al. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 11, p. 1347-1354, 2001.

GEIGER, D. R.; KAPITAN, S. W.; TUCCI, M. A. Glyphosate inhibits photosynthesis and allocation of carbon to starch in sugar beet leaves. **Plant Physiology**, Madison, v. 2, p.468-472, 1986.

JIFON, J. L.; SYVERTSEN, J. P.; WHALEY, E. Growth environment and leaf anatomy affect nondestructive estimates of chlorophyll and nitrogen in Citrus sp. leaves. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 130, n. 2, p. 152-158, 2005.

GODOY, M. C. **Efeitos do glyphosate sobre o crescimento e absorção de fósforo pela soja**. 2007, 53p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura)-Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. 2007.

GOMES, G. L. G. C. **Alterações metabólicas de plantas de milho submetidas à aplicação de glyphosate e fosfito**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas)-Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2011.

GOMES, G. L. G. C. et al. Association effects of glyphosate and phosphite in maize plants. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v.12, n.1, p.78-86, 2013.

GONZAGA, G. B. M. **Avaliação do crescimento inicial da cana-de-açúcar, variedade RB 867515, sob efeito de bactérias endofíticas**. 2012. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal)–Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2012.

GRANZ, D. A. Water, Transpiration, and Gas Exchange. In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (Ed.). **Sugarcane:** physiology, Biochemistry, and Functional Biology. Ames: John Wiley & Sons, 2014. p. 221-254.

GRAVENA, R. **Respostas bioquímicas e fisiológicas de plantas de citros atingidas pelo glyphosate.** 2006. 144 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

HERMANN, E. R.; CÂMARA, G. M. S. Um método simples para estimar a área foliar da cana-de-açúcar. **STAB**: açúcar, álcool e subprodutos**,** Piracicaba, v.17, n.5, p.32-34, 1999.

HOAGLAND, R. E. Effects of glyphosate on metabolism of phenolic compounds: VI. Effects of glyphosine and glyphosate metabolites on phenylalanine ammonia-lyase activity, growth, and protein, chlorophyll, and anthocyanin levels in soybean (Glycine max) seedlings. **Weed Science**, Lawrence, v. 28, p. 393-400, 1980.

JADOSKI, C. J et al.. Fisiologia do desenvolvimento do estádio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 3, n. 2, p. 169-176, 2010.

JAMES, G. **Sugarcane.** Oxford: Blackwell Science. World Agriculture Series: 216p. 2004.

KAPPES, C. et al. Resposta da crotalária à épocas e subdoses de aplicação de glifosato. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 373-383, 2012.

KETEL, D. H. Effect of low doses of metamitron and glyphosate on growth and chlorophyll content of Common Lambsquarters (Chenopodium album). **Weed Science**, Lawrence, v. 44, n. 1, p. 1 - 6, 1996.

KOGER, C. H et al. Rice (*Oryza sativa*) response to drift rates of glyphosate. **Pest Management Science**, Chichester, v. 61, n. 12, p.1161-1167, 2005.

KOVALCHUK, I. et al. Reactive oxygen species stimulate homologous recombination in plants. **Plant, Cell and Environment**, Chichester, v. 26, n. 9, p. 1531-1939, 2003.

KOVALCHUK, I.; FILKOWSKI, J.; SMITH, K.; KOVALCHUK, O. Reactive oxygen species stimulate homologous recombination in plants. **Plant, Cell Environment**, Chichester, v. 26, n. 09, p. 1531-1939, 2003.

LANDELL, M.G.A.; SILVA, M.A. As estratégias de seleção da cana em desenvolvimento no Brasil. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v.1, p.18-23, 2004.

LATORRE, D. O et al. Efeitos da interação de glyphosate e fósforo sobre a cultura do milho. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 2010, Ribeirão Preto. **Anais...**Ribeirão Preto, p. 1517-1521, 2010.

LEITE, G.H.P. **Maturação induzida, alterações fisiológicas, produtividade e qualidade tecnológica da cana-deaçúcar (Saccharum officinarum L.)**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Faculdade de Ciências Agronômicas, Uiversidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2005.

LINGLE, S. Sugar metabolism during growth and development in sugarcane internodes. **Crop Science**, Madison, v. 39, n. 2, p. 480-486, 1999.

MACHADO, A. F. L. et al. Photosynthetic efficiency and water use in eucalyptus plants sprayed with glyphosate. **Planta Daninha**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 319-327, 2010.

MAGALHÃES, A. C. N. **Análise quantitativa do crescimento**. In: FERRI, M. G. Fisiologia Vegetal. 2. ed. São Paulo: Editoras EPU; EDUSP, v. 1, p. 331-350, 1985.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2.ed. Piracicaba: Potafós, 1997. 319p.

MALIK, J., BARRY, G., KISHORE, G. The herbicide glyphosate. **Biofactores**, v. 2, p. 7-25, 1989.

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 29p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 168).

MARQUES, T. A. et al. Glifosato como maturador durante a safra canavieira. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.4, n. 3, p. 83-94, 2011.

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

MENK, J. R. F.; COELHO, R. M. **Levantamento detalhado de solos da Estação Experimental de Agronomia de Jaú (SP).** Campinas: Instituto Agronômico, 2000, 36p. (Série Pesquisa APTA. Boletim Científico 04).

MESCHEDE, D. K. **Efeito do glyphosate e sulfumeturon-methyl na fisiologia da cana-de-açúcar**. 2009. 76 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2009.

MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D. Acúmulo de ácido chiquímico em cana-de-açúcar sob sub-doses de glyphosate. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 2010, Ribeirão Preto. **Anais...**Ribeirão Preto, p. 2961-2965.

MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D.; CARBONARI, C. A. Efeitos do glyphosate e sulfometuron-methyl no crescimento e na qualidade tecnológica da cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, Jaboticabal, v.28, n. especial, p.1135-1141, 2010.

MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D.; CARBONARI, C. A. Baixas doses de glyphosate e seus efeitos no crescimento de *Commelina benghalensis*. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Maringá, v.7, n.2, p.53-58, 2008.

MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D.; CARBONARI, C. A. Teores de clorofilas e carotenóides na cana-de-açúcar submetida à aplicação de maturadores. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, 2007. p. 296-298.

MESCHEDE, D. K. et al. Efeitos do glyphosate nos teores de lignina, celulose e fibra em *Brachiaria decumbens*. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Jaboticabal, v. 10, n. 1, p. 57-63, 2011a.

MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D.; CARBONARI, C. A.; SILVA, J. R. M. Alteração fisiológica da cana-de-açúcar pela aplicação de glyphosate e sulfumeturon-methyl. **Planta Daninha**, v. 29, n. 2, p. 413-419, 2011b.

MONQUERO, P. A. et al. Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. **Planta Daninha**, Jaboticabal, v. 22, n. 3, p. 445-451, 2004.

MOORE, P. H.; PATERSON, A. H.; TEW, T. Sugarcane: The Crop, the Plant, and Domestication. In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (Ed.). **Sugarcane:** physiology, Biochemistry, and Functional Biology**.** Ames: John Wiley & Sons, 2014. p.01-07.

MORRÉ, D. J. Chemical hormesis in cell growth: A molecular target at the cell surface. **Journal of Applied Toxicology**, Bognor Regis, v. 20, n. 2, p. 157-163, 2000.

MOURA FILHO, G. et al. Determinação de teores ótimos de nutrientes em cana-de-açúcar na destilaria Japungu, PB, usando o método da chance matemática (Chm). In. REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29, 2010, Guarapari, **Anais...**CD-ROM 2010. Guarapari: SBCS, 2010.

NELSON, A.; RENNER, K.A.; HAMMERSCHMIDT, R. Effects of protoporphyrinogen oxidase inhibitors on soybean (*Glycine max L.*) response, *Sclerotinia sclerotiorum* disease development, and phytoalexin production by soybean. **Weed Technology,** Bellevue, v. 16, n. 2, p. 353-359, 2002.

NETTO, J. M. Maturadores e reguladores vegetais na cultura da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S.V. PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. de (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar.** Piracicaba: CP 2, 2006. p. 307-318.

NEVES, D. C.; FURLANI JÚNIOR, E.; VALTER FILHO, V. V. Hormese no crescimento do algodoeiro por subdoses de glifosato. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 7, 2009, Foz do Iguaçu, **Anais...** CD-ROM 2009. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2009. p. 915-922.

OLIVEIRA, R. A. et al. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar,em cana-planta, no estado do Paraná. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.5, n.1-2, p.87-94, 2004.

OLIVEIRA, R. S.; BACARIN, M. A. **Absorção e translocação de herbicidas**. 2011. Disponível em http://www.dag.uem.br/napd/up/public_577335_758jIMKaDgm1.pdf. Acessado em 12 de maio de 2014.

OLIVEIRA, R. A. et al. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no estado do Paraná: taxas de crescimento. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 6, n. 1-2, p. 85-89, 2005.

ORCARAY, L. et al. The possible role of quinate in themode of action of glyphosate and acetolactate synthase inhibitors. **Pest Management Science**, Chichester, v. 66, n. 3, p. 262-269, 2010.

ORTIZ-MOREA, F. A. et al. Global analysis of the sugarcane microtranscriptome reveals a unique composition of small RNAs associated with axillary bud outgrowth. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 64, n. 8, p. 2307-2320, 2013.

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

PLANALSUCAR. **Cultura da Cana-de-açúcar**: manual de orientação. Piracicaba: IAA, Coordenadoria Regional Sul, 1986. 56 p.

PORRA, R. J.; THOMPSON, W. A.; KRIEDEMANN, P. E. Determination of accurate extinction coefficients and simultaneous equations for assaying chlorophylls a and b

extracted with four different solvents: verification of the concentration of chlorophyll standards by atomic absorption spectroscopy. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA)**, Amsterdam, v. 975, n. 3, p. 384-394, 1989.

PORTES, T. A.; CASTRO JÚNIOR, L. G. Análise de crescimento de plantas: um programa computacional auxiliar. **Revista Brasileira de Fisiologia**, Lavras,v.3, 53-60, 1991.

PULVER, E. L; RIES, S. K. Action of simazine in increasing plant protein content. **Weed Science,** Ithaca, v. 21, n. 2, p. 233-237, 1973.

RABELLO, W. S. **Absorção de nutrientes minerais em feijoeiro comum em resposta a subdoses de glyphosate**. 76 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense "Darcy Ribeiro", Centro de Ciências e Tecnologias Aagropecuárias. Campos dos Goytacazes, R.J., 2010.

RABELLO, W. S et al. Growth and phosphorus absorption by common bean 'Xodó' genotype under effect of glyphosate reduced rates. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Jaboticabal, v. 11, n. 2, p. 204-212, 2012.

RADFORD, P. J. Growth analysis formulae. Their use and abuse. **Crop Science**,Madison, v. 7, n. 3, p. 171-175, 1967.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. . **Boletim Técnico Instituto Agronômico**. IAC, Campinas, IAC, v. 81, 31p., 1983.

RAMESH, P. Effect of different levels of drought during the formative phase on growth parameters and its relationship with dry matter accumulation in sugarcane. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 185, n. 2, p. 83-89, 2000.

REDDY, K.N. et al. Aminomethylphosphonic Acid Accumulation in Plant Species Treated with Glyphosate. Journal of Agricultural and Food Chemistry, Washington, DC, v. 56, p. 2125-2130, 2008.

REDDY, K.N., RIMANDO, A.M., DUKE, S.O. Aminomethylphosphonic acid, a metabolite of glyphosate, causes injury in glyphosate-treated, glyphosateresistant soybean. Journal of Agricultural and Food Chemistry , Washington, DC v. 52, p. 5139-5143, 2004.

REIS, G. G.; MULLER, M. W. **Análise de crescimento de plantas e mensuração do crescimento**. Belém: CPATU, 1979, 35p.

REIS JÚNIOR, R. A. MONNERAT, P. H. Diagnose nutricional da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 367-372, 2002.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. (Ed.). **Biomassa de cana-de-açúcar:** colheita, energia e ambiente. 2. ed. Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2009. 333 p.

RITCHIE, J. T.; KINIRY, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T. Model inputs. In: JONES, C. A.; KINIRY, J. R. (Ed.). **CERES-Maize:** a simulation model of maize growth and development. College Station: Texas A&M University Press. 1986. p.37-48.

RODRIGUES, J. D. Absorção e transporte de solutos nas plantas. In: VELINI, E. D. et al. **Glyphosate**. Botucatu: Fepaf, 2009. 493 p.

SANTOS, D. H. et al. Produtividade de cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 4, p.454-461, 2010.

SANTOS, V. R et al. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 389–396, 2009.

SCARPARI, M. S. **Modelos para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de parâmetros climáticos**. 2002. 75 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Fitotecnia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SCHOLES, J. D.; HORTON, P. Photosynthesis and chlorophyll fluorescence: simultaneous measurements. In: HENDRY, G. A. F.; GRIME, J. P. (Ed.). **Methods in comparative plant ecology:** a laboratory manual. London: Chapman & Hall, 1993. p. 130-135.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MAZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (eds.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p.19-36.

SHARMA, N. **Studies on effect of glyphosate on biochemical attributes of tea [*Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze]**. 2013. 121 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Basic Sciences / Biochemistry)-Chaudhary Sarwan Kumar Himachal Pradesh Krishi Vishvavidyalaya, Palanpur, 2013.

SHIH, S.F.; GASCHO, G.J. Relationships among stalk length, leaf area, and dry biomass of sugarcane. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, n. 2, p. 309-313, 1980.

SILVA J. C.; ARF, O.; GERLACH, G. A. X.; KURYIAMA, C. S.; RODRIGUES, R. A. F. Efeito hormese de glyphosate em feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia,v. 42, n. 3, p. 295-302, 2012b.

SILVA, D. K. T. et al. Análise de crescimento em cultivares de cana-de-açúcar em cana-soca no noroeste do Paraná na safra de 2002/2003. **Scientia Agraria**, Curitiba, v. 6, n. 1-2, p. 47-53, 2005.

SILVA, D. M. E. **Influência dos sistemas de exploração agrícola convencional e orgânico em cana-de-açúcar.** 2007. 75 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Fitotecnia)-Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

SILVA, F. M. L. **Hormesis de herbicidas em soja**. 2014. 77f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)-Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2014.

SILVA, M. A. et al. Hormetic effect of glyphosate on the initial development of sugarcane. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 973-978, 2009.

SILVA, M. A.; CARLIN S. D.; CAPUTO M. M. Tipos de colheita e épocas de aplicação de glifosate na erradicação de soqueiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 1, p. 43-49, 2006.

SILVA, R. A. S.; MATSUMOTO, S. N.; OLIVEIRA, L. S.; OLIVEIRA, M. N. Development of beggar-ticks (Bidens pilosa) in response to the application of low doses of glyphosate. **Applied Research & Agrotecnology**, v. 7, n. 1, p.63-69, 2014.

SILVA, R. A.; MATSUMOTO, S. N.; BARBOSA, G. M.; COSTA, R. Q.; OLIVEIRA, M. N. Aplicação de subdoses de glyphosate na fase de estabelecimento da cultura da soja e do milho. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.8, n.15, p.140-149, 2012a.

SINGELS, A.; INMAN-BAMBER, N. G. Modelling genetic and environmental control of biomass partitioning at plant and phytomer level of sugarcane grown in controlled environments. **Crop and Pasture Science**, Victoria, v. 62, n. 1, p. 66–81, 2011.

SINGH, P. S. et al. Ratooning induced rhizospheric changes impede nutrient acquisition and growth in sugarcane ratoon crop during grand growth stage in sub-tropic. **Sugar Tech**, Gandharva Mahavidyalaya, v. 15 n. 1, p. 52–64, 2013.

SMIT, M. A.; SINGELS, A. The response of sugarcane canopy development to water stress. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 98, n. 2-3, p. 91-97, 2006.

SIQUEIRA, G. F. **Eficácia da mistura de glifosato a outros maturadores na cana-de-açúcar**. 2009. 88 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista. 2009.

SOUSA**,** S. F. G. **Avaliação da cultura do milho e da decomposição da palhada submetida à Hormesis**. 2013. 61 f. Dissertação (Mestradoem Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2013.

SOUTHAM, C.M.; EHRLICH, J. Effects of extracts of western red-cedar heartwood on certain wood-decaying fungi in culture. **Phytopathology**, St. Paul, v. 33, p. 517–524, 1943.

SURENDAR, K. et al. Physiology of Pgr's and nitrogen on crop growth rate, net assimilation rate, nitrate reductase activity and indole acetic acid oxidase activity of Black Gram (*Vigna Mungo* L.). **Genomics and Applied Biology**, British Columbia, v. 4, n. 3, p. 15-2, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TAVARES, A. C. S. **Sensibilidade da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*.) ao excesso de água no solo**. 220 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2009.

TOMAZ, H. V. Q. **Fontes, doses e formas de aplicação de fósforo na cana-de-açúcar**. 93f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2009.

TORRES, L. G. et al. Alterações nas características fisiológicas de cultivares de cana-de-açúcar submetida à aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 581-587, 2012.

TUFFI SANTOS, L.D et al. Crescimento e morfoanatomia foliar de eucalipto sob efeito de deriva do glyphosate. **Planta Daninha**, Jaboticabal, v. 23, n. 1, p. 133-142, 2005.

Van DILLEWIJN, C. **Botany of Sugarcane**. The Chronica Botanica Co, Waltham, 1952. 371p.

VELINI, E. D. et al. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, NewYork, v. 64, n. 4, p. 489-496, 2008.

VELINI, E. D. et al. Modo de ação do glyphosate. In: VELINI, E.D.; CARBONARI, C. A.; MESCHEDE, D.; TRINDADE, M. L. B. (Org.). **Glyphosate**: uso sustentável. 1.ed. Botucatu: Fepaf, 2012. p.39-66.

VELINI, E. D. et al. Modo de ação do glyphosate. In: **Glyphosate**. Botucatu: Fepaf, 2009. p. 113-133.

VIANA, R. **Efeitos de maturadores químicos aplicados em início de safra na produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar**. 2011. 75 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

VIANA, R. S. et al. Maturadores químicos na cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) aplicados em final de safra. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, Macapá, v. 7, n. 2, p. 100-107, 2007.

VIANNA, M. S. **Risco climático para a cultura da cana-de-açúcar e estratégias de manejo de irrigação complementar para a sua minimização em diferentes regiões brasileiras**. 2014. 177 f. Dissertação (Mestrado em Ciências/Engenharia de Sistemas Agrícolas)–Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2014.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, London, v. 11, p. 41-76, 1947.

WATSON, D. J. The physiological basis on variation in yield. **Advances in Agronom**y, v. 4, p. 101-145, 1952.

WIEDMAN, S. J.; APPLEBY, A. P. Plant growth stimulation by sublethal concentrations of herbicides. **Weed Research,** Oxford, v. 12, n. 1, p. 65-74, 1972.

YAMADA, T.; CASTRO, P. R. C. Efeitos do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. **International Plant Nutrition Institute**. Piracicaba: Informações Agronômicas, 2007. 24p. (Boletim Técnico).

YAMADA, T; CASTRO, P. R. C. Glifosato, herbicida com singular modo de ação: efeitos secundários e implicações fisiológicas e agronômicas. In: SIMPÓSIO SISTEMA AGRÍCOLA SUSTENTÁVEL COM COLHEITA ECONÔMICA MÁXIMA. Brasil, 2004. **Anais...** São Pedro: Potafos, 2004.

YANNICCARI, M. et al. Glyphosate resistance in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) from Argentina. **Crop Protection**, Amsterdam, v.32, n. 1, p. 12-16, 2012.

YOSHIDA, S. Biosynthesis and conversion of aromatic amino acids in plants. **Annual Review Plant Physiology**, Palo Alto, v. 20, p. 41-62, 1969.

APÊNDICE



(A) **(B)**

Apêndice 1. Área experimental aos 105 DAP durante o ciclo de cana-planta da cultivar SP80-1842 após tratamento sem aplicação (**A**) e com aplicação (**B**) de subdose de glyphosate.