



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



RICARDO DE LIMA VASCONCELOS

**MODELAGEM *FUZZY* DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR
IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO
E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA**

**Botucatu
2019**

RICARDO DE LIMA VASCONCELOS

**MODELAGEM *FUZZY* DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR
IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO
E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrônomicas – Unesp, Câmpus de Botucatu, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Prof. Dr. Luis Roberto Almeida Gabriel Filho
Coorientadora: Prof. Dra. Camila Pires Cremasco Gabriel

**Botucatu
2019**

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

V331m	Vasconcelos, Ricardo de Lima, 1980- Modelagem fuzzy da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada / Ricardo de Lima Vasconcelos. - Botucatu: [s.n.], 2019 136 p.: fots. color., grafs. color., ils., tabs. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2019 Orientador: Luis Roberto Almeida Gabriel Filho Coorientadora: Camila Pires Cremasco Gabriel Inclui bibliografia 1. Cana-de-açúcar - Adubos e fertilizantes. 2. Adubação fosfatada. 3. Irrigação agrícola. 4. Redes neurais (Computação). 5. Algoritmos difusos. I. Gabriel Filho, Luis Roberto Almeida. II. Gabriel, Camila Pires Cremasco. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.
-------	--

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

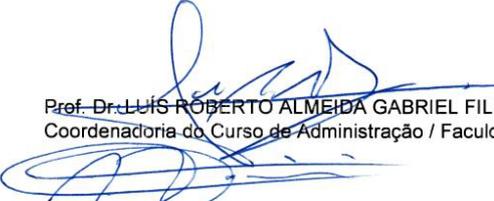
Título: **“MODELAGEM FUZZY DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA”**

AUTOR: RICARDO DE LIMA VASCONCELOS

ORIENTADOR: LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

COORIENTADORA: CAMILA PIRES CREMASCO GABRIEL

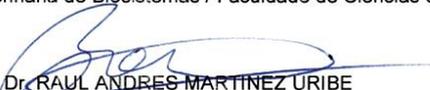
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO

Coordenador do Curso de Administração / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP


Prof. Dr. ALFREDO BONINI NETO

Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia


Prof. Dr. RAUL ANDRES MARTINEZ URIBE

Coordenador do Curso de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP


Prof. Dr. GLAUBER JOSÉ DE CASTRO GAVA

APTA - Regional Centro Oeste / SAA/SP


Prof. Dr. DANIEL DOS SANTOS VIAIS NETO

/ Faculdade de Tecnologia de Presidente Prudente

Botucatu, 29 de janeiro de 2019.

A Deus.
Ofereço.

Aos meus pais, Sônia Maria Delfina de Lima e Ivan Alves Vasconcelos
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia – Irrigação e Drenagem, pela oportunidade de ingressar no curso de Doutorado;

A CAPES pelo apoio financeiro durante a condução do curso;

Aos Professores Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho e Dra. Camila Pires Cremasco Gabriel, pela orientação e perseverança;

Aos professores que ministraram aulas durante o curso de Doutorado (Antônio de Pádua Sousa, Célia Regina Lopes Zimback, Fernando Broetto, Hélio Grassi Filho, João Carlos Cury Saad, João Eduardo M. Perea Martins, João Luís Zocoler, José Abramo Marchese, Luís Henrique Bassoi, Priscila Lupino Gratão, Rodrigo Lilla Manzione, Rogério Teixeira de Faria); Aos professores membros da banca de qualificação (Enzo Dal Pai, João Carlos Cury Saad e Leonardo de Barros Pinto), e da defesa (Luís Roberto Almeida Gabriel Filho, Raúl Andres Martinez Uribe, Glauber José de Castro Gava, Daniel dos Santos Viais Neto, Alfredo Bonini Neto, Anice Garcia e Silvelena Vanzolini Segato) pela valiosa colaboração contida em suas sugestões e seus questionamentos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural, Seção de Pós-Graduação e Seção de Biblioteca pelo auxílio nas diversas etapas do trabalho.

Aos amigos de graduação e de pós-graduação (FCAV e FCA) que me apoiaram em muitos momentos difíceis, tornando possível a realização deste sonho.

Em especial a Lídia Galdiano, Lucimara Antônio Borges, Zezinha e família, Fernanda Rego Freitas, Jaime Forti Benassi e a Prof. Dra. Maria Cristina Thomaz que me apoiaram na realização do sonho de concluir o mestrado, dando condições para alçar voos no doutorado, que aqui, cito com carinho, o apoio dado por Luís Gomes, Rafael Lima, Jéssica Ferrari, Maurício Prado, Jhonathan Piazzentin e Júnior Flausino.

Muito obrigado a todo(as)!!

Nos momentos em que me fazia companhia, recorria a alegria e a ensinamentos de vida, assistindo *Animes* e *RuPaul's Drag Race*.

“Mas de todas as coisas que podem dar lucro a um homem, não há nada melhor do que a agricultura, nada mais produtivo, mais doce, nada que melhor convenha a um homem livre”.

(Cícero, 44 a. C).

RESUMO

A produtividade da cana-de-açúcar é relacionada a vários fatores, dentre eles o manejo nutricional, especialmente do fósforo (P) e um adequado fornecimento de água. A zona tropical apresenta grande irregularidade nas precipitações pluviométricas, tornando recorrente o uso da irrigação de salvamento, que proporciona umidade do solo para rebrota de cana-soca ou brotação de cana-planta. A dinâmica do P no solo é complexa, e associada a prática de irrigação de salvamento que, potencializa os efeitos do nutriente na planta, gera relações e interações dentro do sistema água-solo-planta-atmosfera. O que requer o uso de modelos estatísticos (análise multivariada) e computacionais (modelagem *fuzzy*), quando há um grande volume de dados ou interações complexas, pois, estes são capazes de indicar as melhores opções de manejo a serem utilizados. O objetivo deste trabalho foi realizar a modelagem *fuzzy* da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. O experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média, no município de Itajobi-SP. O arranjo experimental foi em blocos ao acaso, em triplicata, no esquema $3 \times 4 \times 2$, com fontes de P (superfosfato triplo, fosfato natural reativo Bayóvar e fosfato natural de Araxá), doses (0, 90, 180 e 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅), na presença e ausência da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹, base seca). Em todos os tratamentos, foi aplicado 80 mm de água em lâmina única, na forma de irrigação de salvamento em área total. A produtividade da água para produção de colmos e açúcar foi significativa na presença da torta de filtro combinada com fontes de P e na associação de torta de filtro e doses de P, respectivamente, em particular, reforçando o potencial da torta de filtro tanto como fonte adicional de P, quanto material eficiente em reter água (irrigação de salvamento). A aplicação de doses de P mostrou-se diretamente proporcional às respostas de todas variáveis, com exceção da variável fosfatase ácida foliar, que apresentou comportamento inversamente proporcional. A variável industrial tonelada de Pol ha⁻¹ (TPH) apresentou alta correlação positiva, podendo ser atribuída as correlações positivas de sacarose e principalmente de produção de colmos, no entanto o açúcar total recuperável (ATR) apresentou alta correlação negativa, podendo-se inferir que houve efeito negativo da combinação de temperatura inadequada e do excesso de precipitação na fase de maturação.

Palavras-chave: Modelo linguístico Mamdani. Superfosfato triplo. Análise de componentes principais. Irrigação de salvamento.

ABSTRACT

Sugarcane productivity is related to several factors, including nutritional management, especially phosphorus (P) and adequate water supply. Tropical zone shows a great rainfall irregularity, making recurrent the use of water saving irrigation, which provides soil moisture for regrowth of sugarcane ratoon or cane-plant sprouting. P dynamics in soil is complex, and it is associated with water saving irrigation practices, which potentiates the nutrient effects in the plant, generating relationships and interactions within the water-soil-plant-atmosphere system. Multivariate analysis (main components) and computational (*fuzzy* modeling) are able to indicate individual importance and variable correlation within the agricultural production system when there is a large volume of data or complex interactions, as these are able to indicate the best management options to be used. Our aim was to perform *fuzzy* modeling of the yield from irrigated sugarcane as a function of filter cake application and phosphate fertilization. The experiment was settled in a Red-Yellow Latosol Dystrophic, medium texture, in Itajobi-SP, Brazil. The experimental arrangement was in randomized blocks with three replications, in a $3 \times 4 \times 2$ factorial scheme with three sources of phosphorus (triple superphosphate, Bayóvar natural reactive phosphate and Araxá natural phosphate), doses (0, 90, 180 and 360 kg ha⁻¹ of P₂O₅), in the presence and absence of the filter cake (7.5 Mg ha⁻¹, dry basis). Water saving irrigation was applied in a single lamina of 80 mm of water in the total area. Crop water productivity for stalks and sugar production was significant in the filter cake presence combined with P sources and in the association of filter cake and P doses, respectively, in particular, reinforcing the potential of the filter cake both as a source as well as efficient material in retaining water (water saving irrigation). P doses were directly proportional to the responses of all variables, except for foliar acid phosphatase, which presented an inversely proportional behavior. The industrial variable ton of Pol ha⁻¹ (TPH) presented a high positive correlation being attributed a positive correlation of sucrose and mainly of stalk production, however the total recoverable sugar (ATR) presented a high negative correlation, and it can be inferred that there was a negative effect of the combination of inadequate temperature and excess precipitation in the maturation phase.

Keywords: Linguistic model Mamdani. Triple superphosphate. Principal components. Water saving irrigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Sistema <i>fuzzy</i> genérico, com <i>fuzzificador</i> , motor de inferência e <i>defuzzificador</i>	35
Figura 2 -	Foto da área do experimento com a cana-planta variedade RB86 7515 aos 120 dias após o plantio. Itajobi-SP (2011).....	41
Figura 3 -	Balanço Hídrico Normal (a) e Balanço Hídrico Sequencial (b) do município de Itajobi-SP (junho de 2011 a junho de 2012).....	42
Figura 4 -	Sistema baseado em regras <i>fuzzy</i> (SBRF) da cana-de-açúcar com variável de entrada (doses de P), sete variáveis de saída (fertilidade do solo, nutricional e bioquímica da planta e produtividade).....	46
Figura 5 -	Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> das variáveis de saída do Modelo 1 (SFT).....	50
Figura 6 -	Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> das variáveis de saída do Modelo 2 (FNB).....	51
Figura 7 -	Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> das variáveis de saída do Modelo 3 (FNA).....	52
Figura 8 -	Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> das variáveis de saída do Modelo 4 (SFT+).....	53
Figura 9 -	Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> das variáveis de saída do Modelo 5 (FNB+).....	54
Figura 10 -	Funções de pertinência dos conjuntos <i>fuzzy</i> das variáveis de saída do Modelo 6 (FNA+).....	55
Figura 11 -	Comportamento de P resina em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, cultivado com cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo - SFT+; fosfato natural Bayóvar - FNB+; fosfato natural de Araxá – FNA+). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).....	62
Figura 12 -	Comportamento de P foliar em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo - SFT+; fosfato natural Bayóvar - FNB+; fosfato natural de Araxá – FNA+). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).....	65
Figura 13 -	Comportamento do acúmulo de P foliar em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo - SFT+; fosfato natural Bayóvar - FNB+; fosfato natural de Araxá – FNA+). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).....	67

Figura 14 -	Comportamento do acúmulo de P nos colmos em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo - SFT ⁺ ; fosfato natural Bayóvar - FNB ⁺ ; fosfato natural de Araxá - FNA ⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).....	69
Figura 15 -	Comportamento do acúmulo de P total em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo - SFT ⁺ ; fosfato natural Bayóvar - FNB ⁺ ; fosfato natural de Araxá – FNA ⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).....	71
Figura 16 -	Comportamento da fosfatase ácida foliar em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo - SFT ⁺ ; fosfato natural Bayóvar - FNB ⁺ ; fosfato natural de Araxá – FNA ⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).....	73
Figura 17 -	Comportamento da produção de colmos de cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo - SFT ⁺ ; fosfato natural Bayóvar - FNB ⁺ ; fosfato natural de Araxá – FNA ⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).....	75
Figura 18 -	Foto da área do experimento com a cana-planta variedade RB86 7515 aos 120 dias após o plantio. Itajobi-SP (2011).....	89
Figura 19 -	Balanço Hídrico Normal (a) e Balanço Hídrico Sequencial (b) do município de Itajobi-SP (junho de 2011 a junho de 2012).....	90
Figura 20 -	Dendrograma das inter-relações da produção de colmos (Mg ha ⁻¹), sacarose (%), ATR (Kg ha ⁻¹), fibra (%) e TPH (Mg ha ⁻¹).....	95
Figura 21 -	Contribuição de cada variável para explicação da variância total (<i>scree plot</i>) da qualidade industrial da cana-de-açúcar sob doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro).....	99
Figura 22 -	Dispersão (<i>bi plot</i>) dos componentes principais CP1 e CP2 contendo as variáveis (qualidade industrial) da cana-de-açúcar sob doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro)....	100
Figura 23 -	Foto da área do experimento com a cana-planta variedade RB86 7515 aos 120 dias após o plantio. Itajobi-SP (2011).....	110
Figura 24 -	Balanço Hídrico Normal (a) e Balanço Hídrico Sequencial (b) do município de Itajobi-SP (junho de 2011 a junho de 2012).....	111

Figura 25 -	Dendrograma do estado nutricional de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.....	114
Figura 26 -	Contribuição de cada variável para explicação da variância total (<i>scree plot</i>) do estado nutricional da cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e de adubação fosfatada.....	116
Figura 27 -	Contribuição de cargas fatoriais para o estado nutricional de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação da torta de filtro e da adubação fosfatada.....	117
Figura 28 -	Dendrograma das inter-relações da biometria de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.....	119
Figura 29 -	Contribuição de cada variável para explicação da variância total (<i>scree plot</i>) da biometria da cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.....	121
Figura 30 -	Dispersão (<i>bi plot</i>) dos componentes principais CP1 e CP2 da biometria de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Análises química e granulométrica do solo da área experimental. Fazenda Santo Antonio, Itajobi - SP (2011).....	43
Tabela 2 -	Funções pertinentes da variável de entrada doses de P.....	47
Tabela 3 -	Delimitadores de todas funções de pertinência dos 6 modelos (SFT, FNB, FNA, SFT ⁺ , FNB ⁺ e FNA ⁺).....	49
Tabela 4 -	Combinação da variável de entrada doses de P com os pontos de grau de pertinência 1 associados ao conjunto <i>fuzzy</i> para sistema de bases de regras <i>fuzzy</i> (SBRF).....	56
Tabela 5 -	Produtividade da água (PA_c) de colmos de cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento e adubação fosfatada.....	57
Tabela 6 -	Representação da base de regras do sistema <i>fuzzy</i> , com conjuntos fuzzy D_i das variáveis de entrada e conjuntos fuzzy C_i das variáveis de saída.....	60
Tabela 7 -	Análises química e granulométrica do solo da área experimental. Fazenda Santo Antonio, Itajobi - SP (2011).....	91
Tabela 8 -	Produtividade da água (PA_c) de TPH (Pol ha^{-1}) de cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento e adubação fosfatada.....	93
Tabela 9 -	Componentes principais (CP1 e CP2) e análise fatorial das variáveis industriais da cana-de-açúcar sob doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro) sob irrigação de salvamento.	96
Tabela 10 -	Análises química e granulométrica do solo da área experimental. Fazenda Santo Antonio, Itajobi - SP (2011).....	112
Tabela 11 -	Componentes principais (CP1 e CP2) e análise fatorial do estado nutricional de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.....	115
Tabela 12 -	Componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada da biometria de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.....	119

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	23
REVISÃO DE LITERATURA.....	26
Importância da cana-de-açúcar.....	26
Aplicação da irrigação na cultura de cana-de-açúcar: irrigação de salvamento e produtividade da água.....	27
Requerimentos climáticos da cultura de cana-de-açúcar: precipitação pluviométrica, temperatura do ar e radiação solar....	29
Importância da adubação fosfatada na produtividade da cultura de cana-de-açúcar.....	31
Importância da torta de filtro.....	32
Modelos matemático-estatísticos na agricultura: lógica <i>fuzzy</i> e análise multivariada.....	33
CAPÍTULO 1 – MODELAGEM FUZZY PARA ABSORÇÃO E ACÚMULO DE P, ATIVIDADE DA FOSFATASE ÁCIDA E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	37
RESUMO.....	37
ABSTRACT.....	38
1 INTRODUÇÃO.....	39
1.1 MATERIAL E MÉTODOS.....	40
1.1.1 Área experimental (clima e solo)	40
1.1.2 Tratamentos e variedade cultivada.....	43
1.1.3 Análise do solo, nutricional e de atividade de fosfatase ácida em folhas de cana-de-açúcar.....	44
1.1.4 Análise da produção de colmos e de produtividade da água na cultura da cana-de-açúcar.....	45
1.1.5 Aplicação da modelagem matemática <i>fuzzy</i>	45
1.1.6 Conjuntos <i>fuzzy</i> das variáveis de entrada e saída.....	47
1.1.7 Base de regras.....	56
1.1.8 Metodologia de inferência, defuzzificação e softwares utilizados.	56
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
1.3.1 Produtividade da água, modelagem <i>fuzzy</i> , comportamento do clima e tratamentos aplicados: efeitos nas variáveis estudadas...	57
1.4 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS.....	78
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DA QUALIDADE INDUSTRIAL DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	85
RESUMO.....	85
ABSTRACT.....	86

2	INTRODUÇÃO.....	87
2.1	MATERIAL E MÉTODOS.....	88
2.1.1	Área experimental (clima e solo)	88
2.1.2	Tratamentos e variedade cultivada.....	92
2.1.3	Análise tecnológica e produtividade da água na cana-de-açúcar..	92
2.1.4	Análise de componentes principais da qualidade industrial da cana-de-açúcar.....	93
2.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	93
2.2.1	Produtividade da água, análise multivariada, tratamentos aplicados e comportamento do clima: efeitos nas variáveis estudadas.....	93
2.3	CONCLUSÕES.....	101
	REFERÊNCIAS.....	102
	CAPÍTULO 3 - COMPORTAMENTO MULTIVARIADO DO ESTADO NUTRICIONAL E BIOMETRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA.....	106
	RESUMO.....	106
	ABSTRACT.....	107
3	INTRODUÇÃO.....	108
3.1	MATERIAL E MÉTODOS.....	109
3.1.1	Área experimental (clima e solo)	109
3.1.2	Tratamentos e variedade cultivada.....	112
3.1.3	Análise de componentes principais da biometria e estado nutricional da cana-de-açúcar.....	113
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	113
3.3	CONCLUSÕES.....	122
	REFERÊNCIAS.....	123
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	127
	REFERÊNCIAS.....	129

INTRODUÇÃO GERAL

Os ambientes tropicais, são fortemente marcados por períodos de excessos de precipitação pluviométrica e de deficiência hídrica pronunciada, o que afeta a produção agrícola. Na ausência de teores adequados de umidade do solo, há redução ou mesmo interrupção de absorção de nutrientes pelo sistema radicular da planta, o que prejudica o crescimento do vegetal. Fazendo-se necessário, portanto, o uso de água (fontes superficiais ou subterrâneas) para a irrigação, que apresenta grande importância para a produção agrícola, com a vantagem do manejo dos cultivos na escala tempo-espaço. A agricultura irrigada apresenta um potencial de expansão que pode perfazer 76,2 milhões de ha no Brasil, sendo que, para classe de baixa aptidão solo-relevo, a área é 4,2 vezes maior que extensão atual (ANA, 2017).

Associado a esse incremento, estima-se aumento de 38 e 42% na retirada e aplicação de água na irrigação até o ano de 2030 (ANA, 2017). Há no país 6,7 milhões de ha sob irrigação, em que são utilizadas no arroz inundado, pivôs centrais, fruticultura, cana-de-açúcar e outros métodos diversos em grãos, café, eucalipto, etc (ANA, 2017).

A irrigação agrícola tem como objetivo, proporcionar aos cultivos condições satisfatórias de desenvolvimento e produção das culturas, podendo ser plena (durante todo o ciclo da cultura), suplementar (em momentos pontuais de deficiência hídrica) e de salvamento. Este último tipo de irrigação, particularmente para a cultura de cana-de-açúcar tem função de garantir a brotação ou a sobrevivência do canavial recém-cortado, empregando-se uma ou duas lâminas variáveis (COSTA, 2011).

A irrigação de salvamento consiste em fornecer água em períodos pontuais do plantio (baixa precipitação pluviométrica) ou em fases críticas da cultura de cana-de-açúcar (plantio ou rebrota de soqueiras). Deve-se ressaltar, que as condições tropicais favorecem o emprego desta técnica pois há irregularidade nos volumes de chuva. Sob este aspecto, é de suma importância caracterizar a entrada de água no sistema agrícola, deste modo, pode-se inferir, a relação entre água aplicada ou precipitada e a produtividade. Tal avaliação é definida como produtividade do uso da água na cultura, e permite, melhorar o planejamento e possibilidade de definição de melhores manejos, seja com irrigação plena ou de salvamento, dependendo da área.

As regiões tropicais também se caracterizam pelos baixíssimos teores de fósforo (P) na forma lábil (quando há equilíbrio estequiométrico entre o íon absorvido

pelas plantas e o que o reporará na solução do solo), devido à elevada acidez do solo, favorecendo a adsorção deste nutriente no ambiente de produção. A cultura de cana-de-açúcar, que é cultivada em vastas áreas nos trópicos, é muito afetada pela reduzida disponibilidade de P.

A deficiência de P em plantas de cana-de-açúcar, interfere negativamente na biometria da planta (HAAG et al., 1987; ROSSETTO; DIAS; VITTI, 2010). Além de seu papel fundamental na transferência de energia para sínteses orgânicas, influencia muitos processos bioquímicos. Entre eles, a atividade da enzima fosfatase ácida, que sinaliza alta atividade, quando a planta possui inadequados teores de P (BESFORD, 1979; SILVA; BASSO, 1993; BOVI; BASSO; TUCCI, 1998; KUWAHARA; SOUZA, 2009; VASCONCELOS, 2013). Portanto, dados da atividade da fosfatase ácida podem ser utilizados como método alternativo de diagnose foliar e/ou para programas de melhoramento genético da cana-de-açúcar.

Incrementos na produtividade da cana-de-açúcar são obtidos com teores apropriados de P, refletindo em aumentos no rendimento final, melhora na qualidade do caldo, açúcar e influencia para que o processo fotossintético e a condutância estomática ocorram de modo satisfatório (JACOB; LAWLOR, 1991; KORNDÖRFER, 1994; REICH; OLEKSYN; WRIGHT, 2009; SANTOS et al., 2010; CAIONE; FERNANDES; LANGE, 2013).

O P estimula o crescimento das raízes (ZHANG; BARBER, 2012) aumentando sua área de exploração no solo, eleva a absorção de água e o turgor da célula guarda (KUWAHARA; SOUZA, 2009). Deste modo, plantas com teores inadequados de P não realizam a fotossíntese de forma eficiente, resultando em baixa captação de CO₂ intercelular, com baixo potencial de transporte de água via folha (ASPELMEIER; LEUSCHNER, 2004). Quando o processo de transporte de água é afetado, ocorre uma diminuição da troca hídrica para atmosfera, limitando a transpiração da planta (GONÇALVES et al., 2010).

Avaliar diversas fontes de P com teores diferentes de disponibilidade do nutriente, é uma forma de restringir as elevadas perdas de P que ocorrem no solo, particularmente na zona tropical (SANTOS et al., 2009; CAIONE et al., 2011; SIMÕES NETO et al., 2012; VASCONCELOS et al., 2017). A disponibilidade de P da fonte está diretamente relacionada a eficácia de liberação do nutriente, quanto maior disponibilidade, maior aproveitamento pela cultura, decrescendo com o tempo (HOROWITZ; MEURER, 2004). Quando fontes de P reativas são aplicadas em

conjunto com resíduos orgânicos, observa-se bons resultados, com aumento na disponibilidade do nutriente (HOUSSAIN et al., 2001).

A ação de microorganismos solubilizadores de P, são capazes de tornar disponível este nutriente em fosfatos naturais, ao longo do tempo (VASSILEV et al., 2006). Uma opção para aumentar a liberação de P para o solo é o uso da torta de filtro, um composto orgânico, produzido em grande volume, rico em matéria orgânica, e que apresenta em sua composição macronutrientes, especialmente o P.

Por apresentar teores significativos de P, a torta de filtro, como um composto orgânico, é importante para a cultura de cana-de-açúcar, pois, libera substâncias que reduzem a adsorção de P (ANDRADE et al., 2003; SOUZA et al., 2006). Além disso, a torta de filtro incrementa a produção das características tecnológicas da cana-de-açúcar, como produção de colmos e de açúcar (FRAVET et al., 2010; SANTOS et al., 2010). O uso conjunto de fontes orgânicas e minerais de P são capazes de suplementar ou substituir totalmente a adubação mineral na cana-de-açúcar, com a vantagem de proporcionar distintas faixas de eficiência na disponibilidade do nutriente.

Dado o grande número de variáveis ou de potenciais resultados, há exigência do uso de técnicas estatísticas que propiciem a mais ampla interpretação dos dados, refletindo todos os aspectos possíveis durante o ciclo da cultura. A simultaneidade de processos envolvidos requer uso de meios que possam avaliar n variáveis conjuntamente, sendo utilizada a estatística multivariada para tal fim. Pois de acordo com Cruz; Regazzi (2001), esta se apresenta como um melhor instrumento de análise em relação a estatística univariada. Especificamente a análise de componentes principais apresenta a função de reduzir a complexidade das interações, explicando a relação de variância-covariâncias, pois, promove combinações lineares (KEFLENS, 2009).

Outra ferramenta útil na análise de conjunto de dados que apresentam diferentes graus de complexidade é o uso da modelagem *fuzzy*, essa técnica permite verificar todas as relações e interações dos dados de entrada e saída com suas respectivas significâncias. Deste modo, são dimensionados e quantificados de forma que todos os níveis de relevância possam ser explorados durante a avaliação, propiciando um entendimento global de todas as relações, sejam as possíveis ou as não perceptíveis.

Frente ao exposto, essa pesquisa tem por objetivo desenvolver a modelagem *fuzzy* da produtividade de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.

REVISÃO DE LITERATURA

A cultura da cana-de-açúcar apresenta expressiva importância econômica e social, além disso, por ser cultivada em vastas áreas do Brasil, requer manejo direcionado especialmente ao fósforo (nutriente com dinâmica complexa em solos tropicais) e ao suprimento hídrico adequado, visto que há irregularidades na distribuição e precipitação pluviométrica. Em particular, no estado de São Paulo, a irrigação de salvamento é o principal meio de fornecer água à cultura, ressaltando-se que, a irrigação é um fator adicional no sistema água-solo-planta-atmosfera, portanto exigindo técnicas matemáticas, como lógica *fuzzy* e análise multivariada, que são capazes de extrair informações nas camadas e interações mais profundas da variável.

Importância da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar evoluiu em seus sistemas biológicos na presença humana, com relatos de sua descrição ou uso, há mais de 8.000 anos na Nova Guiné (MARIN et al., 2009). No Brasil, seu cultivo, foi particularmente intenso, desde o período de descobrimento, proporcionando lucro à metrópole e povoamento do território.

Os dados da CONAB (2018), indicam que a cultura apresentou para a safra 2017-2018, uma área colhida de 8,7 milhões de hectares, com uma produção de colmos de 635,6 milhões toneladas; 27 milhões de m³ de álcool etílico (anidro e hidratado) e, 39,4 milhões de toneladas de açúcar, sendo que o estado de São Paulo representa 54,6% da produção e 52,1% da área cultivada.

Em relação a produtividade, a média nacional é de 72,5 Mg ha⁻¹, o estado de São Paulo, apresenta 76,2 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2018). Na safra 2017/2018 o Brasil gerou receitas com a exportação de açúcar de US\$ 9,4 bilhões e, nas exportações de etanol o montante perfaz US\$ 727,3 milhões (ÚNICA, 2018).

O setor sucroalcooleiro representa parte considerável do volume exportado e de divisas do país, com a produção de álcool e açúcar, que emprega de forma direta e indireta em sua cadeia produtiva, milhares de pessoas. As usinas signatárias do

Protocolo Ambiental Paulista, elevaram seu potencial de produção de bioeletricidade (bagaço de cana-de-açúcar) em 175% nos últimos oito anos, perfazendo 5.125 MW, com potencial de 165 TWh até 2024 (RAMOS; NACHILUK, 2017).

Aplicação da irrigação na cultura de cana-de-açúcar: irrigação de salvamento e produtividade da água

O uso da irrigação é responsável por incrementos na produção e qualidade final dos produtos agrícolas, pois fornece água de modo adequado para cada fase da planta, além de promover produção na entressafra. Geralmente os cultivos de cana-de-açúcar no estado de São Paulo são conduzidos em sequeiro, além disso, há irrigação plena ou para compensar uma parte da necessidade hídrica da cultura.

Conforme Donzeli; Costa (2010), pode-se classificar as práticas de irrigação na cana-de-açúcar em três sistemas: irrigação de salvamento (suprimento das necessidades hídricas em períodos críticos, pós-plantio e rebrota de soqueiras, em lâmina única que pode variar entre 30 a 60 mm); irrigação com déficit (suprimento das necessidades hídricas no estabelecimento e perfilhamento, com aplicação de quatro a seis lâminas de 40 a 60 mm). Essas lâminas são constituídas por águas residuárias, somente água ou água com vinhaça. E por fim, a irrigação plena: suprimento das necessidades hídricas totais da cana-de-açúcar durante todo o cultivo.

No Brasil, a área sob de irrigação de salvamento (20 a 80 mm ano⁻¹ em média) representa 98,4% do total das áreas que recebem irrigação, com as maiores áreas nos estados de São Paulo, Goiás e Minas Gerais, para a irrigação com déficit (200 a 300 mm ano⁻¹ em média) Minas Gerais e Goiás apresentam as maiores extensões e para a irrigação plena (300 a 1000 mm ano⁻¹ em média), o estado de Minas Gerais possui a maior superfície irrigada (ANA, 2017).

Nota-se, portanto, que o uso de irrigação de salvamento é o sistema mais utilizado no cultivo de cana-de-açúcar em condições de suporte temporário às condições de reduzido suprimento hídrico, reforçando a grande variabilidade climática na região tropical, principalmente quanto a precipitação pluviométrica.

O potencial de expansão da irrigação no Brasil, em específico para a cana-de-açúcar é elevado, pois de acordo com Borghetti et al. (2017), apenas São Paulo, Alagoas, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás concentram as maiores áreas de cultivo irrigado de cana-de-açúcar. Ainda de acordo com a ANA (2017) ao se comparar

a área irrigada em relação a área cultivada em cada estado, os estados com maiores concentrações de uso de irrigação são: Goiás (35,3%), Espírito Santo (34%) e Minas Gerais (33,6%).

De acordo com Rezende; Andrade Junior (2019) os tipos de irrigação mais empregados em cana-de-açúcar são: a irrigação de superfície, em que a água é aplicada em sulcos de irrigação paralelos ao plantio, possui baixa eficiência na aplicação de água, uso recomendado para solos de textura médio-argilosa e topografia plana; irrigação por aspersão, onde a água é aspergida sob pressão, apresenta eficiência de 70 a 80%, além da aspersão convencional, pode ser pelos sistemas auto-propelido, linhas móveis e pivô central. Os mesmos autores comentam que a irrigação localizada, é aplicada próxima às fileiras de plantas, sendo o gotejamento subsuperficial o mais empregado, não possui restrição de textura de solo e topografia de terreno, com eficiência de 90 a 95%, pode ser utilizada como fertirrigação, reduzindo custos, no entanto, o investimento de implantação é alto.

Rezende; Andrade Junior (2019) ressaltam que, deve-se atentar quanto ao mau manejo de irrigação, que pode acarretar salinização da área, erosão do solo e assoreamento dos cursos de água, para que haja redução de prejuízos e desperdícios, sugerem estudo aprofundado sobre a variação de consumo hídrica pela cultura e os métodos de irrigação.

O uso da água deve ser altamente eficiente, pois atualmente há redução na quantidade e/ou qualidade da água disponível para ser utilizada na irrigação agrícola.

A necessidade em se ter um indicativo para tomada de decisão e análise da variação entre produção e quantidade de água aplicada, torna a avaliação da produtividade da água (*PA*), uma ferramenta ótima para tal fim (MASCHIO, 2011).

A *PA*, se refere exclusivamente a produção física ou econômica por meio de uma unidade de entrada, sendo água, em mm, L ou m³ (SANTOS, 2016). Deste modo, a relação entre a produtividade da cultura e a água disponível, pode ser empregada para dimensionar os meios de exploração agrícola em condições de escassez hídrica, sendo a ferramenta mais utilizada para evidenciar os benefícios do consumo de água pelas culturas (FRIZZONE, 2014).

Requerimentos climáticos da cultura de cana-de-açúcar: precipitação pluviométrica, temperatura do ar e radiação solar

A produção agrícola mundial, apesar dos recentes ganhos de produtividade, está diante de uma séria limitação em escala global, episódios de grandes mudanças climáticas têm apresentado elevada frequência, afetando a produção e/ou a expansão da área cultivada.

A produção brasileira de cana-de-açúcar de acordo com a CONAB (2018) sofreu uma queda de 3,6% e também redução de 3,5% na área plantada no país em relação à safra passada (2016-2017), apesar das boas condições climáticas durante a safra (houve a associação de outono mais chuvoso nas regiões Centro-Sul e Nordeste e inverno mais seco na região Centro-Sul).

As reduções da área e da produção estão relacionadas e foram sinais remanescentes das grandes adversidades climáticas ocorridas nas últimas safras, particularmente na região Centro-Sul (CONAB, 2015). Ainda segundo a CONAB (2015), reduziu-se a produtividade do canavial, em especial, devido à restrição hídrica, que combinado com menor investimento na manutenção dos canaviais resultou em queda de 11% no estado de São Paulo na safra 2014/2015.

No estado de São Paulo, a variabilidade da precipitação interanual é a principal causa das oscilações de rendimento da cana, uma vez que afeta o equilíbrio de água no solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de água para as plantas (SANTOS; SENTELHAS, 2012). Os mesmos autores comentam que qualquer mudança nas variáveis do balanço hídrico, principalmente chuva e/ou evapotranspiração, irá promover mudanças no consumo de água da planta.

Além disso, as respostas fisiológicas são afetadas pelas variáveis climáticas, como o amadurecimento da cana-de-açúcar; Cardozo; Sentelhas (2013) observaram incremento de 15,3% na sacarose do colmo no período de quatro meses antes da colheita. O binômio déficit hídrico e temperatura do ar são os principais responsáveis pelo acúmulo de sacarose na cultura de cana-de-açúcar.

Em relação à disponibilidade hídrica, altas produções de cana-de-açúcar são obtidas com precipitações anuais a partir de 1.500 mm, bem distribuídos (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005), deve-se somar, a variedade cultivada e as boas condições físico-químicas do ambiente produtivo, como teores adequados de nutrientes (acidez do solo corrigida), boa capacidade de armazenamento de água (CAD) e drenagem,

além de baixo grau de compactação, que estimulam um maior desenvolvimento do sistema radicular, com potencial para elevar a produtividade. A produção da cultura de cana-de-açúcar em condições de sequeiro nos trópicos úmidos apresenta produtividade de 70 a 100 Mg ha⁻¹ (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Como se faz necessário o suprimento hídrico adequado na fase de desenvolvimento vegetativo, no qual ocorre a brotação, perfilhamento e alongamento dos colmos, a fase de maturação associada à restrição hídrica, induz ao aumento de sacarose nos colmos por meio de um repouso fisiológico (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005). Há grande variação no consumo de água dentro do ciclo da cana-de-açúcar, a perda de água para o sistema é função da área foliar, estágio fenológico e da densidade do sistema radicular (MARIN et al., 2009).

Em relação a temperatura do ar, a cana-de-açúcar apresenta queda significativa na taxa de crescimento abaixo de 20°C, e expressivo crescimento com a temperatura entre 30 a 34°C, no entanto, acima dos 35°C há um estresse térmico e crescimento praticamente nulo, acima dos 38°C (MARIN et al., 2009). Burr et al. (1957) observaram uma redução de 84% na taxa de fotossíntese da cana-de-açúcar quando a temperatura do ar foi reduzida de 23,0 a 13,6°C e Waldron; Glasziou; Bull (1967) mostraram que a eficiência fotossintética diminui linearmente com uma redução na temperatura do ar de 34°C para 5°C.

A brotação da cana-de-açúcar também apresenta relação direta com a temperatura do ar, para esta fase fenológica a temperatura de 34 a 37°C é considerada como ideal, já a temperatura de 21 e 44°C são restritivas a brotação (NICKELL, 1977). Na fase de emergência, observa-se que a temperatura ótima está na faixa dos 32°C, com limite de 21°C como temperatura-base, o conhecimento desta característica é importante principalmente devido aos plantios que são realizados nos períodos mais frios do ano (BARBIERI; VILLA NOVA, 1977; MARIN et al., 2009).

Quanto à fase de perfilhamento foi verificado que a temperatura tem grande influência, sendo que os limites superior e inferior de tolerância são de 30 e 20°C, respectivamente (ARGENTON, 2006). Contudo, a temperatura de 27 a 32°C seria a ideal para o perfilhamento, e temperaturas abaixo de 5°C e acima de 45°C são extremamente prejudiciais para esta fase (SUGUITANI, 2006). Ao contrário das outras fases, a maturação exige temperaturas menores, que auxiliam no processo de concentração de sacarose no colmo, sendo que a deficiência hídrica também apresenta a mesma função, que marca o início do processo (MARIN et al., 2009).

A radiação solar intervém no crescimento e desenvolvimento da planta e no regime térmico, sendo fundamental à produção de biomassa, relaciona-se diretamente na evaporação e da evapotranspiração (GOUVÊA, 2008).

Por ser uma espécie de ciclo fotossintético do tipo C4, a cana-de-açúcar apresenta alta conversão de energia radiante em energia química, devido a sua alta eficiência em captar a radiação incidente principalmente em condições de elevada temperatura do ar, radiação solar intensa e umidade do solo adequada (MARIN et al., 2009). Além disso, a radiação solar apresenta grande efeito no florescimento da cana-de-açúcar (ARALDI et al., 2010).

Importância da adubação fosfatada na produtividade da cultura de cana-de-açúcar

O ambiente produtivo interfere na dinâmica do P, por meio de suas características físico-químicas, dentre os quais se destacam: teores elevados de sequestrados de ferro e alumínio, matéria orgânica, pH, teor de cálcio e tipo de argila presente no solo (NOVAIS; SMYTH, 1999).

As plantas requerem o P em maior intensidade na fase de desenvolvimento do vegetal, pois, nesse período há um forte crescimento do sistema radicular e trocas gasosas acentuadas (MALAVOLTA, 2006). Na planta, o P proporciona: expansão do sistema radicular, incremento no número de perfilhos (cereais e forrageiras) em ação sinérgica com o N, nas gramíneas promove a regulação da maturação, aumentos nos teores proteicos e de carboidratos (MALAVOLTA, 2006).

Há recomendação para o teor apropriado de P na folha +1 (cana-planta) para o estado de São Paulo, recomendado por Raij; Cantarella (1997), com valores de 1,5-3,0 g kg⁻¹, já plantas deficientes em P, apresentam menor qualidade final (SANTOS et al., 2010). A presença de teores adequados de P no caldo, possibilita a produção de açúcar de qualidade, pois este, influencia todo o processo físico e químico, como clarificação, floculação e decantação (KORNDÖRFER, 2004). Além disso, a associação de teores adequados de P e N, são responsáveis pela máxima eficiência na produção de etanol (FADEL et al., 2014).

Em especial, a resposta para produção de colmos e de açúcar à adubação fosfatada, entre outros fatores, pode apresentar oscilação devido a variedade utilizada e o manejo de aplicação do P. Sousa Junior (2016) não verificou efeito significativo

para doses e modo de aplicação na variedade RB92 579 cultivada em Latossolo Vermelho Distrófico para produção de colmos, contudo a maior dose de P aplicada em área total resultou em menor produção de açúcar, enquanto que para a aplicação em sulco, não houve diferença entre as doses, mantendo-se a produção de açúcar.

Sob alta disponibilidade de P, a variedade RB86 7515 demonstrou-se mais eficiente em utilizar o nutriente, em condições limitantes, esta variedade apresentou as maiores produções de açúcar verificadas em doses intermediárias, com 192,6 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (CALHEIROS et al., 2012; TARUMOTO, 2016).

Como alternativa para complementar a adubação mineral fosfatada, um importante composto orgânico, a torta de filtro é utilizada como fertilizante, apresentando resultados significativos.

Importância da torta de filtro

A torta de filtro apresenta teores consideráveis de matéria orgânica e P, portanto, é capaz de restaurar solos esgotados e/ou com baixos teores de nutrientes, rica em nutrientes, sua composição dependerá do manejo empregado e variedade cultivada (NUNES JÚNIOR, 2008; SANTOS et al., 2010).

Por liberar substâncias que possuem o mesmo sitio de adsorção do P, a torta de filtro promove uma maior presença do nutriente na solução do solo, elevando a disponibilidade para a cultura (SOUZA et al., 2006), este composto orgânico, aumenta os rendimentos médios de colmos e de açúcar (FRAVET et al., 2010; SANTOS et al., 2010).

A torta de filtro possui em sua composição 30% de P orgânico, e N na forma proteica, logo, a disponibilidade para planta será gradual (NARDIN, 2007). De acordo com Korndörfer (2003) são necessários 1000 kg de cana-de-açúcar moída, para produção de 40 kg de torta de filtro, sendo resultante da combinação do processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar (lodo de decantação) com o bagaço moído (ALVARENGA; QUEIROZ, 2008).

A torta de filtro é empregada como complemento da adubação, aplicada em conjunto com fontes de alto, médio e baixos teores de P solúvel (MATIAS, 2010; VASCONCELOS, 2013). Seu uso associado a fontes minerais deve-se ao grande custo industrial, que corresponde ao processo de produzir fontes com elevado teor de P solúvel, o que reforçou a busca por fontes novas, como a torta de filtro (REIS, 2002).

De acordo com Santos et al. (2010), a produtividade de colmos e o perfilhamento foram incrementados na cana-de-açúcar pelas doses do composto, o uso de torta de filtro promoveu produtividade estatisticamente semelhante as maiores doses de P (superfosfato triplo), a aplicação 4 Mg ha⁻¹ do composto foi suficiente para produzir 135 Mg ha⁻¹ de colmos da variedade de cana-planta RB86 7515, cultivada em Argissolo Vermelho Distroférico.

O incremento nos teores de P prontamente disponíveis, estão relacionados a ação de microorganismos solubilizadores de P, que convertem substâncias fosforadas em de fácil e imediata absorção (AVALHÃES; PRADO, 2009). Além disso, há liberação mais gradual de nutrientes, particularmente de P, devido ao processo de quebra dos nutrientes por ácidos liberados durante a compostagem (AVALHÃES; PRADO, 2009).

O potencial de retorno econômico e agrônômico da cultura de cana-de-açúcar em relação ao emprego de P associado à torta de filtro é considerável, pois proporciona a redução no uso da adubação mineral fosfatada, com menores custos de produção e manutenção de jazidas minerais do nutriente.

Modelos matemático-estatísticos na agricultura: lógica *fuzzy* e análise multivariada

Atualmente, devido à grande variabilidade climática que é imposta ao cultivo de cana-de-açúcar no Brasil, têm-se a necessidade de dimensionar também a influência da irrigação+precipitação pluviométrica nos cultivos, pois, a aplicação da irrigação também é contabilizada como entrada de água no sistema produtivo, portanto, com potencial de suprir integral ou parcialmente as necessidades da cultura. A utilização de modelos matemático-estatísticos que representem essas condições produtivas (irrigação+precipitação pluviométrica) são de fundamental relevância, visto que possibilitam quantificar e qualificar cada termo.

O uso de modelos de simulação na indústria sucroalcooleira, especialmente na produção de cana-de-açúcar apresenta inúmeras aplicações, como: na bioquímica, aspectos agrônômicos, fisiológicos, de manejo de pragas, moagem e de produção sustentável (WOOD, 1995; PEACOCK; STARZAK, 1996; MOORE et., 1997; KEATING et al., 1997; KROPFF et al., 1997).

Há na literatura diversos modelos matemático-estatísticos que podem ser aplicados na agricultura, contudo, necessitam expressar a dinâmica de respostas

biológicas. São modelos não-lineares, que descrevem melhor os mecanismos e respostas relacionados ao desenvolvimento da planta.

Destaca-se o modelo Exponencial de Goudriaan; Monteith (1990), que considera durante todo o ciclo da cultura dois períodos marcantes, o primeiro, que as plantas jovens isoladas apresentam um crescimento exponencial e relativamente constante, no segundo período, ocorre um crescimento linear sob a máxima interceptação de radiação fotossinteticamente ativa atingida (LYRA et al., 2003).

Há também o modelo Logístico, que de acordo com Salgado (2015), prediz valores relacionados a uma variável categórica por meio de um conjunto de variáveis explicativas contínuas e/ou binárias. Ambos modelos são amplamente utilizados na agricultura, como em: sorgo forrageiro (ANDRADE NETO et al., 2010), cana-de-açúcar (BATISTA et al., 2013), trigo (BREZOLIN, 2015).

Há também os modelos computacionais para cana-de-açúcar como: APSIM-Sugarcane, CANEGRO-DSSAT, QCANE e BRCANE (O' LEARY, 2000; SILVA et al., 2012), esses modelos avaliam desde estágios do desenvolvimento vegetativo e maturação até a produtividade mensal potencial de biomassa baseada na conversão de CO₂ em carboidratos (SILVA; BERGAMASCO, 2001; SILVA et al., 2012).

Em estudo realizado por Knox et al. (2010), ao utilizarem o CANEGRO-DSSAT observaram mudanças nas condições climáticas e de produtividade de cana-de-açúcar em cenários futuros na África, com aumento da área irrigada e na produtividade, onde constaram que, o aumento na exigência por irrigação é maior que o rendimento da cultura, comprometendo a capacidade hídrica, além disso, o estudo, sugere que, a elevação da temperatura do ar e da radiação solar é mais prejudicial para a cana-de-açúcar, que a redução na precipitação pluviométrica.

Também há o método de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar, chamado de Método da Zona Agroecológica – ou modelo FAO mais voltado para análises de potencial regional. Este método utiliza o conceito de taxa de produção de matéria seca de folhas, a produtividade potencial para dado clima é obtida a partir da cultura padrão, utilizando dados de radiação solar e temperatura (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Além disso, há as técnicas de modelagem *fuzzy*, que encontram grande aplicabilidade em inúmeras áreas, sendo capaz de determinar a importância de cada elemento do sistema e sua importância no conjunto avaliado. Seu processo de avaliação depende da transformação dos dados de entrada em expressões

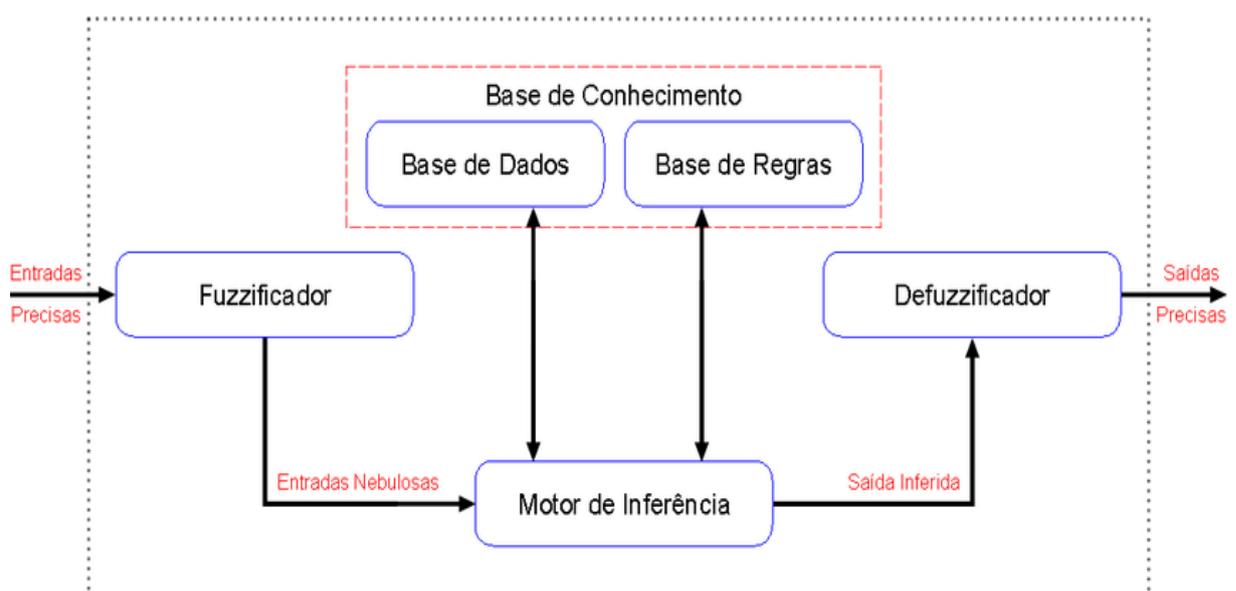
linguísticas, utilização de regras específicas, podendo ocorrer agregação, onde se aplica a partícula se ou composição com uso do então, após essa fase há uma reversão dos dados em números reais para determinação matemática (COX, 1994).

Pode-se utilizar os seguintes modelos dentro da lógica *fuzzy*: Modelo linguístico, onde tanto o termo antecedente quanto o termo consequente são proposições nebulosas (MAMDANI, 1977), modelos relacionais, o qual a uma proposição antecedente particular estar associada com várias proposições consequentes diferentes por meio de uma relação nebulosa (PEDRYCZ, 1984) e o modelo Takagi-Sugeno (TS), onde o termo consequente é uma função das variáveis do termo antecedente ao invés de uma proposição (TAKAGI; SUGENO, 1985).

O modelo linguístico (MAMDANI) apresenta resultados adequados, com a vantagem de empregar uma estrutura simples, intuitiva e fácil interpretação (VERMAAS, 2010), além disso, envolve entradas e saídas reais. A inferência do tipo Mamdani apresenta um conjunto de regras individuais, que, para determinado valor de entrada, aciona várias regras, gerando um conjunto de saídas (VERMAAS, 2010).

No modelo Mamdani, aplica-se a lógica nos dados, tendo uma base de regras, que é influenciada pelo grau de pertença. Após tal processo, há uma elaboração dos modelos, resultando nas saídas, podendo ser simplificado como na Figura 1.

Figura 1 - Sistema *fuzzy* genérico, com fuzzificador, motor de inferência e defuzzificador.



Fonte: Costa; Bezerra; Guedes (2012).

Outra técnica eficiente é a estatística multivariada para análise de dados oriundos de sistemas de inúmeras variáveis e relações, sendo capaz de retratar de modo estatístico todos os fenômenos ocorridos no objeto de estudo. Avaliando todas as intra e inter-relações que são apresentadas de modo a identificar e quantificar todos os efeitos para as demais variáveis de forma concomitante. De acordo com Ferraudo (2005), a estatística multivariada pode ser compreendida pelas seguintes técnicas: análises de agrupamento, de componentes principais, de correlação canônica, discriminante, de correspondências e redes neurais artificiais, são capazes de extrair informações relevantes dentro de um grande universo de dados.

Em especial, as análises de agrupamentos hierárquicos e de componentes principais: o primeiro, particiona os dados de forma sucessiva, criando em uma exibição hierárquica dos agrupamentos (EVERITT, 2011), o que, facilita a interpretação sobre os agrupamentos em cada período em que se formaram, e qual porcentagem de semelhança entre eles. Já o segundo, maximiza a variância dos dados, proporcionando redução na grandeza da matriz, o que traz a explicação da maior parte do fenômeno por poucos componentes (KEFLENS, 2009), ambas técnicas foram aplicadas no presente.

Deste modo, para apresentar e discutir os temas propostos, a tese foi dividida em dois capítulos, sendo o primeiro capítulo intitulado “**MODELAGEM FUZZY PARA ABSORÇÃO E ACÚMULO DE P, ATIVIDADE DA FOSFATASE ÁCIDA E PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA**”, segundo capítulo intitulado “**ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DA QUALIDADE INDUSTRIAL DA CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA**” e terceiro capítulo “**COMPORTAMENTO MULTIVARIADO DO ESTADO NUTRICIONAL E BIOMETRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA**”.

CAPÍTULO 1 – MODELAGEM FUZZY PARA A ABSORÇÃO E ACÚMULO DE P, ATIVIDADE DA FOSFATASE ÁCIDA E PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA.

RESUMO

A cultura de cana-de-açúcar é uma das mais importantes do agronegócio brasileiro, seja, pela área de cultivo, volume produzido, tecnologia empregada na cadeia produtiva e valores comercializados. O que reforça estudos que possam determinar os melhores manejos, que resultem em maiores rendimentos, englobando a nutrição, particularmente o fósforo (P) e o fornecimento de água (irrigação de salvamento). Processar grande volume de informações/dados é um desafio e principalmente quando há necessidade de extrair e confirmar informações incertas, particularmente no sistema água-solo-planta-atmosfera. Para este fim, a lógica *fuzzy* é uma ferramenta eficiente, pois, é capaz de detectar variações em micro e macro escala. Portanto, o objetivo deste trabalho foi realizar a modelagem *fuzzy* dos efeitos de doses de P em fontes de P (presença e ausência de torta de filtro) na fertilidade do solo, nutrição e bioquímica de planta e produtividade da cultura de cana-de-açúcar irrigada. O experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média, no município de Itajobi-SP. O arranjo experimental foi em blocos ao acaso, em triplicata, no esquema 3x4x2, com fontes de P (superfosfato triplo, fosfato natural reativo Bayóvar e fosfato natural de Araxá), doses (0, 90, 180 e 360 kg de P₂O₅ ha⁻¹), na presença e ausência da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹, base seca). Foi aplicada em lâmina única, 80 mm de água em todas as parcelas, como irrigação de salvamento em área total. A produtividade da água/produção de colmos foi elevada, na presença da torta de filtro e fonte de P. A análise dos efeitos das doses de P foi realizada por meio de gráficos bidimensionais, e por combinação de conjuntos associados, constatou-se que os manejos com a maior dose, independente da fonte (presença e ausência da torta de filtro) proporcionaram alto efeito positivo para todas as variáveis, sobretudo na produção de colmos, com exceção da fosfatase ácida foliar, onde estimulou muito baixo efeito positivo.

Palavras-chave: Lógica nebulosa. Torta de filtro. Cana-planta. Fosfatagem.

CHAPTER 1 - FUZZY MODELING FOR ABSORPTION AND P ACUMULATION, ACTIVITY OF ACID PHOSPHATASE AND PRODUCTIVITY OF SUGARCANE IRRIGATED IN THE FUNCTION OF THE APPLICATION OF FILTER CAKE AND PHOSPHATE FERTILIZATION

ABSTRACT

Sugarcane crop is one of the most important Brazilian agribusinesses, which reinforces how important are studies focusing on how to determine the best management practices, resulting in higher yields, including nutrition, particularly in phosphorus (P), and water supply (water saving irrigation). Processing large amounts of data is a challenge especially when there is a need to extract and confirm uncertain information. For this purpose, *fuzzy* logic is an efficient tool because it is able to detect variations in micro and macro scale. The experiment was settled in a Red-Yellow Latosol Dystrophic, medium texture, in Itajobi-SP, Brazil. The experimental arrangement was in randomized blocks with three replications, in a $3 \times 4 \times 2$ factorial scheme with three sources of phosphorus (triple superphosphate, Bayovar reactive natural phosphate and Araxa natural phosphate), rates (0, 90, 180 and 360 kg of P_2O_5 ha⁻¹), in the presence and absence of the filter cake (7.5 Mg ha⁻¹, dry basis). In the total area was applied single lamina of 80 mm of water (water saving irrigation). Therefore, we evaluated the effect of phosphorus application rates from various sources and in the presence or absence of filter cake in variables related to soil fertility, plant nutrition, and biochemistry and productivity and to infer the influence of potential evapotranspiration on cultivation. In the presence of the filter cake and P source, water productivity/stalks production was high. Analysis of P data was performed through two-dimensional images, and by their combination of datasets, with the help of a larger dose, the data source, and a proportional data filter. For all variables, especially in stalks production, excepted for foliar acid phosphatase, where we stimulated a lot by the positive effect

Keywords: Nebula logic. Filter cake. Water productivity, Phosphate.

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de modelos matemático-estatísticos na agricultura é resultado da necessidade de dimensionar as possíveis variações nos rendimentos agrícolas, que são influenciados pelos atributos físico-químicos do ambiente produtivo, manejo aplicado e clima do local. Sendo reforçada pelo maior desenvolvimento da área computacional, já que para tal, requer-se uso de programas que realizam interações complexas em todo o sistema água-solo-planta-atmosfera.

São de grande importância ao planejamento regional, dando subsídios para a avaliação econômica da implantação da cultura em um novo ambiente, deste modo, o uso de modelos para avaliar as respostas das culturas no ambiente de produção é fundamental, pois, existem complexas interações da planta com fatores bióticos e abióticos.

E dentre os fatores que afetam diretamente a produção agrícola, o fornecimento de água (irrigação ou precipitação pluviométrica) é um dos mais importantes, especialmente na região tropical, onde ocorre extremos na precipitação pluviométrica.

No sistema agrícola a irrigação pode ser plena (durante todo o ciclo da cultura) ou de salvamento (possibilitando condições de brotação ou rebrota em momentos de reduzidos índices pluviométricos). A aplicação de água nos cultivos deve ser planejada, no intuito de converter seu uso em alta produção agrícola.

Para isso, há várias avaliações, como a produtividade da água, que leva em consideração a produção da cultura e água contabilizada (irrigação e/ou precipitação pluviométrica).

E como há inúmeros fatores, a necessidade de haver uma interpretação mais profunda e detalhada dos dados a serem modelados, torna o uso da lógica convencional muito restritiva. A concepção dos conjuntos nebulosos e da lógica nebulosa ou lógica *fuzzy* podem ser utilizados para modelar sistemas de várias formas (GODOY, 2007), e estes podem ser exemplificados como sistemas baseados em regras (ZADEH, 1973), modelos de regressão nebulosos (TANAKA; UEJIMA; ASAI, 1982), ou modelos usando estruturas celulares (SMITH; NOKLEBY; COMER, 1994).

O emprego da lógica *fuzzy* se tornou mais intensa recentemente, devido ao melhor entendimento de todas as inter-relações que ocorrem no sistema produtivo, sendo usado para o manejo agroindustrial e econômico (FLORENTINO et al., 2015),

para fins de fertilidade do ambiente produtivo (SILVA; LIMA, 2009) ou aspectos de crescimento e nutrição da planta (SCREMIN, 2016), apresentando ampla utilização na cultura.

Sob esse ponto, a lógica *fuzzy*, apresenta grande diferencial, pois, dimensiona todos os graus possíveis nos dados obtidos e resultados finais, portanto expande a percepção de modo a modelar o senso das palavras. Como resultado, proporciona estudos em sistemas inteligentes mais humanos e adequados à realidade (MARRO et al., 2010). Identificando e definindo o quão é pertinente um elemento pertencer a um determinado domínio, e essa pertinência é dada em graus, calculados por uma função, resultando em um valor real, variando entre 0, não pertence e 1, que pertence (VASCONCELLOS, 2013).

Uma maior compreensão da relação do fósforo e da água no sistema produtivo da cana-de-açúcar, e principalmente a contribuição para tomada de decisões no manejo do nutriente e do uso da água/precipitação pluviométrica, reforçam a importância do presente trabalho. Portanto, o objetivo deste estudo é a aplicação da modelagem *fuzzy* para absorção e acúmulo de P, atividade da fosfatase ácida e produtividade de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.

1.1 MATERIAL E MÉTODOS

1.1.1 Área experimental (clima e solo)

Os dados do experimento foram obtidos de Vasconcelos (2013), no período de junho de 2011 a junho de 2012 na Fazenda Santo Antônio (Figura 2), município de Itajobi-SP, pertencente a Usina do Grupo Virgulino de Oliveira, nas coordenadas 21° 11' S e 49° 1' W com altitude de 469 m e clima Aw, conforme CEPAGRI (2018).

Ainda segundo a CEPAGRI (2018) a área foi caracterizada como verão chuvoso e inverno seco, temperatura média anual de 23,2 °C e precipitação pluvial média anual de 1.328 mm. Após 20 dias de instalação do experimento, foi aplicada nos sulcos de plantio, a irrigação de salvamento, com uma lâmina de 80 mm de água, pois no mês de maio de 2011, houve precipitação de 20 mm. Foi utilizada a cana-de-açúcar variedade RB86 7515, destacando-se pela alta velocidade de crescimento, porte alto, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmo, teor de sacarose e produtividade agrícola elevados (PMGCA, 2008).

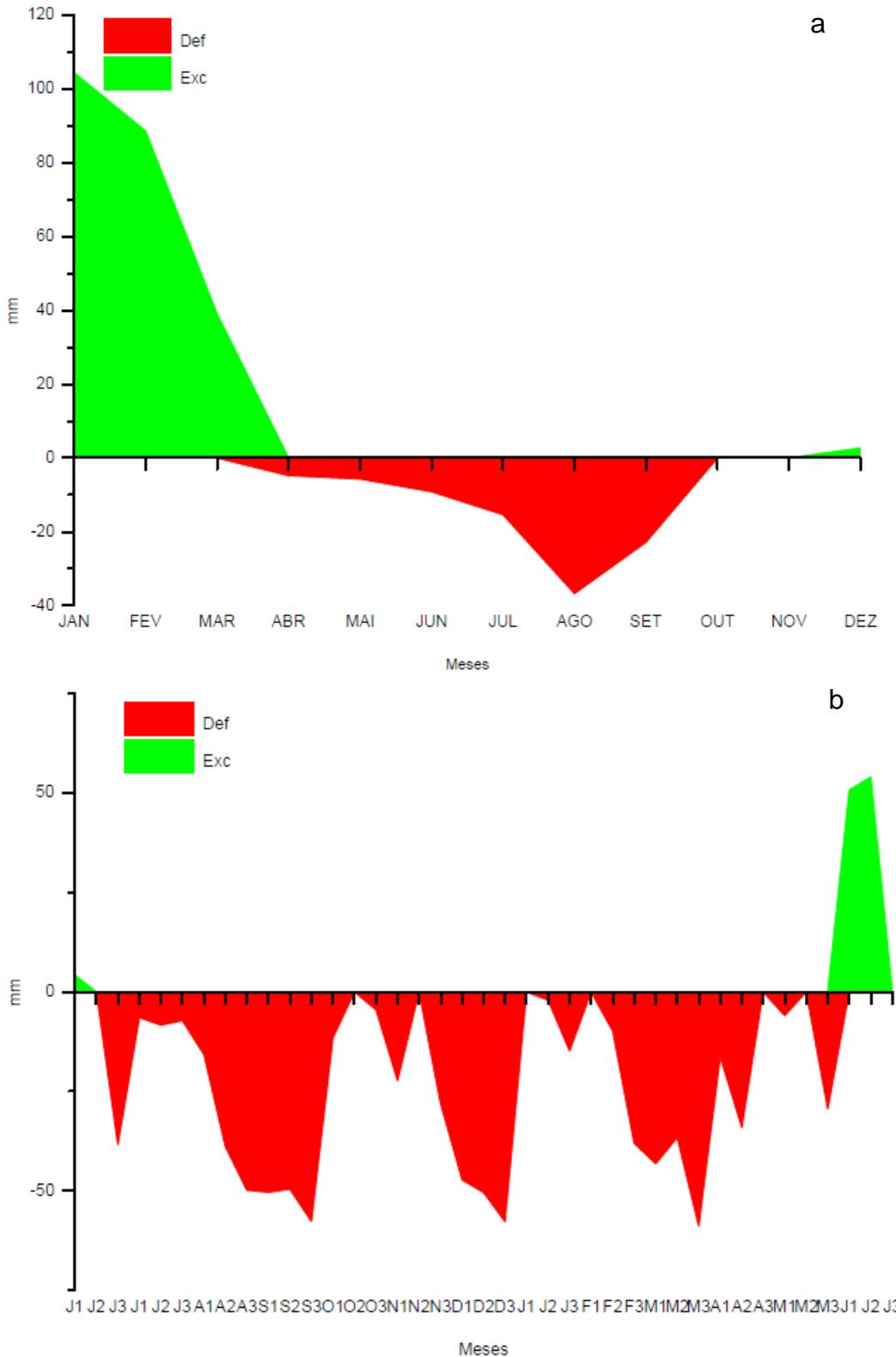
Figura 2 - Foto da área do experimento com a cana-planta variedade RB86 7515 aos 120 dias após o plantio. Itajobi-SP (2011).



Fonte: Vasconcelos (2011).

Os dados de balanço hídrico normal do município de Itajobi-SP foram obtidos no CEPAGRI (2018), consistindo em um banco de dados de 30 anos e o balanço hídrico sequencial, que apresenta o período de cultivo dividido em decênios são apresentados na Figura 3. A entrada de água no sistema produtivo pelo balanço hídrico climatológico normal se faz, pela precipitação, irrigação, orvalho, escoamento superficial, drenagem lateral e ascensão capilar, com saídas pela evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda, há uma versão simplificada, feita por Thornthwaite; Mather (1955) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). Existe também o balanço hídrico sequencial, que pode contemplar o período de estudo em diferentes escalas de tempo, conforme a necessidade, sua vantagem é o acompanhamento em tempo real do armazenamento de água no solo (PEREIRA; ANGELOCCI, SENTELHAS, 2007).

Figura 3 - Balanço Hídrico Normal (a) e Balanço Hídrico Sequencial (b) do município de Itajobi-SP (junho de 2011 a junho de 2012).



Legenda: Balanço Hidrico Normal (a) - representação da média anual referente a 30 anos de dados climáticos. Balanço Hídrico Sequencial (b) - representação em escala decencial (a cada 10 dias) dentro de cada mês do período de cultivo (julho de 2011 a julho de 2012).

O balanço hídrico climatológico possui a função de indicar os melhores momentos de semeadura, o zoneamento para cultivos para determinada área, definição de períodos de seca e a identificação da capacidade hídrica da área (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

O experimento foi instalado em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média (EMBRAPA, 2013), e as análises químicas e granulométricas do solo foram feitas segundo metodologia de Raij et al. (2001) e Camargo et al. (2009), respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1 - Análises química e granulométrica do solo da área experimental Fazenda Santo Antonio, Itajobi - SP (2011).

Profundidade (m)	pH	M.O. ^a g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	CTC ^b	T ^c	V ^d %
	CaCl ₂			-----mmolc dm ⁻³ -----						
0,00–0,20	6,1	10,0	5,0	1,1	29,0	13,0	10,0	42,3	52,3	81
0,20–0,40	5,6	10,0	4,0	0,9	25,0	9,0	12,0	34,8	46,8	74
Granulometria										
Profundidade (m)	Argila		Silte		Areia Fina		Areia Grossa			
	----- g kg ⁻¹ -----									
0,00–0,20	209		40		464		287			

Legenda: M.O.^a: matéria orgânica do solo, CTC^b: capacidade de troca catiônica, T^c: CTC + (H+Al), V^d: saturação por bases.

1.1.2 Tratamentos e variedade cultivada

Os tratamentos basearam-se nas recomendações de fósforo para o estado de São Paulo, sugeridos por Spironello et al. (1997), que apresentam como referência a dose de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅. O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso em esquema fatorial 3x4x2, tendo três fontes de P: superfosfato triplo - SFT (41% de P₂O₅ em ácido cítrico), fosfato natural reativo Bayóvar- FNB (14% de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico), e fosfato natural de Araxá - FNA (4% de P₂O₅ em ácido cítrico); quatro doses de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico (0, 90, 180 e 360 kg ha⁻¹), na presença e ausência da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹ em base seca) com três repetições.

Para as adubações de plantio e cobertura foram aplicadas as recomendações de Spironello et al. (1997), no plantio empregou-se 151,1 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, 204,4 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 24,8 kg ha⁻¹ sulfato de zinco. Na adubação de cobertura aplicou-se 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio (uréia) e 160 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio).

A torta de filtro apresentou as seguintes características químicas e teor de matéria orgânica, conforme Alcarde (2009) e Walkley; Black (1934), obtendo-se: N(total): 3,4 g kg⁻¹; P₂O₅ (total): 8,2 g kg⁻¹; P₂O₅ (solúvel ácido cítrico 2%): 7,8 g kg⁻¹; K₂O: 2,2 g kg⁻¹; CaO: 12,2 g kg⁻¹ e para o teor de matéria orgânica de 304,7 g kg⁻¹.

Adicionou-se o aditivo BioPack^{sc}®, (contendo ácidos orgânicos e microrganismos fosfolubilizadores) na torta de filtro. Aplicou-se 800 mL do produto para compostagem de oito toneladas de torta de filtro. Os tratamentos e a adubação básica de plantio foram adicionados e homogeneizados, após a sulcação foram depositados na profundidade de 0,30 m. Quanto ao manejo fitossanitário, não houve presença de pragas de solo ou plantas invasoras.

Com 112,5 m², cada parcela compreendia cinco linhas de 1,5 m de distância entre as linhas, com 15 m de comprimento cada, foi utilizado para fins de avaliação, apenas a área útil de 67,5 m², que corresponde as três linhas centrais. A lâmina de irrigação de salvamento, no valor de 80 mm de água foi aplicada em área total de cada parcela.

1.1.3 Análise do solo, nutricional e de atividade de fosfatase ácida em folhas de cana-de-açúcar

A amostragem de solo, ocorreu aos seis meses após o plantio, na linha de plantio, na camada de 0-20 e 20-40 cm, a partir de 12 pontos aleatórios na área útil de cada parcela, os teores de P disponível foram determinados pelo método da resina (RAIJ et al., 2001). Na folha +1 foi realizada a avaliação nutricional alternativa aos seis meses, de 12 plantas por parcela, determinando-se a atividade da fosfatase ácida foliar na cana-de-açúcar (PIZAURO et al., 1988).

Aos quatro e oito meses realizou-se a coleta de 15 folhas +1 para determinação dos teores de P na planta, em que se utilizou o terço médio de cada folha amostrada para cada parcela, segundo metodologia de Miyazawa et al. (2009) e Raij; Cantarella (1997). Após higienização das amostras, foram acondicionadas em sacos de papel e dispostas em estufa a 65° C até atingirem peso constante e, foram moídas em moinho tipo Willey.

No momento da colheita, aos 12 meses, foi feito o cálculo do acúmulo de P na folha, no colmo e na parte aérea, obtido a partir da multiplicação do valor da matéria seca e do teor do nutriente de cada compartimento da planta.

1.1.4 Análise da produção de colmos e de produtividade da água na cultura da cana-de-açúcar

Aos 12 meses, na colheita coletaram-se vinte colmos nos três sulcos centrais de plantio de cada parcela, separando-se os colmos das folhas. Em seguida, procedeu-se a pesagem dos colmos correspondente a cada parcela e realizou-se o cálculo das médias de produtividade de colmos, ainda, no momento da colheita avaliou-se TCH - Toneladas de Colmo por Hectare (Mg ha^{-1}), de acordo com Consecana (2015).

A produtividade da água na cultura é uma importante avaliação da relação entre aplicação da água/precipitação e produção agrícola. Para obtenção da produtividade da água na cultura (PA_c) de cana-de açúcar, foram inseridos os dados de produção de colmos na seguinte equação:

$$PA_c = \frac{Pc}{ETc \text{ ou } (P+I)} \quad (1)$$

onde, PA_c : produtividade da água na cultura (kg mm, L, m^{-3}), Pc : produção de colmos (Mg ha^{-1}), ETc : evapotranspiração da cultura, P : precipitação pluviométrica, I : irrigação.

1.1.5 Aplicação da modelagem matemática *fuzzy*

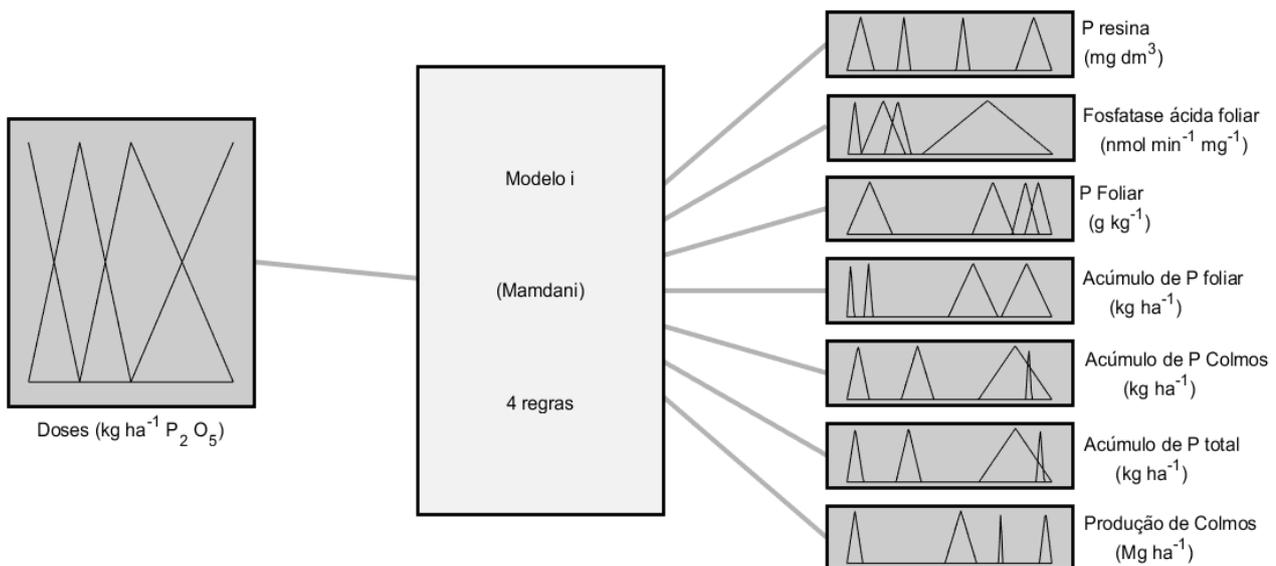
O uso da modelagem *fuzzy* teve como objetivo descrever os efeitos das doses de P, nas fontes de P (presença e ausência da torta de filtro) sobre a fertilidade do solo, nutrição da planta, na atividade bioquímica da cultura, relacionando ao rendimento final.

Deve-se ressaltar que, foram desconsideradas as variáveis P resina (0-20 cm) e teor foliar de P (aos quatro meses) - PF pois não apresentaram diferença significativa, portanto, consideraram-se as seguintes variáveis como objeto de avaliação: P resina (20 - 40 cm) – P res (mg dm^{-3}), P foliar (aos 8 meses) - PF (g kg^{-1}), acúmulo de P foliar - APF (kg ha^{-1}), acúmulo de P colmos - APC (kg ha^{-1}) e acúmulo de P total - APT (kg ha^{-1}), atividade da fosfatase ácida foliar - FAF ($\text{nmol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$) e toneladas de colmos ha^{-1} - TCH (Mg ha^{-1}).

Como o modelo representa fenômenos agrícolas, tem-se a seguinte notação: $f: X \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^7$, onde x é o conjunto das doses de P, \mathbb{R} é o conjunto dos números reais, em que x representa a dose de P na fonte de P (na presença e ausência de torta de filtro) e $Y = (Y_1, \dots, Y_7)$, são as médias dos valores das variáveis P res, PF, APF, APC, APT, FAF e TCH, respectivamente.

Para este sistema baseado em regras *fuzzy* (SBRF), ocorreu os seguintes processos: definição de um processador de entrada – fuzzificador, escolha de um conjunto de regras linguísticas, seleção de método de inferência e um processador de saída – defuzzificador, resultando em uma saída pertencente aos números reais (Figura 4).

Figura 4 - Sistema baseado em regras *fuzzy* (SBRF) da cana-de-açúcar com variável de entrada (doses de P), sete variáveis de saída (fertilidade do solo, nutricional e bioquímica da planta e produtividade).



Onde, o i varia do modelo 1 ao 6, sendo que: Modelo 1 (SFT), Modelo 2 (FNB), Modelo 3 (FNA), Modelo 4 (FNA⁺), Modelo 5 (FNB⁺) e modelo 6 (FNA⁺). O SBRF do presente trabalho é descrito pela seguinte função $F: X \rightarrow \mathbb{R}^7$, tal que $F(x) = (f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x), f_5(x), f_6(x), f_7(x))$, onde o modelo representa o domínio das avaliações sob efeito das doses de P nas fontes de P (SFT; FNB; FNA sob presença e ausência da torta de filtro), no qual o contradomínio \mathbb{R}^7 representa as sete variáveis de resposta avaliadas no experimento.

1.1.6 Conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada e saída

A variável de entrada do SBRF elaborado foi doses de P, sendo definido quatro funções de pertinência denominadas D0 - Testemunha (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅), D90 - Baixo (90 kg ha⁻¹ de P₂O₅), D180 - Médio (180 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e D360 - Alto (360 kg ha⁻¹ de P₂O₅). As funções de pertinência foram feitas de modo que as doses de P (0, 90, 180 e 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅) possuísem grau de pertinência igual a 1 em relação aos quatro conjuntos *fuzzy* (D0, D90, D180 e D360), e também de modo a que em tais pontos, todos demais conjuntos *fuzzy* tivessem grau de pertinência 0. A Tabela 2 ilustra os parâmetros da função de pertinência da variável de entrada doses de P do modelo.

Tabela 2 - Funções pertinentes da variável de entrada doses de P.

Doses de P		
Conjuntos <i>fuzzy</i>	Tipo	Delimitadores
D0	Triangular	[-90 0 90]
D90	Triangular	[0 90 180]
D180	Triangular	[90 180 360]
D360	Triangular	[180 360 540]

Legenda: D0- Testemunha (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅), D90 - Baixo (90 kg ha⁻¹ de P₂O₅), D180 - Médio (180 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e D360 - Alto (360 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

Denotando-se por p_i , $i=1, \dots, 4$, as quatro doses adotadas de P, isto é, $p_1=0$, $p_2=90$, $p_3=180$ e $p_4=360$, pode-se escrever genericamente os delimitadores dos conjuntos *fuzzy* da variável de entrada da seguinte forma:

$$[p_{i-1} \ p_i \ p_{i+1}], \quad i=1,2,3,4,$$

com $p_0 = p_1 - (p_2 - p_1) = 2p_1 - p_2$ e $p_5 = p_4 + (p_4 - p_3) = 2p_4 - p_3$.

As funções de pertinência das variáveis de saída também foram construídas de forma triangular, agora visando ter um maior controle frente ao fato de o valor médio de cada tratamento ter exatamente grau de pertinência 1 ao conjunto *fuzzy* associado. Isso, associada à uma estratégia apropriada de base de regras, acarreta num melhor ajuste matemático da curva que relaciona a variável de entrada com cada uma das variáveis de saída.

A variáveis de saída são dadas por: P resina (20 - 40 cm) - P res (mg dm⁻³); P foliar (aos 8 meses) - FP (g kg⁻¹); acúmulo de P foliar - APF (kg ha⁻¹); acúmulo de P colmos - APC (kg ha⁻¹); acúmulo de P total - APT (kg ha⁻¹); atividade da fosfatase ácida foliar - FAF (nmol min⁻¹ mg⁻¹); toneladas de colmos ha⁻¹ - TCH (Mg ha⁻¹).

Além disto, cada conjunto *fuzzy* de cada variável de saída tem seus delimitadores gerados pela média (m) e desvio-padrão (d) dos tratamentos associados, da forma:

$$[m-d \quad m \quad m+d]$$

Tal metodologia também foi adotada por Choueri (2018); Boso (2018) e Cremasco (2018).

A Tabela 3 apresenta os delimitadores de todas funções de pertinência de todos 6 modelos, enquanto que as Figuras 5 a 10 contém tais funções de pertinência.

Tabela 3 - Delimitadores de todas funções de pertinência dos 6 modelos (SFT, FNB, FNA, SFT+, FNB+ e FNA+).

Modelo	C _i	Pr	FA	PF	APF	APC	APT	TCH	
1	SFT	1	[5,5 6,7 7,8]	[178,6 180,7 182,8]	[1,30 1,34 1,37]	[0,30 0,35 0,41]	[5,1 5,7 6,2]	[5,5 6,0 6,5]	[102,8 103,4 104,0]
		2	[9,8 10,3 10,9]	[182,7 189,7 196,7]	[1,49 1,53 1,56]	[0,55 0,62 0,68]	[7,7 8,5 9,2]	[8,4 9,1 9,8]	[110,2 111,4 112,6]
		3	[14,8 15,3 15,9]	[190,0 194,3 198,5]	[1,56 1,58 1,60]	[1,79 2,16 2,52]	[11,4 13,1 14,8]	[13,2 15,3 17,4]	[114,3 114,5 114,6]
		4	[19,8 21,3 22,9]	[201,9 222,6 243,3]	[1,58 1,60 1,62]	[2,57 2,95 3,32]	[13,6 13,7 13,9]	[16,5 16,7 16,9]	[117,4 117,9 118,4]
2	FNB	1	[5,5 6,7 7,8]	[182,1 188,6 195,2]	[1,30 1,34 1,37]	[0,30 0,35 0,41]	[5,1 5,7 6,2]	[5,5 6,0 6,5]	[102,8 103,4 104,0]
		2	[7,8 8,3 8,9]	[190,7 193,1 195,4]	[1,32 1,43 1,53]	[0,34 0,44 0,53]	[6,4 6,6 6,8]	[6,8 7,0 7,3]	[105,1 106,0 106,9]
		3	[7,8 9,3 10,9]	[189,6 196,4 203,1]	[1,40 1,44 1,47]	[1,10 1,29 1,47]	[8,0 8,0 8,1]	[9,2 9,3 9,5]	[108,7 109,3 109,8]
		4	[12,0 13,0 14,0]	[201,9 222,6 243,3]	[1,49 1,50 1,52]	[1,62 1,74 1,87]	[9,1 9,7 10,2]	[10,8 11,4 12,0]	[111,1 112,1 113,2]
3	FNA	1	[5,5 6,7 7,8]	[188,9 194,7 200,5]	[1,30 1,34 1,37]	[0,30 0,35 0,41]	[5,1 5,7 6,2]	[5,5 6,0 6,5]	[102,8 103,4 104,0]
		2	[6,0 7,0 8,0]	[190,2 196,2 202,2]	[1,30 1,35 1,39]	[0,35 0,44 0,53]	[6,0 6,1 6,1]	[6,4 6,5 6,6]	[103,7 104,6 105,6]
		3	[8,0 9,0 10,0]	[200,5 200,9 201,2]	[1,34 1,38 1,41]	[0,52 0,61 0,70]	[6,5 6,9 7,4]	[7,1 7,5 8,0]	[105,0 105,7 106,3]
		4	[10,0 11,0 12,0]	[201,9 222,6 243,3]	[1,41 1,42 1,43]	[1,21 1,51 1,81]	[6,8 7,1 7,4]	[8,3 8,6 9,0]	[106,5 107,7 108,9]
4	SFT+	1	[14,5 15,7 16,8]	[137,6 147,8 157,9]	[1,53 1,56 1,59]	[1,28 1,44 1,60]	[7,5 7,8 8,0]	[9,1 9,2 9,3]	[107,2 107,7 108,1]
		2	[16,8 17,3 17,9]	[168,4 175,6 182,8]	[1,57 1,58 1,58]	[2,55 2,71 2,86]	[8,4 9,9 11,4]	[11,1 12,6 14,1]	[115,9 120,8 125,7]
		3	[19,8 20,3 20,9]	[174,1 177,2 180,4]	[1,63 1,66 1,69]	[2,74 3,28 3,82]	[13,6 14,0 14,4]	[17,1 17,3 17,5]	[120,2 130,6 141,0]
		4	[24,6 26,7 28,7]	[183,4 185,9 188,4]	[1,70 1,70 1,71]	[2,83 3,45 4,07]	[14,1 14,6 15,0]	[17,3 18,0 18,7]	[125,9 138,6 151,3]
5	FNB+	1	[14,5 15,7 16,8]	[178,0 181,4 184,8]	[1,53 1,56 1,59]	[1,28 1,44 1,60]	[7,5 7,8 8,0]	[9,1 9,2 9,3]	[107,2 107,7 108,1]
		2	[15,8 16,3 16,7]	[179,1 185,6 192,1]	[1,54 1,57 1,60]	[1,89 2,09 2,28]	[8,6 8,8 8,9]	[10,5 10,8 11,1]	[96,2 109,8 123,3]
		3	[16,0 17,0 18,0]	[183,4 185,9 188,4]	[1,58 1,60 1,62]	[1,71 2,22 2,73]	[8,8 9,0 9,3]	[11,0 11,3 11,5]	[109,3 113,2 117,1]
		4	[17,8 17,9 17,9]	[182,9 188,8 194,8]	[1,63 1,65 1,67]	[1,97 2,47 2,97]	[9,8 11,4 13,0]	[11,8 13,9 15,9]	[107,9 115,2 122,5]
6	FNA+	1	[14,5 15,7 16,8]	[181,9 184,5 187,2]	[1,53 1,56 1,59]	[1,28 1,44 1,60]	[7,5 7,8 8,0]	[9,1 9,2 9,3]	[107,2 107,7 108,1]
		2	[13,4 16,0 18,6]	[183,1 185,6 188,1]	[1,54 1,57 1,60]	[1,48 1,72 1,96]	[7,6 7,9 8,3]	[9,1 9,6 10,2]	[106,5 108,5 110,5]
		3	[16,1 16,7 17,3]	[183,4 185,9 188,4]	[1,56 1,58 1,60]	[2,00 2,00 2,00]	[8,0 8,4 8,8]	[10,0 10,4 10,8]	[107,6 109,6 111,6]
		4	[16,6 17,0 17,3]	[184,5 189,9 195,3]	[1,57 1,60 1,63]	[2,15 2,27 2,38]	[7,6 9,9 12,3]	[9,9 12,2 14,5]	[111,0 111,1 111,2]

Legenda: SFT=superfosfato triplo; FNB=fosfato natural reativo Bayóvar; FNA=fosfato natural de Araxá; O símbolo "+" indica a respectiva fonte de P na presença da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹, base seca).

Figura 5 - Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do Modelo 1 (SFT).

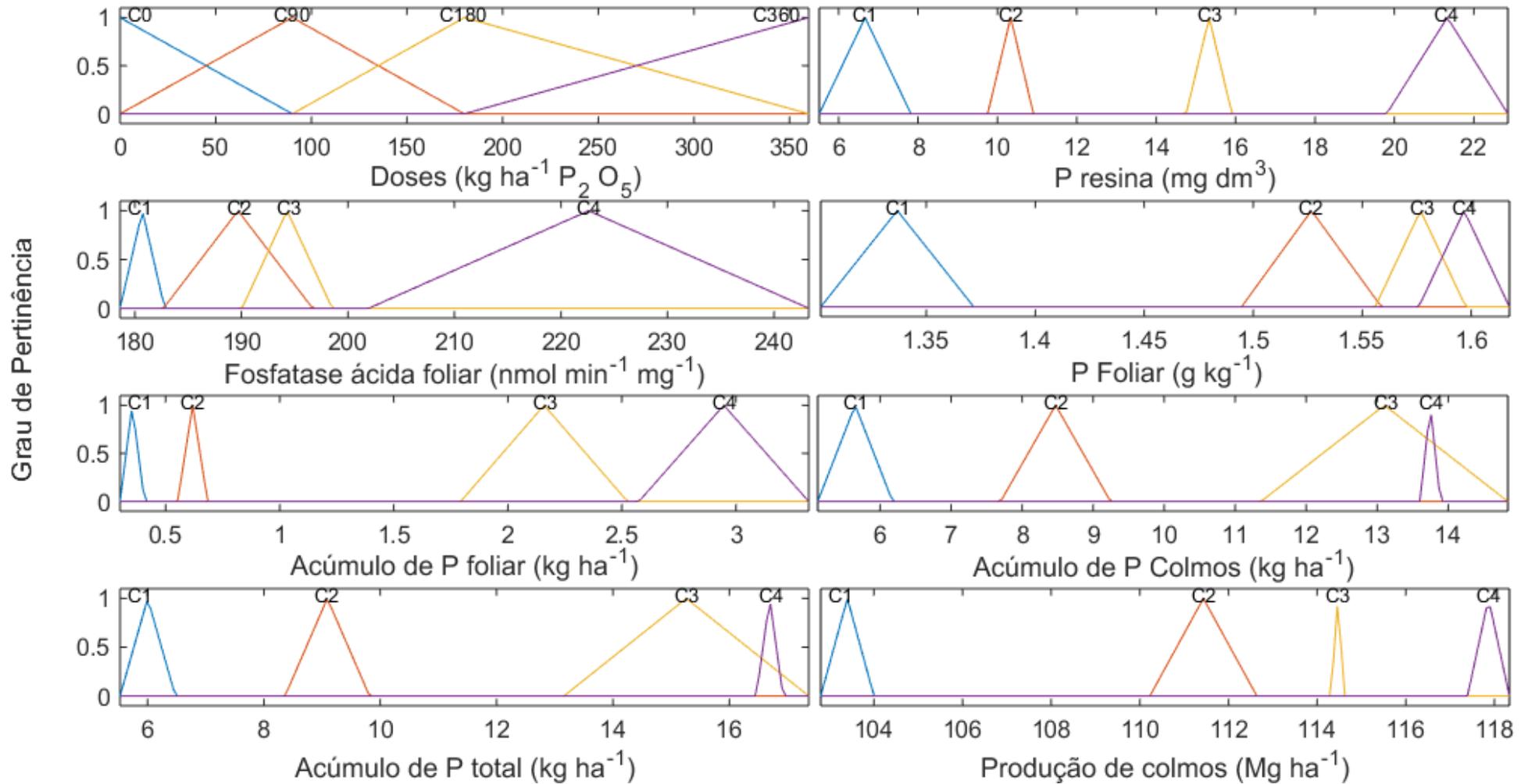


Figura 6 - Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do Modelo 2 (FNB).

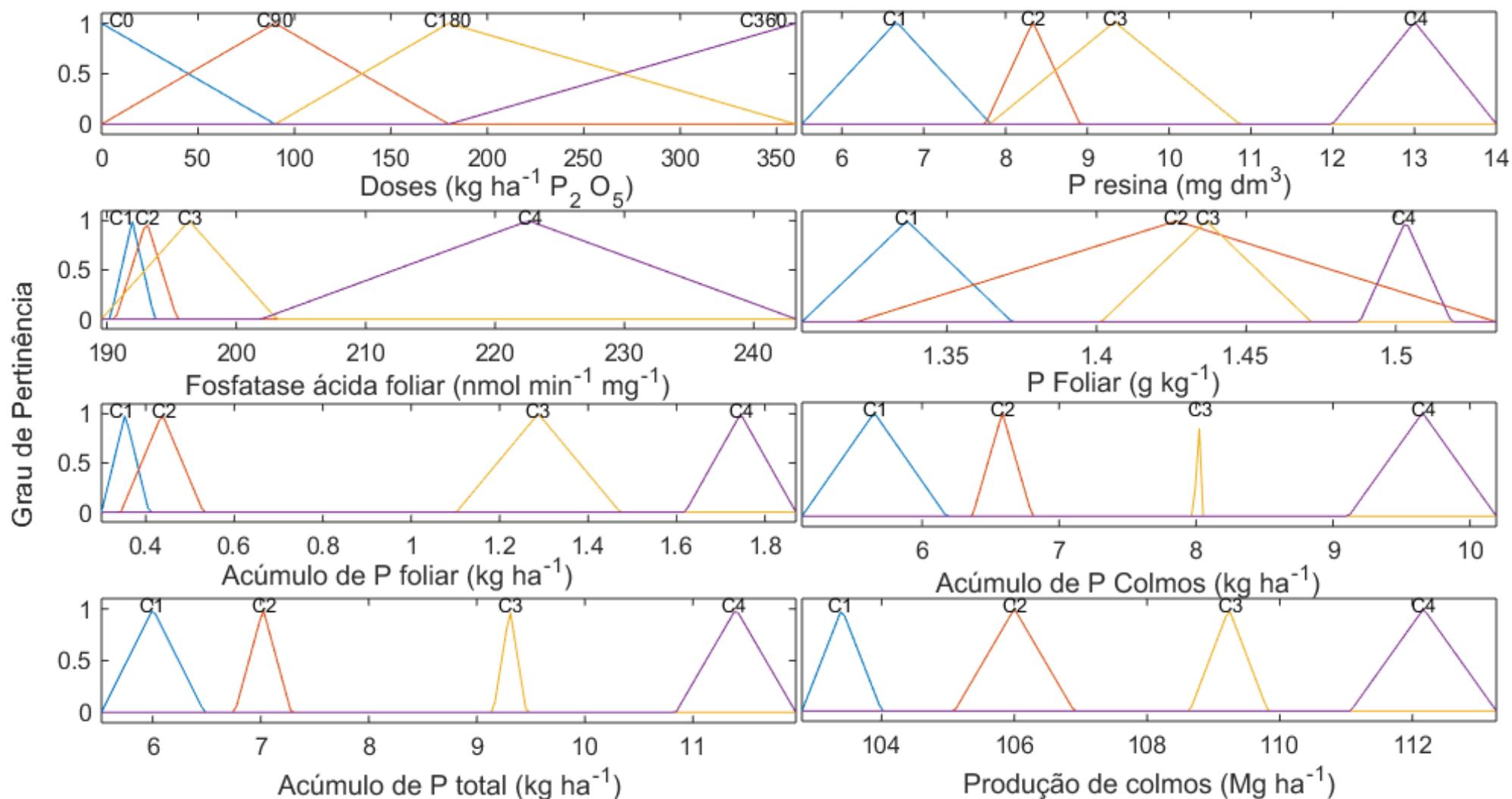


Figura 7 - Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do Modelo 3 (FNA).

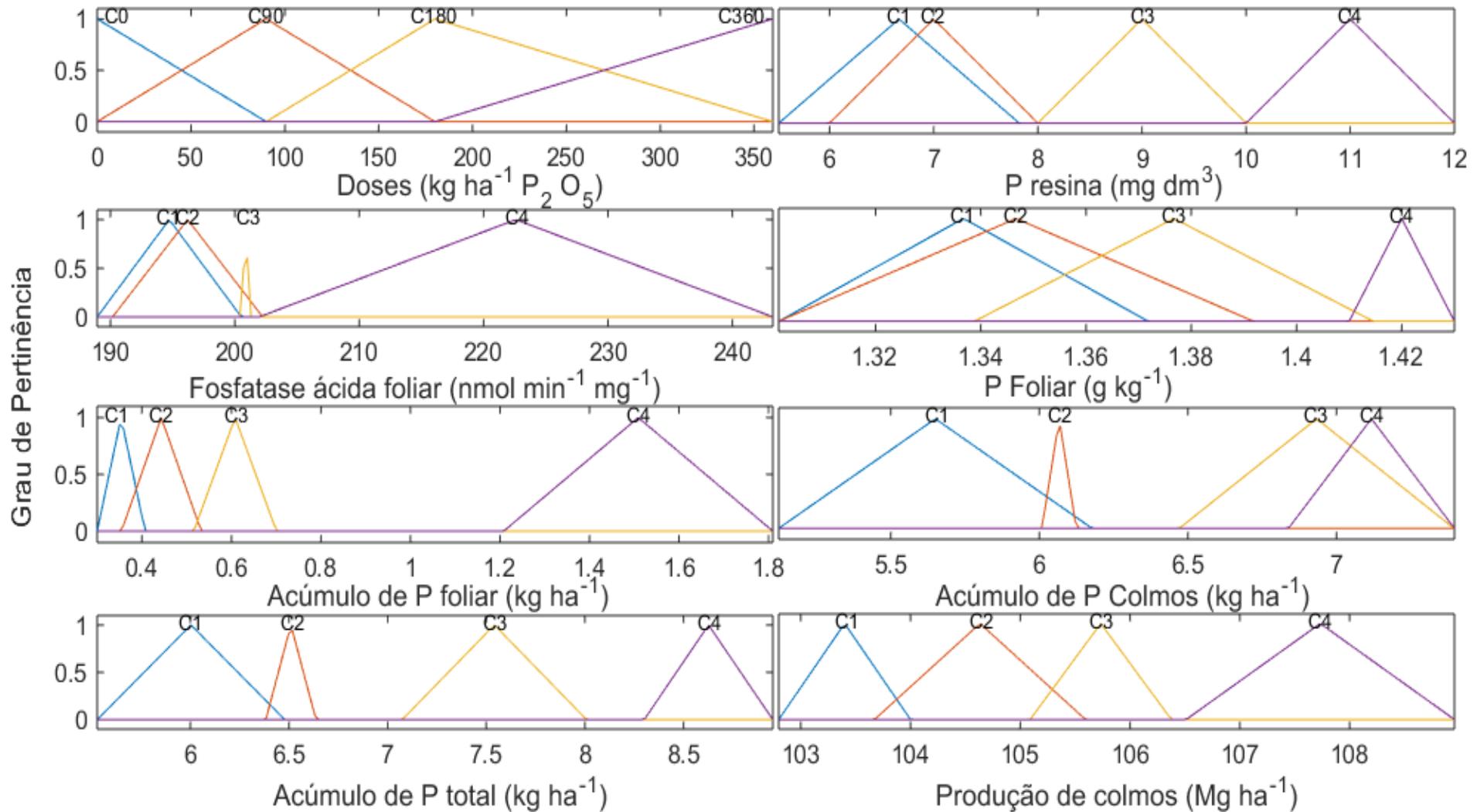


Figura 8 - Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do Modelo 4 (SFT+).

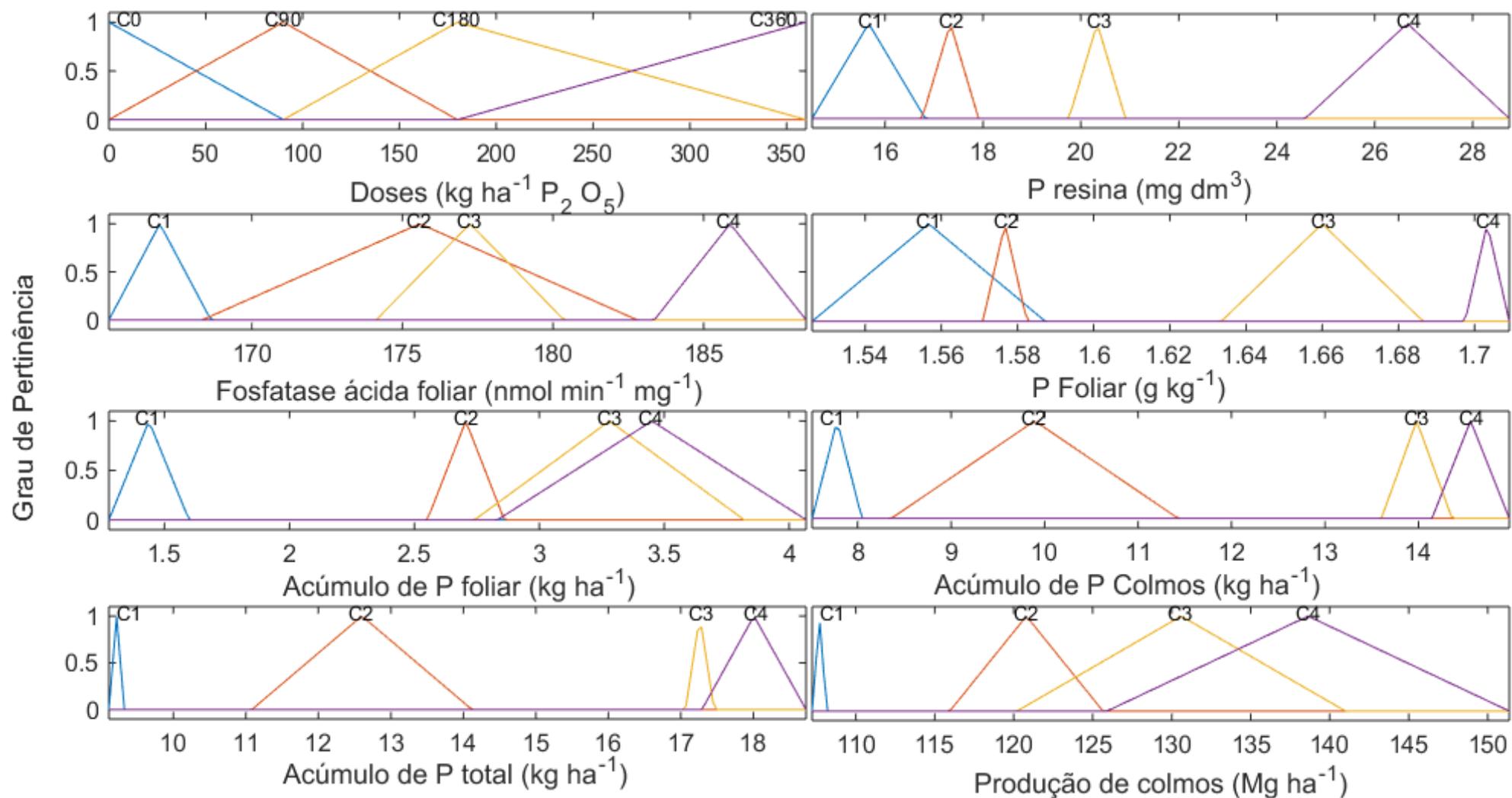


Figura 9 - Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do Modelo 5 (FNB+).

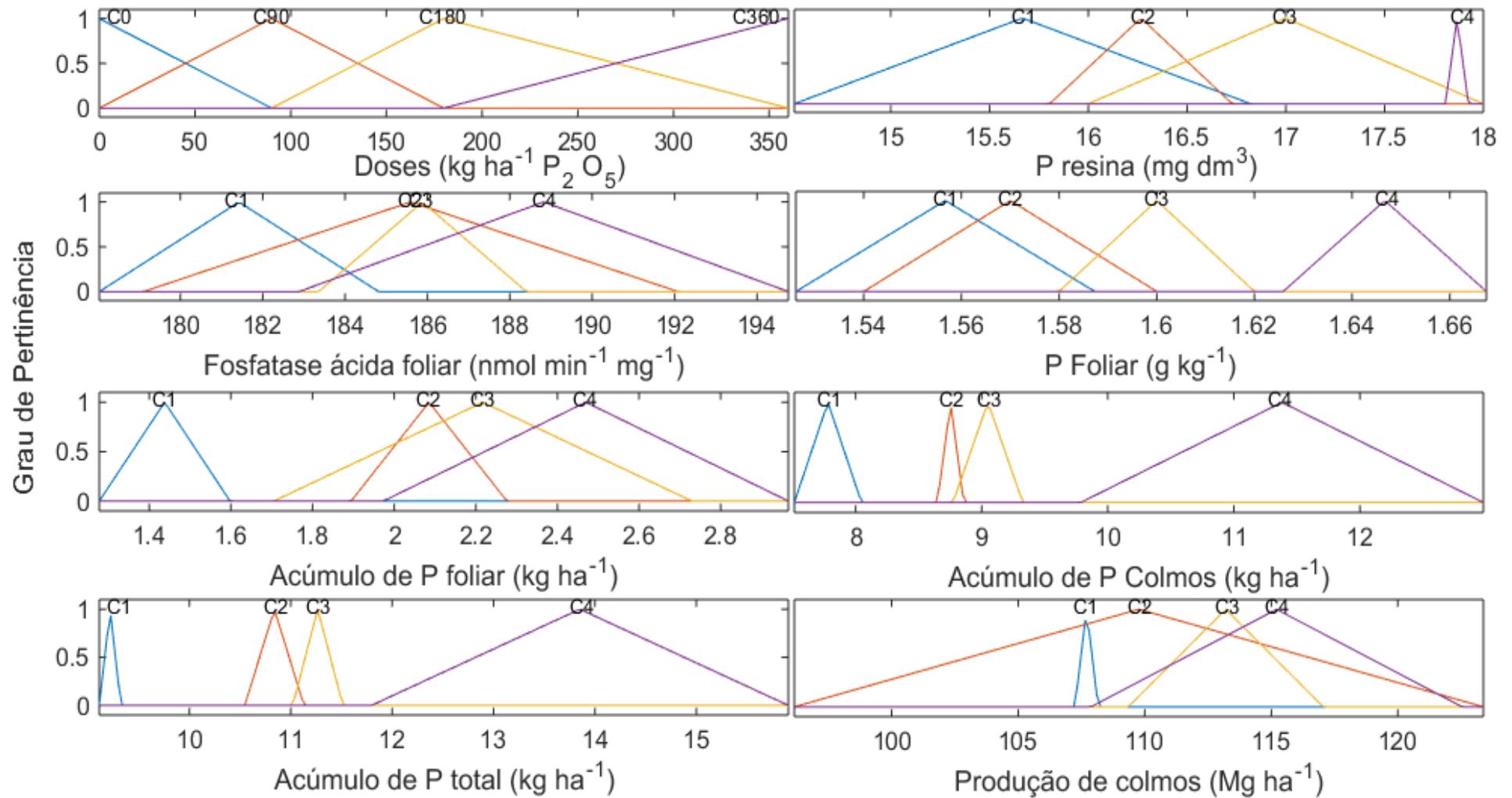
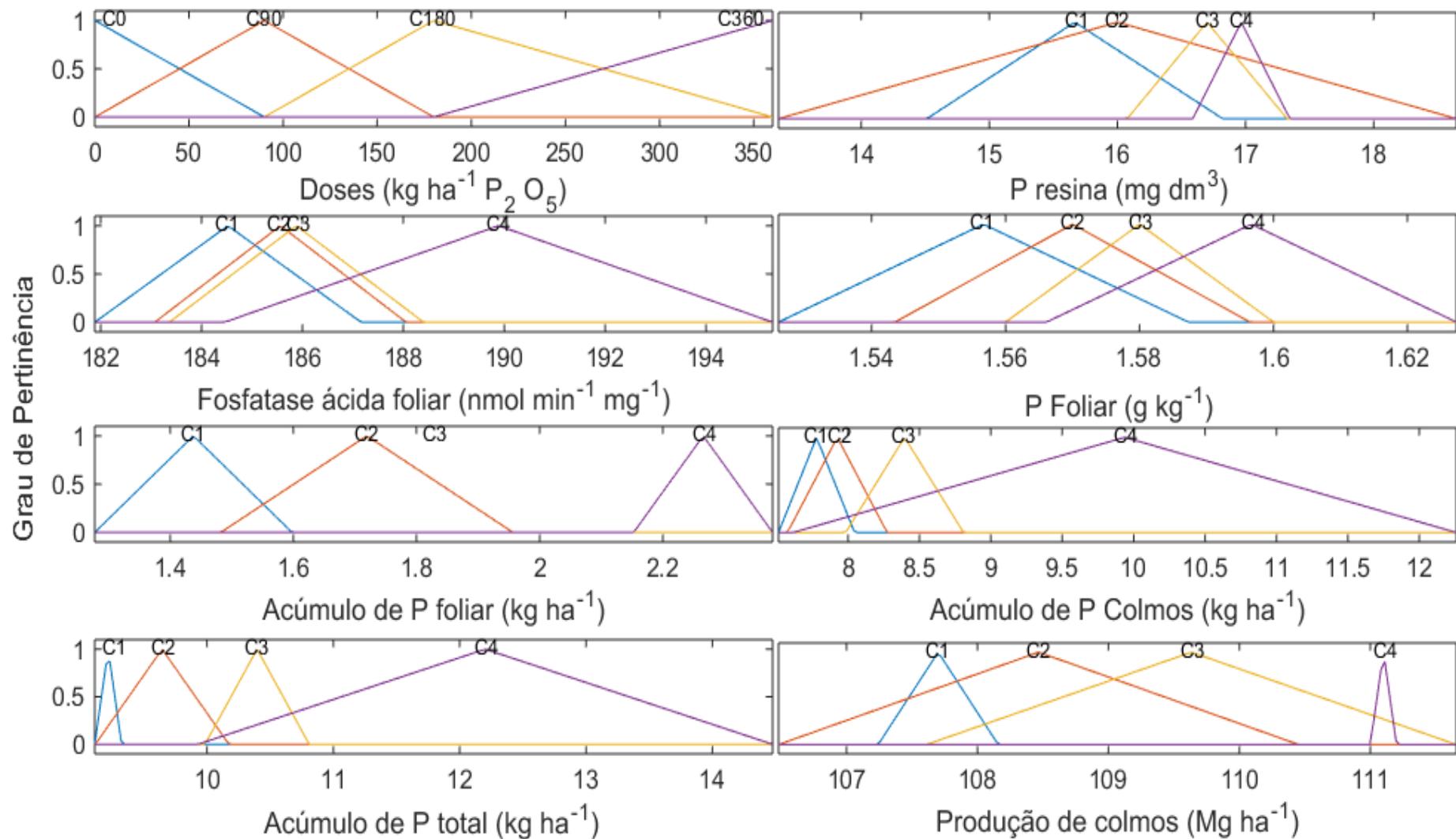


Figura 10 - Funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída do Modelo 6 (FNA+).



1.1.7 Base de regras

O SBRF considerou quatro regras para cada modelo, sendo seis modelos (SFT, FNB, FNA, SFT+, FNB+, FNA+) elaborados, seguindo metodologia proposta por Choueri (2018); Boso (2018) e Cremasco (2018). A Tabela 4 mostra os pontos da variável de entrada doses de P e as combinações dos conjuntos *fuzzy*.

Tabela 4 - Combinação da variável de entrada doses de P com os pontos de grau de pertinência 1 associados ao conjunto *fuzzy* para sistema de bases de regras *fuzzy* (SBRF).

Doses de P	
Conjuntos <i>fuzzy</i>	Ponto com grau de pertinência 1 associado
D0	0
D90	90
D180	180
D360	360

Legenda: D0 - Testemunha (0 kg ha⁻¹ de P₂O₅), D90 - Baixo (90 kg ha⁻¹ de P₂O₅), D180 - Médio (180 kg ha⁻¹ de P₂O₅) e D360 - Alto (360 kg ha⁻¹ de P₂O₅).

1.1.8 Metodologia de inferência, *defuzzificação* e softwares utilizados

O método de inferência e *defuzzificação* empregados no trabalho foram de Mamdani (MAMDANI; ASSILIAN, 1975), pois é a técnica mais usual na literatura (ROSS, 2010). No processo de *defuzzificação*, ou seja, quando há conversão do valor linguístico da variável (obtido pelas regras *fuzzy*), em um valor real, foi aplicado o Método do Centro de Gravidade, que conforme Cremasco (2008) é a média ponderada, em que $\mu_a(x)$ atua como peso do valor x , sendo estimado pela equação:

$$\bar{Z} = \frac{\sum_x \mu_a(x)x}{\sum_x \mu_a(x)} \quad (2)$$

Na criação do SBRF, usou-se planilhas eletrônicas e o *software* Matlab® - *Fuzzy Logic Toolbox* (licença obtida pela Faculdade de Ciências e Engenharia – FCE/UNESP, Campus de Tupã - SP) para obtenção das funções de pertinência representação bidimensional das respostas do SBRF.

Os resultados foram apresentados em sete figuras de respostas para a variável de entrada doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro).

O $Y_{\text{observado médio}}$ de todos os modelos se apresenta iguais aos Y_{fuzzy} , onde os $Y_{\text{observado médio}}$ representam os valores médios de cada variável em cada nível de x.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Produtividade da água, modelagem *fuzzy*, comportamento do clima e tratamentos aplicados: efeitos nas variáveis estudadas

Na Tabela 5, é apresentada a produtividade da água (PA_c) da produção de colmos de cana-de-açúcar. Não houve interações entre os tratamentos, apresentando efeito significativo, a torta de filtro e fontes de P.

Tabela 5 - Produtividade da água (PA_c) de colmos de cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento e adubação fosfatada.

Tratamentos	Produção de colmos (kg m^{-3})
Torta de filtro (T)	
Presença	30,65a
Ausência	26,45b
Teste F	2,13**
Fontes (F)	
Superfosfato Triplo	30,45a
Fosfato Bayóvar	25,68b
Fosfato de Araxá	23,89c
Teste F	6,79**
Doses (D)	
0 kg ha^{-1} de P_2O_5	20,52
90 kg ha^{-1} de P_2O_5	22,72
180 kg ha^{-1} de P_2O_5	25,88
360 kg ha^{-1} de P_2O_5	28,44
Teste F	3,86 ^{NS}
(T) x (F)	5,28 ^{NS}
(T) x (D)	0,51 ^{NS}
(F) x (D)	2,75 ^{NS}
(T) x (F) x (D)	5,6 ^{NS}
C.V. (%)	4,6

Legenda: ** e ^{NS} significativo a 1% e não significativo, respectivamente.

A observação de maiores produções de colmos, na presença de torta de filtro e na fonte que apresenta maior teor de P disponível à planta (superfosfato triplo), reforça a capacidade da matéria orgânica em reter água, com teores apreciáveis de

P. O P também favorece o desenvolvimento do sistema radicular, perfilhamento e parte área (ROSSETTO et al., 2010).

Estudos sobre a produtividade da água na cultura de cana-de-açúcar, são incipientes no Brasil (MASCHIO, 2011). O mesmo autor, avaliando a produtividade da água em diversas variedades de cana-de-açúcar, sob irrigação plena e com 70% de reposição, observou valores entre 17,17 e 29,21 kg m⁻³ de colmos, para a variedade RB86 7515, obteve-se, 24,88 e 27,31 kg m⁻³ de colmos, respectivamente.

Na literatura internacional, há vários relatos de produtividade de água no rendimento de colmos, citando-se, Kingston (1994), com valores entre 8,37 a 20,94 kg m⁻³ de colmos, Inman-Bamber et al. (1999) que constataram produção de colmos no nordeste australiano na faixa de 19 a 27 kg m⁻³ ou os menores valores obtidos por Robertson; Muchow (1994) entre 4,8 12,1 kg m⁻³ de colmos.

De todo modo, essa grande variação de resultados, pode representar todas as diferentes condições da área cultivada, como manejo empregado, genótipo cultivado, textura do solo, teor de matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes e a forma de irrigação.

Ressalta-se, que no presente experimento, a água da irrigação de salvamento, mesmo que pontualmente, deve ter sido retida na matéria orgânica contida na torta de filtro, e que associada a adubação fosfatada, potencializou os efeitos da água, seja de irrigação ou de precipitação pluviométrica, em todas as variáveis analisadas.

Sob o aspecto climático, o período de 2011-2012 foi marcado pela atuação do fenômeno atmosférico *El Niño* que foi classificado como tipo MIX (aquecimento das águas leste e central do Oceano Pacífico), no entanto com intensidade fraca, contudo, no ano de 2010-2011, esse comportamento foi de moderada intensidade (KAYANO et al., 2016). O que pode ter apresentado um impacto climático maior sobre o cultivo, com consequências na produção da cultura, pois, de acordo com Souza (2017) a produção de colmos de cana-de-açúcar no estado de São Paulo sob influência de *El Niño* ou *La Niña* apresentou redução média de até 40% no período de 1980 a 2010.

Durante o experimento, o cultivo de cana-de-açúcar apresentou dois momentos climáticos extremos (Figura 3), quando no início do plantio, ocorreu uma intensa deficiência hídrica, sendo necessário a realização de irrigação de salvamento, e dois meses antes da colheita houve uma grande precipitação pluviométrica, esses momentos opostos, podem ter resultado em respostas negativas da cultura.

Dentre as fases da cultura de cana-de-açúcar, o perfilhamento e a de intenso crescimento (formação) são as mais suscetíveis às reduções, devido a deficiência hídrica (ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2010). Há alterações na fisiologia do transporte fotoquímico de elétrons, fotossíntese e repartição de fotoassimilados, afetando negativamente as trocas gasosas, altura das plantas, área foliar e produtividade (TAIZ; ZEIGLER, 2004; ENDRES et al., 2010; ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2010).

Deve-se ressaltar que teores adequados de umidade do solo são essenciais para que haja uma absorção satisfatória de P, pois, conforme Costa et al. (2006) a difusão é o mecanismo chave para o transporte de P às raízes, e depende do volume de água contido no solo, distância entre o elemento e o sistema radicular, teor de P e interação P - colóide na solução do solo e temperatura do ambiente de produção. Ou seja, quando há períodos de veranico, esse fluxo que transporta o P até as raízes é descontinuado, podendo prejudicar de forma definitiva dependendo da fase fenológica.

A princípio, apresentou-se os resultados obtidos da modelagem *fuzzy* sobre a variável de entrada doses de P no sistema *fuzzy* (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro) sobre a absorção e acúmulo de P, atividade da fosfatase ácida e produtividade da cana-de-açúcar.

Com a utilização dos dados experimentais e com emprego da lógica *fuzzy*, desenvolveu-se as funções pertinentes aos conjuntos *fuzzy* das variáveis de saída (Figuras 5 a 10) descritas como: P resina (20 - 40 cm) – P res (mg dm⁻³), P foliar (aos 8 meses) - PF (g kg⁻¹), acúmulo P foliar - APF (kg ha⁻¹), acúmulo P colmo - APC (kg ha⁻¹), acúmulo P total - APT (kg ha⁻¹), fosfatase ácida foliar - FAF (nmol min⁻¹ mg⁻¹) e toneladas de colmos ha⁻¹ - TCH (Mg ha⁻¹).

De acordo com a metodologia adotada, a base de regras dos 6 modelos *fuzzy* são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Representação da base de regras do sistema *fuzzy*, com conjuntos *fuzzy* D_i das variáveis de entrada e conjuntos *fuzzy* C_i das variáveis de saída.

Modelo	Conjuntos	Variáveis de Saída						
	<i>Fuzzy</i> D_i (Doses de P)	Pres	PFoliar	APF	APC	APT	FAF	TCH
SFT + torta de filtro	0	1	1	1	1	1	4	1
	90	2	2	2	2	2	3	2
	180	3	3	3	3	3	2	3
	360	4	4	4	4	4	1	4
FNB + torta de filtro	0	1	1	1	1	1	4	1
	90	2	2	2	2	2	3	2
	180	3	3	3	3	3	2	3
	360	4	4	4	4	4	1	4
FNA + torta de filtro	0	1	1	1	1	1	4	1
	90	2	2	2	2	2	3	2
	180	3	3	3	3	3	2	3
	360	4	4	4	4	4	1	4
SFT	0	1	1	1	1	1	4	1
	90	2	2	2	2	2	3	2
	180	3	3	3	3	3	2	3
	360	4	4	4	4	4	1	4
FNB	0	1	1	1	1	1	3	1
	90	2	2	2	2	2	4	2
	180	3	3	3	3	3	2	3
	360	4	4	4	4	4	1	4
FNA	0	1	1	1	1	1	3	1
	90	2	2	2	2	2	4	2
	180	3	3	3	3	3	2	3
	360	4	4	4	4	4	1	4

Desta forma, para exemplificação dos conjuntos *fuzzy* da variável P res e FAF, tem-se que: a maior dose de P, independente da fonte (presença e ausência de torta de filtro) em P res é diretamente proporcional e é inversamente proporcional na FAF.

A definição do SBRF (Tabelas 4 e 6), em que são associados os conjuntos *fuzzy* da variável de entrada com os de saída, foram calculados baseados nos valores das médias referentes a cada combinação do conjunto *fuzzy* de entrada doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro).

Salienta-se que as classificações das Tabelas 4 e 6 provavelmente são constantes, ou não apresentariam oscilações significativas se um novo experimento fosse executado sob as mesmas condições e período indicados, reforçando a relevância dos resultados.

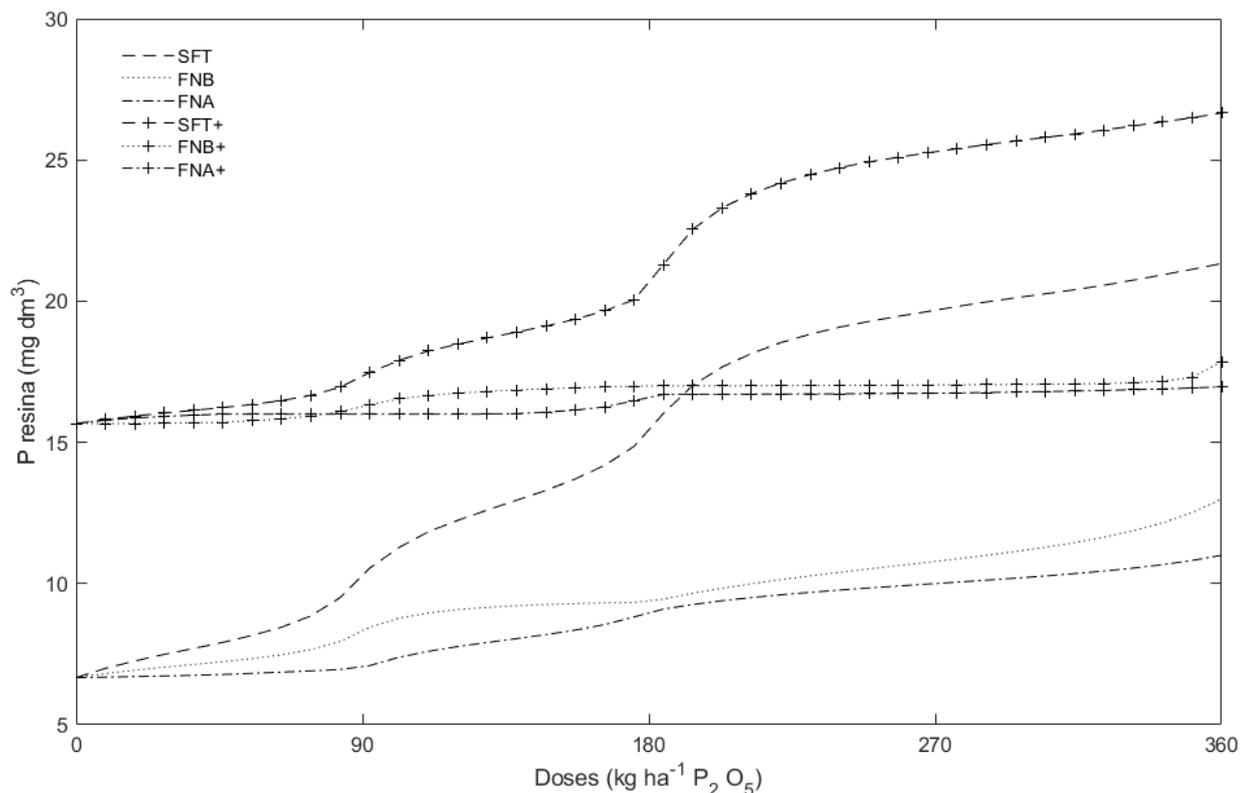
Por meio dos métodos de inferência e *defuzzificação* aplicados, gerou-se curvas de respostas das variáveis de saída, que são analisadas a seguir. Deve-se mencionar, que a origem das curvas de resposta das fontes de P na presença e ausência da torta de filtro, refere-se a parcela testemunha dentro de cada tratamento, passando exatamente sobre os pontos médios observados.

De modo geral, na presença do composto, pode-se verificar a potencial ambiguidade da função da matéria orgânica presente na torta de filtro, onde tem potencial de adsorver temporariamente o P da fonte fosfatada e ao mesmo tempo disponibiliza o nutriente contido em sua composição. Pode-se atribuir a grande capacidade de retenção de água (irrigação de salvamento) pela torta de filtro efeitos positivos em todas as variáveis estudadas.

Para a fonte SFT (superfosfato triplo) verifica-se que é mais pronunciada a variação entre as doses iniciais, esta fonte possui a maior solubilidade, havendo um crescente incremento especialmente com a elevação das doses. As fontes FNB (fosfato natural Bayóvar) e FNA (fosfato natural de Araxá), apresentam desempenho similares, com menores incrementos, que pode ser referente, a menor solubilidade imediata das fontes e a sua natureza de lenta liberação de P, associada a natureza da matéria orgânica, já mencionada.

Na Figura 11 é apresentado os teores de P res em função das doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro).

Figura 11 - Comportamento de P resina em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico cultivado com cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo - SFT⁺; fosfato natural Bayóvar - FNB⁺; fosfato natural de Araxá - FNA⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).



O comportamento das curvas de teores em P res na profundidade de 20-40 cm (Figura 11), apresentam certa semelhança na presença (+) e ausência do composto, onde deve-se notar que na ausência do composto (SFT, FNB e FNA), é destacado o perfil de solubilidade imediata de cada fonte e a interação com o solo, ressaltando-se que as menores variações dos teores de P res ocorrem nas fontes menos solúveis (FNB e FNA), especialmente nas menores doses.

Em relação a presença da torta de filtro (SFT⁺, FNB⁺ e FNA⁺), nota-se que a profundidade avaliada é a aproximada do sulco de plantio, portanto, onde houve deposição do composto, o que favoreceu maiores acréscimos nos teores de P res. De modo geral, é interessante observar que na ausência de torta de filtro, os teores de P resina são de 6,6 mg dm⁻³ e de 15,6 mg dm⁻³ na presença do composto. Observa-se que apenas a fonte SFT ou SFT⁺ apresentou teores considerados médios para a cultura, que está na faixa de 16 - 40 mg dm⁻³ (RAIJ et al., 1997), com valores de 21,3 e 26,7 mg dm⁻³ respectivamente.

Para a FNB⁺ e FNA⁺, os teores médios foram alcançados exclusivamente quando associadas a torta de filtro, com 17,8 e 16,9 mg dm⁻³ respectivamente. Os valores obtidos reforçam as características de solubilidade das fontes utilizadas, onde o SFT possui maior capacidade de liberação de P ao solo, enquanto que o FNA é a fonte menos solúvel. Contudo, Caione et al. (2015) empregando 7,5 Mg ha⁻¹ (base seca) de torta de filtro associada com as fontes de P (superfosfato triplo, fosfato natural Bayóvar e fosfato natural de Araxá) em um Argissolo Vermelho Eutrófico não constataram efeito significativo nos teores de P resina (fontes de P x torta de filtro), ocorrendo efeito relevante apenas para o uso exclusivo do composto, respectivamente com 15,2 e 6,3 mg dm⁻³ para presença e ausência da torta de filtro.

Sob este aspecto, a grande variação das características físico-químicas do ambiente produtivo, como teor de matéria orgânica, tipo de argila e textura do solo, entre outros, são decisivos para afetar a disponibilidade do nutriente. O que corrobora com a reduzida eficiência da adubação com fósforo em cana-de-açúcar, onde há aproveitamento pela planta entre 10 a 15% do fertilizante aplicado (ROSSETTO; DIAS; VITTI, 2010). Deve-se ressaltar que a dose de torta de filtro utilizada foi equivalente a 52 kg ha⁻¹ de P₂O₅, o que demonstra o potencial de complementação à fertilização fosfatada deste composto orgânico, no entanto, esse valor pode ser variável, pois depende diretamente das características edafoclimáticas do ambiente produtivo e do manejo aplicado a cultura de cana-de-açúcar que gerou a torta de filtro.

Essa oscilação pode ser verificada em Vazquez et al. (2015) que aplicando 10 Mg ha⁻¹ (base seca) de torta de filtro obtiveram uma dose potencial de 254 kg ha⁻¹ de P₂O₅, valor superior ao recomendado para a cultura no estado de São Paulo, que é de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (SPIRONELLO et al., 1997). O efeito potencializador da torta de filtro em aumentar os teores de P no solo, advém segundo Steffens et al. (2010) de que 20 a 80% do P total do solo é orgânico, ou seja, a torta de filtro possui grande capacidade de suplementar a fertilização fosfatada. Além disso, é sabido que a disponibilização de P para o solo depende da presença de matéria orgânica, não sendo conhecida outra forma para mineralização (RICHARDSON; SIMPSON, 2011).

Os mesmos autores relatam que os microrganismos podem disponibilizar até 100 mg de P kg⁻¹ solo ano⁻¹, utilizando processos de acidificação, quelação e reações de trocas catiônicas para liberar o P na forma assimilável pela planta (CHAI et al., 2011). Esses microrganismos solubilizadores de P aumentam os teores do nutriente

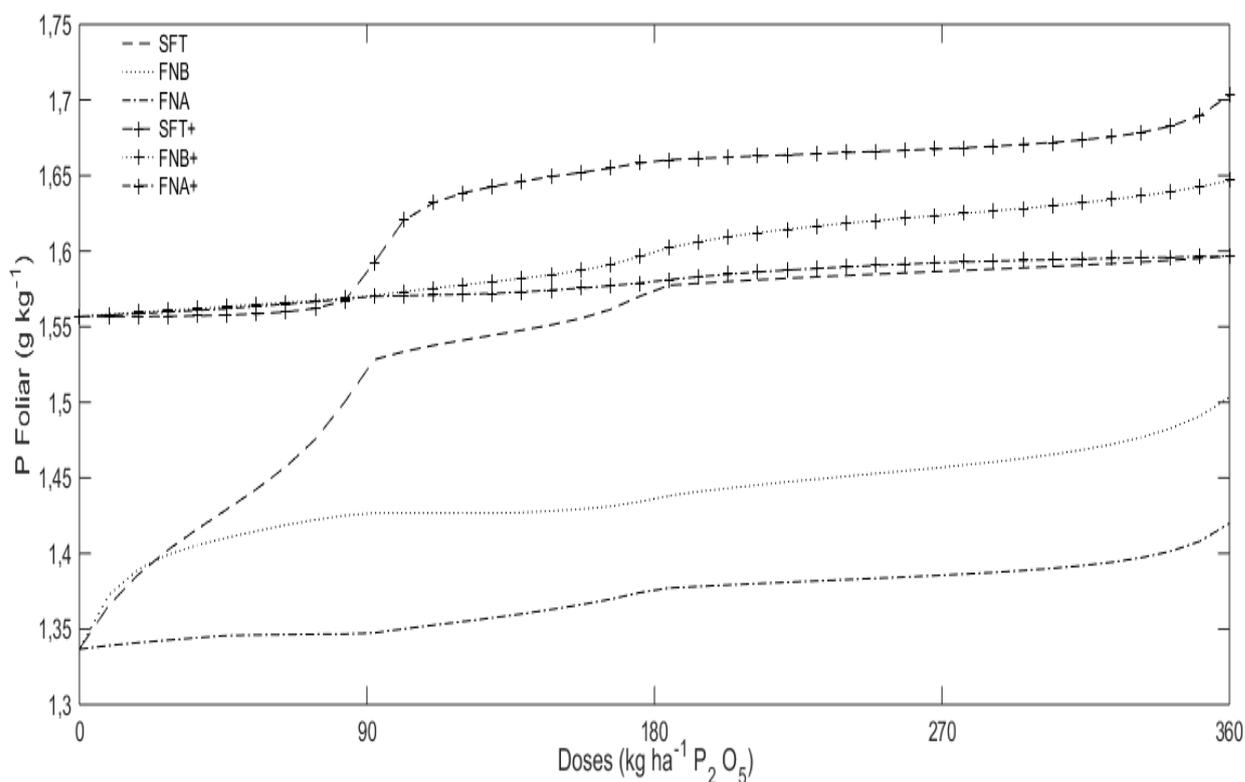
no ambiente produtivo ao atuarem nas formas inorgânicas de fósforo, que estão ligadas ao cálcio, ferro e alumínio (AWASTHI; TEWARI; NAYYAR, 2011).

Em condições de laboratório, o uso de torta de filtro em Latossolo Vermelho Distrófico promoveu acréscimo na população de microrganismos solubilizadores de fosfato, e quando associada ao fosfato de Araxá, contribuiu para elevação do teor de P solúvel no solo (GONZALEZ et al., 2014), o que representa mais uma finalidade do composto orgânico, de aumentar a presença de organismos solubilizadores de P.

A torta de filtro, como composto orgânico possui elevado potencial higroscópico, com retenção de até seis vezes o seu volume em água (ALLEONI; BEAUCLAIR, 1995), o que também explica os maiores teores de P absorvidos, visto que a presença de água na solução do solo é essencial para eficiência na absorção de nutrientes. Conforme Rossetto; Santiago (2009), cerca de 50% do P proveniente da torta de filtro é prontamente disponível, sendo que o restante será lentamente disponibilizado, o que a torna uma fonte de P com capacidade de fornecer por mais tempo o nutriente as plantas. Os autores Caione et al. (2015) e Moda et al. (2015) também observaram aumentos nos teores de P no solo quando associados a torta de filtro, o que corrobora com os dados obtidos, e Santos; Tiritan; Foloni (2012) ressaltam que, a torta de filtro pode suprir parcial ou totalmente o P mineral em cana-planta dependendo da dose recomendada.

Os teores de P no solo, geralmente influenciam o PF, estes, são mostrados na Figura 12.

Figura 12 - Comportamento de P foliar em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo – SFT⁺; fosfato natural Bayóvar – FNB⁺; fosfato natural de Araxá – FNA⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).



Os valores de PF aos oito meses na cana-de-açúcar são apresentados na Figura 12., onde verifica-se que, sob a presença da torta de filtro (SFT⁺, FNB⁺ e FNA⁺) o teor alcançado foi de 1,56 e na ausência (SFT, FNB e FNA) de 1,34 g kg⁻¹. O uso de torta de filtro proporcionou teor adequado para a cultura, que é de 1,50 - 3,0 g kg⁻¹ (RAIJ et al., 1997).

O PF apresenta comportamento crescente seja na presença e ausência do composto, no entanto, nota-se um maior aumento quando associado a torta de filtro, com valores máximos de 1,70; 1,65 e 1,60 g kg⁻¹ para SFT⁺, FNB⁺ e FNA⁺ respectivamente. Quando combinados com a torta de filtro, todas as fontes de P na maior dose apresentaram concentração adequada do nutriente para a cana-de-açúcar, já na ausência da torta de filtro, apenas SFT e FNB possibilitaram valores dentro da faixa adequada, com 1,60 e 1,50 g kg⁻¹ nessa ordem.

Pode-se inferir que os valores de PF constatados são reflexos dos incrementos nos teores de P no solo, alcançados especialmente pela associação das fontes de P e a torta de filtro, o que possivelmente apresentará efeitos nos processos fisiológicos da cana-de-açúcar, como maiores acúmulos do nutriente e aumento na produção.

A torta de filtro também é capaz de intensificar as oscilações nutricionais citadas, pois ao liberar aminoácidos que competem e saturam os canais de adsorção de P, há uma maior disponibilidade dos nutrientes para as plantas (LEE; KIM, 2007), mas a matéria orgânica presente na torta de filtro igualmente tem o potencial de adsorver o P ao formar ligantes com cátions Al, Fe e Ca adsorvidos a ela (SANYAL; De DATTA, 1991).

Podendo-se exemplificar tais afirmações, pela obtenção de teor de P foliar de $1,83 \text{ g kg}^{-1}$ (que representa um aumento de 8,4% em relação ao presente trabalho) com aplicação de 360 kg de P_2O_5 (média das fontes superfosfato triplo, fosfato natural Bayóvar e fosfato natural de Araxá) na presença de torta de filtro ($7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) em um Argissolo Vermelho Eutrófico cultivado com a variedade de cana-de-açúcar (cana-planta) CTC 15 (CAIONE et al., 2015). Também avaliando fontes e doses de P combinadas com torta de filtro, Moda et al. (2015) cultivando a variedade RB85 5453 em Latossolo e Nitossolo notaram no primeiro a ausência de efeito dos tratamentos no teor de P foliar, no segundo, contudo, sob as fontes superfosfato triplo e fosfato natural de Araxá na presença de torta de filtro houve incrementos, no entanto, menores que os observados no presente trabalho.

O uso exclusivo da torta de filtro combinada com bagaço de cana-de-açúcar triturado apresentou incrementos no teor de P foliar da variedade RB86 7515 cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo superiores quando comparados a combinação com fontes minerais (LIMA, 2011). Em contraste, a aplicação de superfosfato triplo proporcionou maiores teores de P na folha de cana-de-açúcar variedade RB75 126 cultivada em Argissolo Amarelo em relação ao combinado de torta de filtro, bagaço e cinzas (SANTOS et al., 2009).

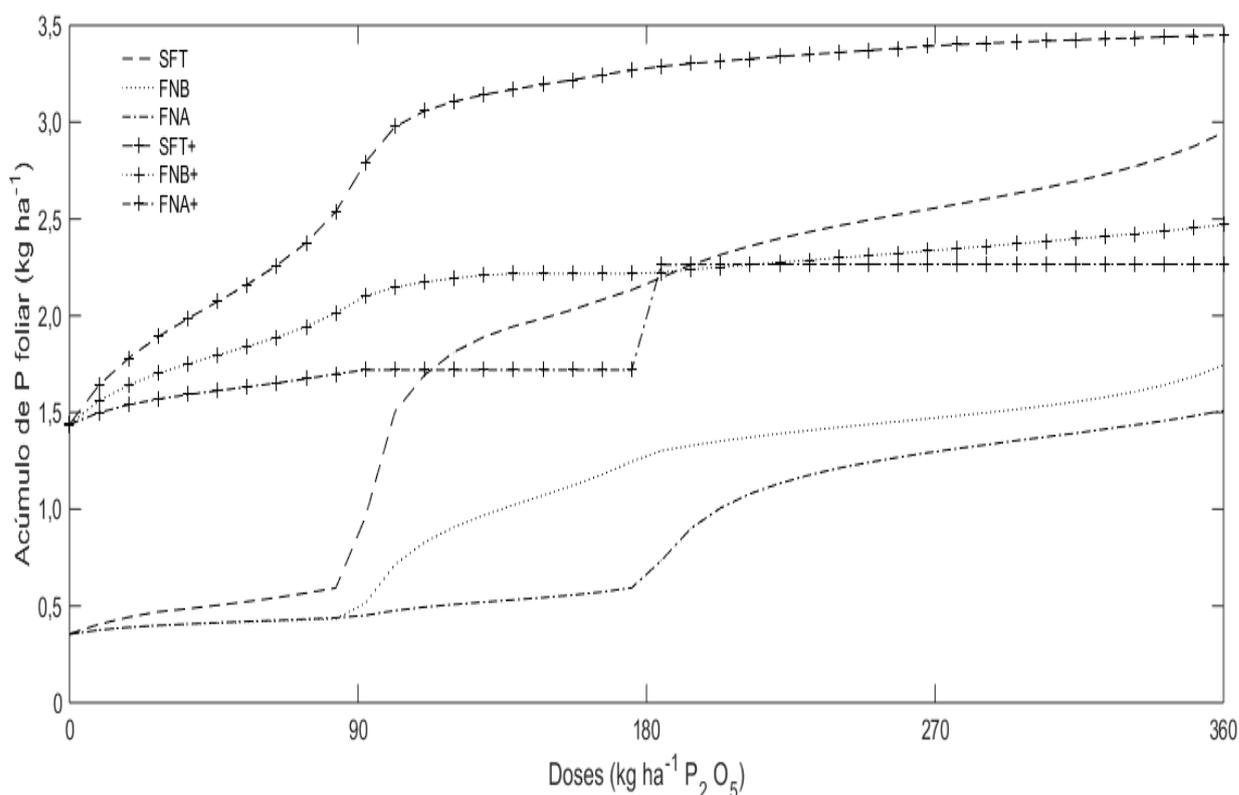
Divergindo das informações anteriores, o uso de 119 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triplo) e a associação de 92 kg ha^{-1} de P_2O_5 com 15 Mg ha^{-1} de torta de filtro aplicada em solo argiloso cultivado com a variedade Isd 20, não apresentaram diferenças significativas para o teor de P foliar (BOKHTIAR; PAUL; ALAM, 2008).

Reforçando o perfil de grande variabilidade que existe na absorção de P pela planta, Oliveira et al. (2016) empregando 120 kg ha^{-1} de superfosfato triplo em um

Argissolo Amarelo Distrófico cultivado com a RB86 7515, constataram um teor foliar de $7,2 \text{ g kg}^{-1}$, considerado um valor elevado de nutriente para esse compartimento.

Portanto, ressalta-se o caráter singular da dinâmica do P no solo (P-adsorvido, P-disponível, P-solúvel e P-orgânico) que diretamente afeta sua absorção pela planta, exigindo-se uma avaliação rigorosa e ampla de todos os aspectos que possam interferir nos processos de entrada e saída de P do sistema água-solo-planta (características edafoclimáticas e genética da planta). Teores adequados de P foliar possibilitam acúmulos satisfatórios na planta, a seguir na Figura 13 é apresentado os valores APF.

Figura 13 - Comportamento do acúmulo de P foliar em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo – SFT⁺; fosfato natural Bayóvar – FNB⁺; fosfato natural de Araxá – FNA⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).



Os valores de APF são descritos na Figura 13, quando se compara somente a presença e ausência da torta de filtro, há um incremento de 75,7% ($1,44 \text{ kg ha}^{-1}$) sob a presença do composto (SFT⁺, FNB⁺ e FNA⁺) em relação a sua ausência (SFT, FNB e FNA, com $0,35 \text{ kg ha}^{-1}$). Os valores observados no APF são reflexos do efeito da aplicação da torta de filtro nos teores de P no solo e na folha (Figuras 11 e 12),

As fontes SFT⁺, FNB⁺ e FNA⁺ apresentaram os maiores APF na cana-de-açúcar com 3,45, 2,47 e 2,27 kg ha⁻¹ quando comparados apenas à fertilização mineral, onde foram verificados 2,95, 1,74 e 1,47 kg ha⁻¹ (SFT, FNB e FNA), respectivamente. Os elevados valores de APF com o uso da fonte SFT e SFT⁺ se destacam devido a solubilidade superior desta fonte e aos teores extras do nutriente que compõem a torta de filtro.

Os APF são responsáveis pela manutenção do processo metabólico na planta, além disso, permite a mensuração da eficiência interna em translocar o nutriente e de possibilitar um melhor entendimento da capacidade de remoção do elemento do ambiente produtivo, auxiliando na busca da sustentabilidade do sistema de produção.

Deve-se ressaltar que fatores como características edafoclimáticas, fonte de fósforo empregada e o genótipo afetam diretamente o APF, exemplificando tal afirmativa, Caione et al. (2011) observaram que os acúmulos médios por fonte fosfatada (superfosfato triplo, fosfato de Arad e farinha de ossos) na dose de 100 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foram respectivamente de 2,6; 1,6 e 3,5 kg ha⁻¹.

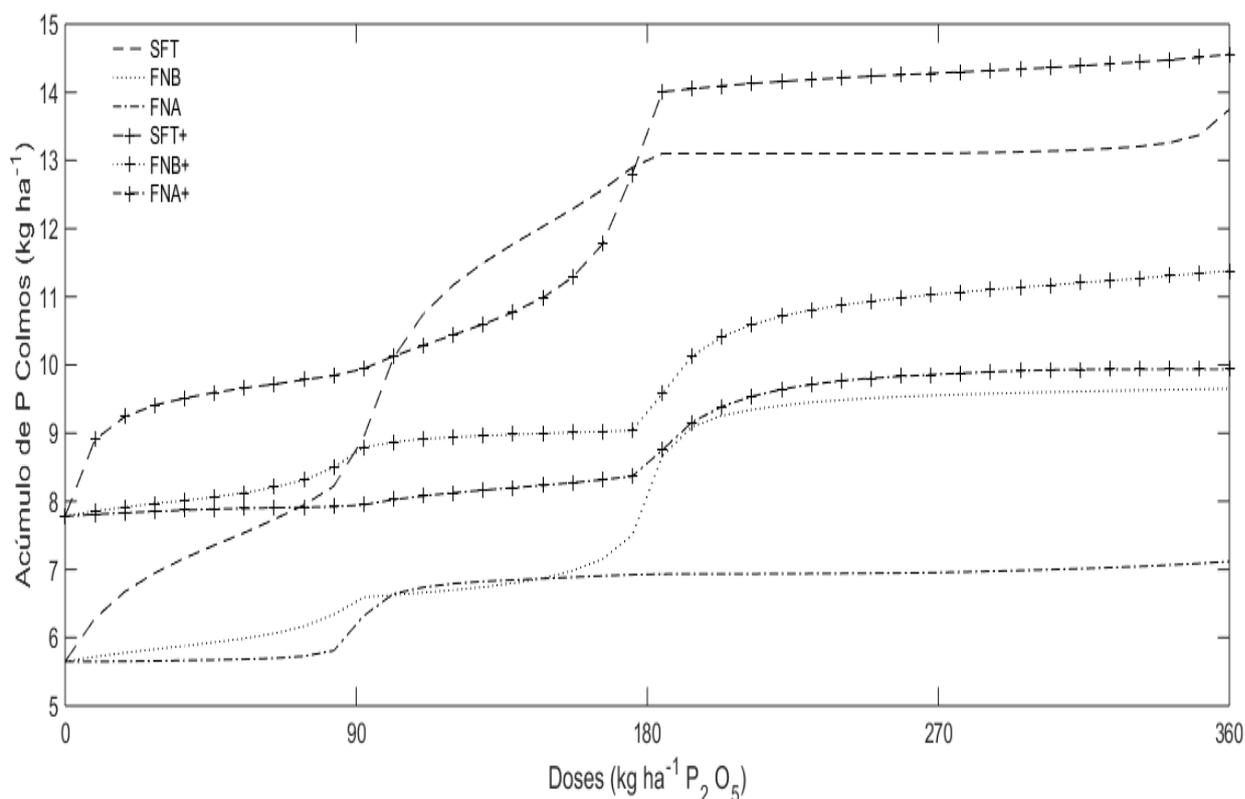
E quando se compara os acúmulos verificados nas variedades IAC86 2480 e SP79 1011 cultivadas em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico os valores são 2,7 e 1,6 kg ha⁻¹ (CAIONE et al., 2011). Corroborando com os dados anteriores, Franco et al. (2008) constataram sob aplicação de superfosfato triplo em Latossolo Vermelho Distrófico e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico cultivado com a variedade SP81 3250 valores acumulados distintos, de 4 e 2 kg ha⁻¹, respectivamente.

Avaliando o balanço do fósforo no cultivo das variedades PR 1028 e V 58-4 em Chernossolo que recebeu 50 kg de P₂O₅ de superfosfato triplo, foi observado um acúmulo foliar de 2,5 kg ha⁻¹ para ambas variedades, sendo que o acumulado nas folhas correspondeu a 11% do P total e nos colmos esse valor chega a 75% (LÓPEZ - HERNÁNDEZ; SEQUERA; MEDINA, 2006; LÓPEZ - HERNÁNDEZ; SEQUERA, 2012).

A importância do APF como fonte do nutriente para a parte de interesse comercial (colmos) que funciona como dreno, demonstra a importância deste compartimento da planta, que além de servir como ferramenta para o manejo nutricional/diagnose, apresenta uma grande influência para uma adequada atividade bioquímica, pois é sabido que no período de maturação da cana-de-açúcar há um maior deslocamento de fotoassimilados na forma de sacarose para o colmo, o que representa incrementos na qualidade industrial, com aumentos no retorno econômico.

As folhas quando apresentam teores de P acumulado adequados, funcionam como fonte do nutriente para translocação aos colmos, sendo capazes de proporcionar incrementos no APC, como verificado na Figura 14.

Figura 14 - Comportamento do acúmulo de P nos colmos em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo – SFT+; fosfato natural Bayóvar – FNB+; fosfato natural de Araxá – FNA+). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).



Na Figura 14, observamos que houve um incremento de 38,6% no APC nas plantas de cana-de-açúcar quando sob aplicação de torta de filtro (7,8 kg ha⁻¹), em relação a ausência do composto (5,6 kg ha⁻¹). Quando se compara as fontes quanto à eficiência em fornecer P para o APC, é nítido os maiores acréscimos quando associadas a torta de filtro, sendo obtido para SFT+, FNB+ e FNA+ (com 14,5; 11,4 e 9,9 kg ha⁻¹ respectivamente), já com o uso exclusivo de fertilização mineral os acúmulos foram de 13,7; 9,6 e 7,1 kg ha⁻¹ (SFT, FNB e FNA), nessa ordem.

Uma adequada concentração de P nos colmos está diretamente ligada a aumentos na produção de sacarose, pois quando há produção excedente de açúcares na folha, estes são translocados na forma de sacarose nos colmos. A medida que há

concentrações adequadas de ortofosfato (Pi) e de triose fosfato no citosol e no cloroplasto associada a concentrações apropriadas de frutose 2,6 – bifosfato no citosol, ocorre a intensificação da síntese de sacarose em detrimento da produção de amido (TOPPA et al., 2010).

Além disso, teores apropriados de P no colmo, servem como reserva energética na fase de maturação da planta, onde há redução na absorção de nutrientes, ocorrendo um processo acentuado de acúmulo de sacarose nos entrenós dos colmos, no sentido base-ápice da planta.

Portanto, a avaliação do APC é fundamental para mensurar a capacidade de acúmulo de sacarose nesse compartimento, e estudando o potencial da torta de filtro associada as fontes de P (superfosfato triplo, fosfato natural Bayóvar e fosfato natural de Araxá) na cultura de cana-de-açúcar, Caione et al. (2015) cultivando a variedade CTC 15 em Argissolo Vermelho Eutrófico observaram valores de 25,4 kg ha⁻¹ de P nos colmos para o superfosfato triplo, 26,3 kg ha⁻¹ na dose de 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de 28,9 kg ha⁻¹ de P na presença de torta de filtro.

Em experimento semelhante, Moda (2014) testando doses e fontes de P (superfosfato triplo, fosfato de Gafsa e fosfato natural de Araxá) na ausência e presença de torta de filtro ao cultivar a variedade RB85 5453 em Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico observou os maiores acúmulos, sem diferença estatística nas fontes superfosfato triplo e fosfato de Gafsa (15,4 e 14,4 kg ha⁻¹), em relação a dose, houve maior acúmulo de P nos colmos, com 16,4 kg ha⁻¹ na dose de 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e de 16,1 kg ha⁻¹ com uso exclusivo da torta de filtro.

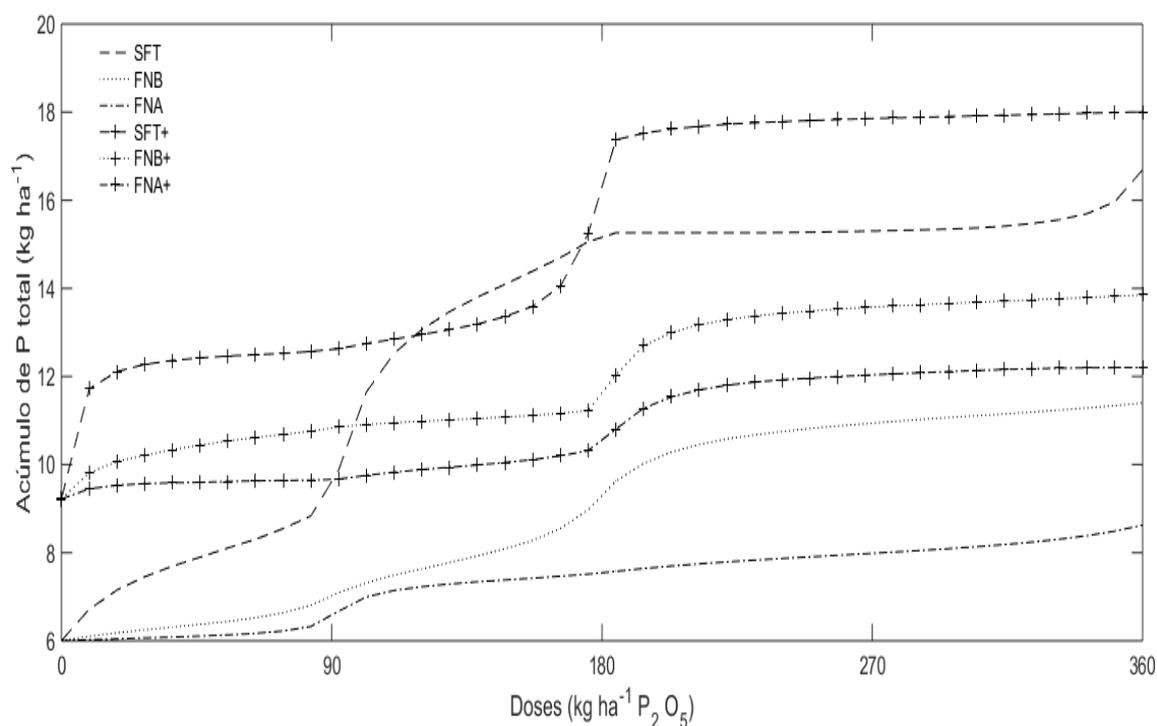
No entanto, no mesmo experimento, a variedade RB85 5453 cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, acumulou 26,1 kg ha⁻¹ de P nos colmos com o uso do superfosfato triplo, apesar de não ter ocorrido diferença estatística entre as fontes, para a dose de 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅ o acúmulo foi superior, com 29,3 kg ha⁻¹, e com uso restrito da torta de filtro, um valor semelhante, de 29 kg ha⁻¹.

Avaliando a necessidade nutricional e a participação de nutrientes em diversas variedades de cana-de-açúcar, Oliveira et al. (2016) ao aplicarem 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo) em Argissolo Amarelo Distrófico obtiveram 31 kg ha⁻¹ de P acumulado no colmo para a variedade RB86 7515, no entanto, houve grande variação de valores acumulados entre as demais variedades pertencentes ao mesmo ciclo de colheita, com extremos de 18 a 27 kg ha⁻¹.

Com a aplicação de 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triplo) em Chernossolo, cultivado com as variedades PR 1028 e V 58-4, houve um elevado acúmulo de P nos colmos, perfazendo 57 e $48,8 \text{ kg ha}^{-1}$ (LÓPEZ-HERNÁNDEZ; SEQUERA, 2012).

Nota-se que nos experimentos anteriormente citados, os APC são superiores ao do presente trabalho, podendo-se inferir que tais diferenças podem ser atribuídas ao ciclo de colheita de cada variedade, fisiologia da planta (potencial de absorver P) e as características do ambiente produtivo. Quando há acúmulo de P apropriado nos compartimentos aéreos (folha + colmos) da planta ocorre um maior APT na parte aérea (Figura 15).

Figura 15 - Comportamento do acúmulo de P total em em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo – SFT+; fosfato natural Bayóvar – FNB+; fosfato natural de Araxá – FNA+). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).



Na Figura 15 os valores de APT (folhas + colmos) são apresentados, a presença da torta de filtro proporcionou elevação de 34,8% ($9,2 \text{ kg ha}^{-1}$) na concentração de P na parte aérea de plantas de cana-de-açúcar. Já para o tratamento em que não houve aplicação do composto orgânico, o APT na parte aérea foi de 6 kg ha^{-1} .

Na associação com as fontes de P, a torta de filtro promoveu acúmulos de 18 kg ha⁻¹ (SFT⁺), 13,9 kg ha⁻¹ (FNB⁺) e 12,2 kg ha⁻¹ (FNA⁺), para a ausência do composto, os valores acumulados foram inferiores, com 16,7 kg ha⁻¹ (SFT), 11,4 kg ha⁻¹ (FNB) e 8,6 kg ha⁻¹ (FNA).

O APT, representa um fator muito importante na relação com a produtividade da cultura, pois está associado a eficácia do aparelho foliar em converter carboidratos via fotossíntese em sacarose e remanejar o seu excedente para acumular nos colmos da planta, o funcionamento do eixo fonte-dreno (folha-colmo) é análogo a uma engrenagem, onde se não ocorrer um bom funcionamento do aparato fotossintético e consequentemente acúmulo do P nas folhas, não haverá transferência da sacarose para se acumular no colmo, o que afeta o rendimento de açúcar por hectare.

Tal informação é confirmada por Santos et al. (2011) que ao submeterem a variedade RB86 7515 cultivada em Argissolo Vermelho Distroférico constaram incrementos nos teores de sacarose nos colmos quando aplicada fontes minerais de P, associadas ou não com torta de filtro.

Altos acúmulos de P total na variedade CTC15 cultivada em Argissolo Vermelho Eutrófico foram obtidos por Caione et al. (2015) ao aplicarem a dose de 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo), atingindo 40,7 kg ha⁻¹, para o uso da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹, base seca) houve um acúmulo de 43,9 kg ha⁻¹. Como também foi verificado por Oliveira et al. (2016) alto acúmulo na variedade RB86 7515 instalada em Argissolo Amarelo Distrófico sob aplicação de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo) atingindo acúmulo total de 44 kg ha⁻¹.

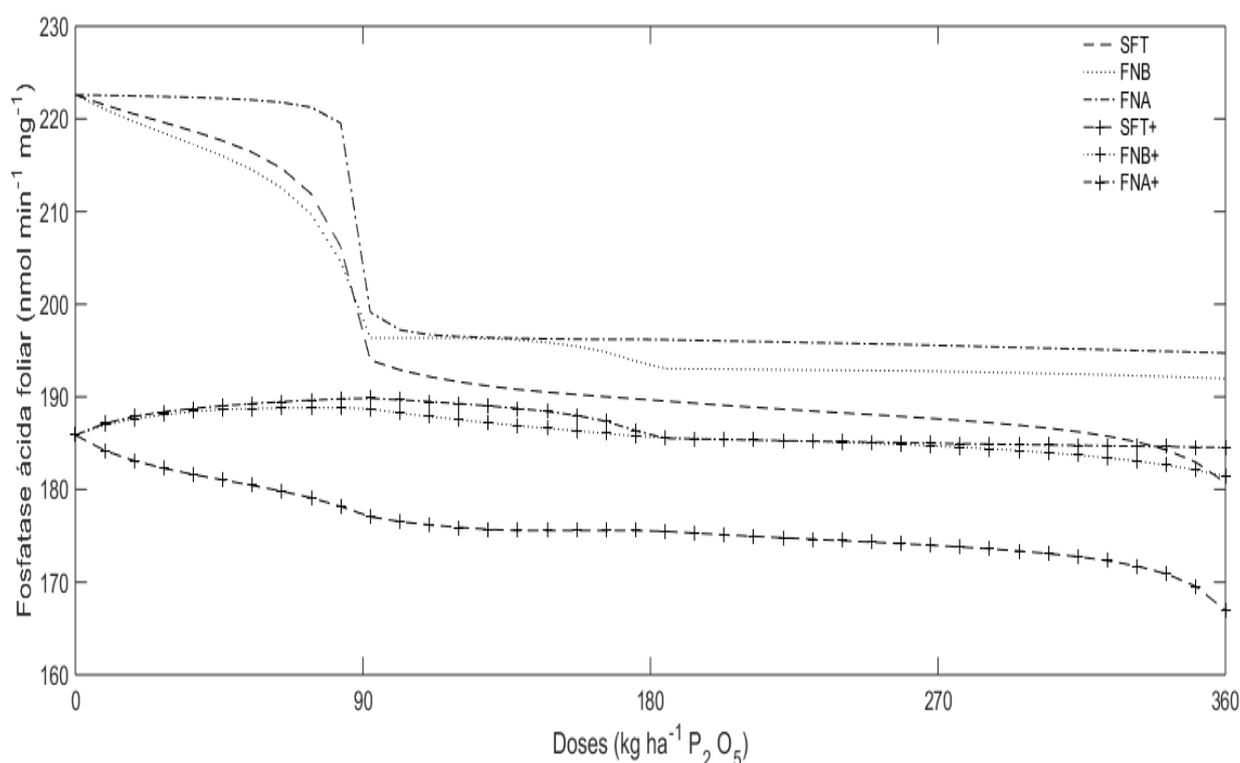
Utilizando a variedade RB86 7515 em Argissolo Amarelo Distrófico sob aplicação de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (Superfosfato Simples) e irrigação plena (300 dias), foi observado um acúmulo total de 18,6 kg ha⁻¹ (OLIVEIRA et al., 2011), neste caso pode-se atribuir a influência do suprimento hídrico adequado durante maior parte do cultivo, maximizando o mecanismo de evapotranspiração e de utilização do P da fonte aplicada, que sabidamente possui menor porcentagem de P solúvel, em relação ao superfosfato triplo.

Esses maiores acréscimos nos valores de APT, em relação aos apresentados no presente trabalho são reflexos da combinação entre variação genotípica da variedade instalada quanto a capacidade de absorver e acumular P, ambiente produtivo (características edafoclimáticas) e a composição da torta de filtro, que pode

ser mais ou menos rica em macronutrientes, especialmente em P, expressando o manejo nutricional do cultivo anterior.

A cana-de-açúcar quando possui teores de P apropriados em seus compartimentos apresentam uma menor FAF (Figura 16).

Figura 16 - Comportamento da fosfatase ácida foliar em cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo – SFT⁺; fosfato natural Bayóvar – FNB⁺; fosfato natural de Araxá – FNA⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).



A FAF nas folhas de cana-de-açúcar é descrita na Figura 16, é explícito a forte redução na atividade desta enzima quando foi aplicado o tratamento com torta de filtro (com 185,9 nmol min⁻¹ mg⁻¹) quando comparado a ausência do composto (com 222,6 nmol min⁻¹ mg⁻¹), o que representa um decréscimo de 19,7% na atividade enzimática.

As reduções na atividade desta enzima são mais perceptíveis quando se associa as fontes de P e a torta de filtro, combinada com SFT⁺ (com 166,9 nmol min⁻¹ mg⁻¹), FNB⁺ (com 181,4 nmol min⁻¹ mg⁻¹) e FNA⁺ (com 184,5 nmol min⁻¹ mg⁻¹), com uso apenas das fontes de P a atividade da enzima foi de 180,7 nmol min⁻¹ mg⁻¹ (SFT), 192 nmol min⁻¹ mg⁻¹ (FNB) e 194,7 nmol min⁻¹ mg⁻¹ (FNA).

A FAF tem sua atividade intensificada quando no meio celular de plantas de cana-de-açúcar há restrição fisiológica ou um fornecimento insuficiente de P para os processos energéticos do vegetal, o que diretamente está ligado a um ambiente produtivo pobre ou que possui mecanismos que afetam a disponibilidade do nutriente à planta. Sua relevância se dá em diminuir os rendimentos de sacarose nos colmos no período de florescimento, pois de acordo com Toppa (2010) a atividade da fosfatase ácida foliar é aumentada, ocasionando uma transformação da sacarose em glicose e frutose. A FAF pode ter sua atividade intensificada em diferentes compartimentos da planta, como nas raízes, folhas entre outros, desde que haja deficiência no transporte de P.

Buscando avaliar as respostas biológicas e morfológicas de variedades de cana-de-açúcar à restrição de P, e conseqüentemente a atividade da fosfatase ácida radicular, Arruda et al. (2016), verificaram que a RB86 7515 apresentou comportamento eficiente quanto absorção de P, contudo não foi responsiva aos incrementos do nutriente, o que resultou menor altura de plantas, redução no perfilhamento, do sistema radicular e de sua massa seca. Corroborando com Silva; Basso (1993) que citam a correlação negativa e significativa entre a atividade desta enzima e as características que avaliam crescimento e produção.

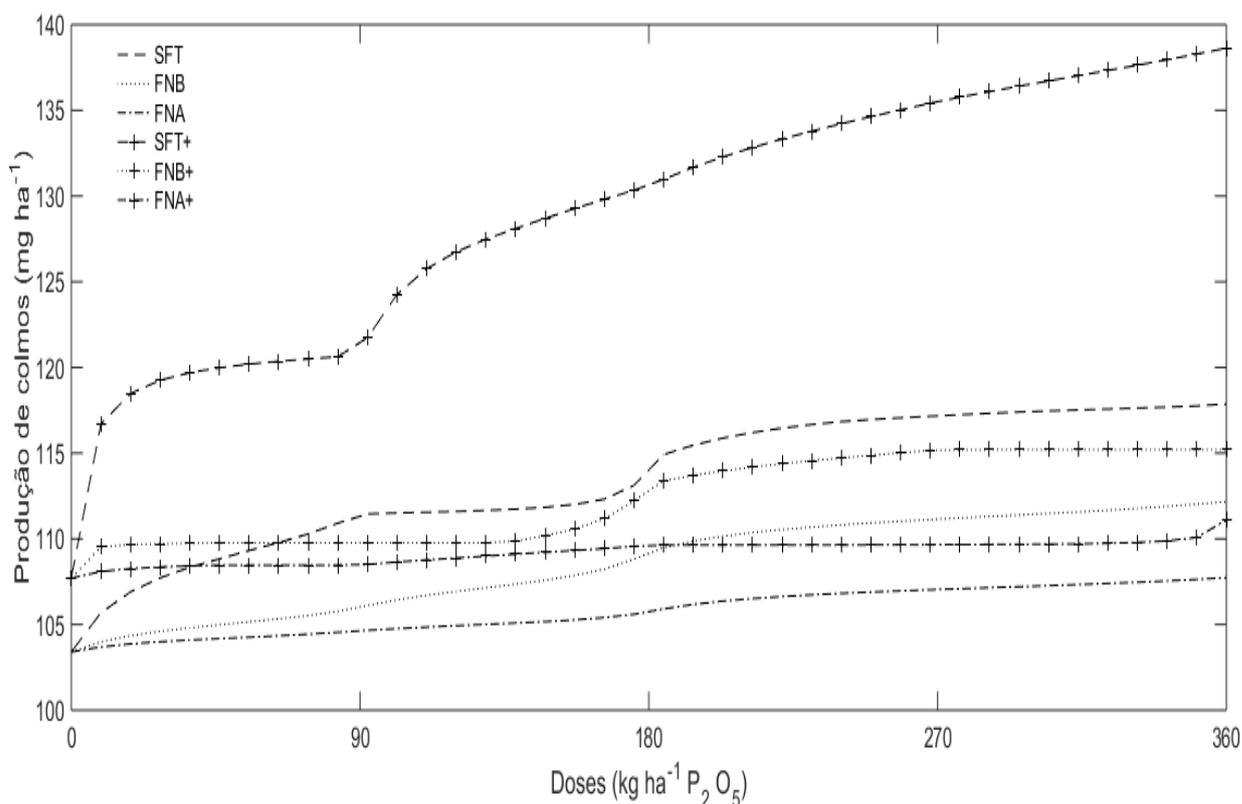
A variedade CTC 15 cultivada em Argissolo Vermelho Eutrófico apresentou elevada atividade da enzima, mesmo sob a fonte mais solúvel de P (superfosfato triplo), com $2282 \text{ nmol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$, na maior dose de fertilizante mineral (360 kg ha^{-1} de P_2O_5), com $2172,6 \text{ nmol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ e na presença de torta de filtro ($7,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ em base seca), com $2079,5 \text{ nmol min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ (CAIONE et al., 2015). Tal comportamento, pode ser referente ao próprio genótipo da planta, pois há variedades mais responsivas ao incremento de P ou mais eficientes em extraí-lo de ambientes com baixa disponibilidade do nutriente.

Em outro experimento avaliando fontes e doses de P associadas com torta de filtro, Moda (2015) não obteve diferença estatística para a atividade da fosfatase ácida na variedade RB85 5453 cultivada em Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico e em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, devendo-se destacar que os valores observados são altos na comparação entre os solos, sendo praticamente o dobro para o segundo ambiente de produção.

A variação nas respostas quanto a FAF pode ser atribuída, além da variabilidade genética, também as características edafoclimáticas do ambiente

produtivo, que são responsáveis pelo primeiro estímulo ao aumento da atividade desta enzima na planta, particularmente pela atuação da mineralogia do ambiente, que adsorve e indisponibiliza o P nativo ou aplicado via fertilizantes. O que força a planta a desenvolver todo um mecanismo que maximização do P disponível no vegetal, o que pode interferir no desenvolvimento da variedade, caso ela não seja adaptada à ambientes pobres em P. Em suma, quando a cana-de-açúcar está bem suprida de P, a planta tem a capacidade de expressar o seu potencial produtivo, no caso TCH (Figura 17), pois o trinômio genética-nutrição-clima rege os limites da produção agrícola, contudo, qualquer variabilidade na produtividade pode ser atribuída ao genótipo e influência climática.

Figura 17 - Comportamento da produção de colmos de cana-de-açúcar irrigada, cultivada em Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Na presença de torta de filtro (superfosfato triplo – SFT⁺; fosfato natural Bayóvar – FNB⁺; fosfato natural de Araxá – FNA⁺). Na ausência de torta de filtro superfosfato triplo - SFT; fosfato natural Bayóvar - FNB; fosfato natural de Araxá - FNA).



A TCH (Figura 17) na presença de torta de filtro apresentou incremento de 4,2 Mg ha⁻¹ (com 107,7 Mg ha⁻¹) em relação a ausência (com 103,5 Mg ha⁻¹). Ainda na Figura 17 a combinação com as fontes de P resultou em produção de 138,7 Mg ha⁻¹

(SFT⁺), 115,3 Mg ha⁻¹ (FNB⁺) e 111,1 Mg ha⁻¹ de colmos (FNA⁺), quando houve aplicação exclusiva de fertilizante mineral, a TCH foi de 117,9; 112,2 e 107,8 Mg ha⁻¹ (SFT, FNB e FNA) nessa ordem.

Dentre as funções do fósforo, destaca-se a que envolve a promoção de um maior perfilhamento da cana-de-açúcar (ALBUQUERQUE et al., 2016; ARRUDA et al., 2016) esse processo é estritamente ligado ao potencial de produção da cultura (COSTA et al., 2011), portanto, nota-se uma correlação positiva entre as maiores produções de colmos verificadas no atual experimento, onde os tratamentos que forneceram as maiores concentrações de P no solo, P res (Figura 7), PF (Figura 8), APF / APC / APT (Figuras 9, 10 e 11) e menor FAF (Figura 12) propiciaram elevados rendimentos do cultivo. Produções de colmos superiores aos do presente trabalho foram obtidos da variedade CTC 15 instalada em Argissolo Vermelho Eutrófico, sendo que o uso de superfosfato triplo promoveu 221 Mg ha⁻¹, para a dose de 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅ foi verificada uma produção de 229 Mg ha⁻¹ e a presença do composto orgânico foi responsável por 222,5 Mg ha⁻¹ (CAIONE et al., 2015).

Em avaliação de fontes e doses de P e torta de filtro, Moda et al. (2015) cultivaram a variedade RB85 5453 em Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, para o primeiro ambiente produtivo obtiveram produções elevadas, destacando-se 214 Mg ha⁻¹ (209 kg ha⁻¹ de fosfato de Gafsa) e 190 kg ha⁻¹ (360 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo), no segundo ambiente produtivo, os maiores incrementos na produção de colmos foi com o uso da dose de 360 kg ha⁻¹ de P₂O₅ associada com torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹, base seca), com 188,2 Mg ha⁻¹.

Contrariando os experimentos anteriores, onde as fontes com os maiores teores de P solúvel apresentam destacada produção de colmos, Tsado et al. (2013) notaram a mais elevada produção de colmos da variedade CO 957 cultivada em Planossolo no uso de 150 kg ha⁻¹ de rocha fosfatada, que possibilitou 102 Mg ha⁻¹ de colmos. Contudo, cultivada em solos orgânicos da Flórida, a variedade CL 77 - 797 sob aplicação de 56 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo) apresentou produção de colmos de 121,8 Mg ha⁻¹ (McCRAVY et al., 2010). A mineralização da matéria orgânica da área disponibiliza entre 16 a 23 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (REDDY, 1983). Indiretamente a matéria orgânica que sofre mineralização apresenta-se como uma fonte alternativa e complementar de P, somando-se aos incrementos de P da fonte acidulada.

A TCH de cana-de-açúcar foi afetada pelos incrementos de P, independente da fonte ou de qual associação utilizada, quando comparada ao tratamento na ausência

do nutriente. A produção agrícola é dependente das relações do sistema água-solo-planta-atmosfera, portanto, é natural que a produção final seja diversa, sendo recomendado estudos direcionados particularmente à mineralogia do ambiente produtivo, onde ocorre processos que afetam fortemente a disponibilidade de água e de P para a cana-de-açúcar.

CONCLUSÕES

Obteve-se teores adequados de P resina no solo e de P foliar na maior dose de superfosfato triplo, seja na presença e ausência de torta de filtro, para as demais fontes na maior dose associada a torta de filtro.

As maiores produtividades de água em colmos são relacionadas a presença de elevados teores de matéria orgânica (Torta de filtro) e a fonte mais solúvel de P (Superfosfato Triplo).

As maiores produções de colmos observadas estão relacionadas aos tratamentos que forneceram as maiores concentrações de P no solo, P foliar, acúmulos de P foliar, nos colmos, e total, além da menor atividade de fosfatase ácida foliar.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W., SÁ, L. A., RODRIGUES, W. A. R., MOURA, A. B., OLIVEIRA FILHO, M. S. Growth and yield of sugarcane as a function of phosphorus rates and forms of application. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 29–35, 2016.

ALCARDE, J. C. **Manual de análise de fertilizantes**. FEALQ, Piracicaba. 2009, 279 p.

ALLEONI, L.R.F.; BEAUCLAIR, E.G.F. Cana-de-açúcar cultivada após milho e amendoim, com diferentes doses de adubo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n.3, p.409- 415, 1995.

ARRUDA, B.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; RICHARDSON, A. E.; ANDREOTE, F. D.; PAVINATO, P. S. Biological and morphological traits of sugarcane roots in relation to phosphorus uptake. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 16, n. 4, p. 901-915, 2016.

AWASTHI, R.; TEWARI, R.; NAYYAR, H. 2011. Synergy between plants and P-solubilizing microbes in soils: effects on growth and physiology of crops. **International Research Journal of Microbiology**, v. 2, n. 12, p. 484-503, 2011.

BOKHTIAR, S. M.; PAUL, G. C.; ALAM, K. M. Effects of organic and inorganic fertilizer on growth, yield, and juice quality and residual effects on ratoon crops of sugarcane. **Journal of Plant Nutrition**, Georgia, v. 31, p. 1832 – 1843, 2008.

BOSO, A. C. M. R. **Modelagem matemática e computacional na avaliação do uso de água magnetizada na irrigação do rabanete utilizando o sistema Mamdani**. 106 p. 2018. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias, Botucatu, 2018.

CAIONE, G.; LANGE, A.; BENETT, C. G. S.; FERNANDES, F. M. Fontes de P para adubação de cana-de-açúcar forrageira no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 66-73. 2011.

CAIONE, G.; PRADO, R. M.; CAMPOS, C. N. S.; MODA, L. R.; VASCONCELOS, R. L.; PIZAURO JÚNIOR, J. M. Response of sugarcane in a Red Ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. **Scientific World Journal**, v. 2015, p. 1–10, 2015.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. IAC, Campinas. 2009. 77p.

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_253.html>. Acesso em: 10 fev. 2018.

CONSECANA. Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. 6ª ed. Consecana. Piracicaba. 2015. 81 p.

COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; FILHO, G. M.; SANTOS, J. R. Influence of phosphorus doses and soil moisture on diffusion flow. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 828 - 835. 2006.

COSTA, C. T. S.; FERREIRA, V. M.; ENDRES, L.; FERREIRA, D. T. R. G.; GONÇALVES, E. R. Crescimento e produtividade de quatro variedades de cana-de-açúcar no quarto ciclo de cultivo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 3, p. 56-63, 2011.

CHAI, B.; WU, Y.; LIU, P.; LIU, B.; GAO, M. Isolation and phosphate-solubilizing ability of a fungus, *Penicillium* sp. from soil of an alum mine. **Journal of Basic Microbiology**, v. 51, n. 1, p. 5 - 14, 2011.

CHOUERI, M. **Modelagem fuzzy para avaliação do desenvolvimento da cultura do rabanete irrigado com água tratada magneticamente sem estresse hídrico**. 2018. 54 p. Dissertação (Mestrado em Agronegócio e Desenvolvimento). Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, 2018.

CREMASCO, C. P. **Aplicação da lógica fuzzy para avaliação do faturamento do consumo de energia elétrica e demanda de uma empresa de avicultura de postura**. 2008. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - FCA/UNESP. Botucatu, 2008.

ENDRES, L.; SILVA, J. V.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. S. Photosynthesis and water relations in Brazilian sugarcane. **The Open Agriculture Journal**, v. 4, p. 31 - 37, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353 p.

FLORENTINO, H. O.; CANTAO, L. A. P.; MORENO, E. V.; SARTORI, M. M. P. Uma abordagem fuzzy do problema de otimização do balanço econômico do aproveitamento do resíduo de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 63-77, 2015.

FRANCO, H. C. J.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; SARTORI, R. H.; TRIVELIN, M. O. Acúmulo de nutrientes pela cana-planta. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 26, n. 5, p. 47-51. 2008.

GABRIEL, C. P. C. **Modelagem fuzzy para avaliação do desenvolvimento do rabanete sob diferentes lâminas de irrigação com água tratada magneticamente** (Tese - Livre Docência em Matemática Aplicada). 2018. 117 p. Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Engenharia, Tupã, 2018.

GABRIEL FILHO, L. R. A. **Sistemas Fuzzy aplicados nas Ciências Agrárias**. 2015. 258 f. Tese (Livre-Docência em Matemática Aplicada e Computacional) - FCE/UNESP, Tupã, 2015.

GABRIEL FILHO, L. R. A.; CREMASCO, C. P.; PUTTI, F. F.; CHACUR, M. G. M. Application of *fuzzy* logic for the evaluation of livestock slaughtering. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 813-825, 2011.

GODOY, A. P. **Modelagem de Processos de Acumulação de Biomassa e de Açúcar da Cana-de-açúcar via Sistemas Nebulosos**. 2007. 254 f. Dissertação (Engenharia Elétrica e de Computação – Automação). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2007.

GONZÁLEZ, L. C.; PRADO, R. M.; HERNÁNDEZ, A. R.; CAIONE, G.; SELVA, E. P. Use of filter cake enriched with rock phosphate and biofertilizers in a Haplustox soil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 2, p.135 -141, 2014.

INMAN-BAMBER, N. G.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; WOOD, A. W.; PACE, R.; SPILLMAN, M. F. Boosting yields with limited irrigation water. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Townsville, v. 21, p. 203-211, 1999.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F.; GARCIA, S. R.; CALHEIROS, A. J. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. **Revista Climanalise**. p. 7- 12, 2016.

KINGSTON, G. Benchmarking yield of sugarcane from estimates of water use. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Brisbane, v. 16, p. 201-209, 1994.

LEE, Y. B.; KIM, P. J. Reduction of phosphate adsorption by ion competition with silicate in soil. **Korean Journal of Environmental Agriculture**, Seul, v. 26, n. 4, p. 286-293, 2007.

LIMA, C. C. Disponibilidade de P para a cana-de-açúcar em solo tratado com compostos orgânicos ricos em silício. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 12, p. 1222-1227, 2011.

LOPEZ-HERNANDEZ, D.; SEQUERA, D.; MEDINA, E. Balances de elementos em un agroecosistema de caña de azucar: I. Balance de nitrogeno. **Tropicultura**, Brussels, v. 24, n.1, p. 25-32, 2006.

LOPEZ-HERNANDEZ, D.; SEQUERA, D. Phosphorus biogeochemical cycling in a sugar cane agroecosystem. **American Journal Agricultural and Biological Sciences**, Dubai, v. 7, n. 4, p. 473–481, 2012.

MARRO, A. A.; SOUZA, A. M. C.; CAVALCANTE, E. R. S.; BEZERRA, G. S.; NUNES, R. O. **Lógica Fuzzy: conceitos e aplicações**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) Natal – RN – Brasil, 2010.

McCRAVY, J. M.; RICE, R. W.; LUO, Y.; JI, S. Sugarcane response to phosphorus fertilizer on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 5, p. 1468 - 1477, 2010.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a *fuzzy* logic controller. **International Journal Man-Machine Studies**, London, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Irrigação e Drenagem) – ESALQ, Piracicaba, 2011.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. DA (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2009. p. 191–233.

MODA, L. R.; PRADO, R. M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S.; SILVA, E. C.; FLORES, R. A. Effect of sources and rates of phosphorus associated with filter cake on sugarcane nutrition and yield. **Australian Journal of Crop Science**, Melbourne, v. 9, n. 6, p. 477 - 485, 2015.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, M. B. G. S. Acúmulo e alocação de nutrientes em cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 3, p. 579-588, 2011.

OLIVEIRA, R. I.; MEDEIROS, M. R. F. A.; FREIRE, C. S.; FREIRE, F. J.; NETO, D. E. S.; OLIVEIRA, E. C. A. Nutrient partitioning and nutritional requirement in sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, Melbourne, v. 10, n. 1, p. 69-75, 2016.

PIZAURO, J. M.; CURTI, C.; CIANCAGLINI, P.; LEONE, F. A.; Kinetic properties of triton X-100 solubilized bone matrix-induced alkaline phosphatase. **Cellular and Molecular Biology**, Elmsford, v. 34, n. 5, p. 921-926, 1988.

PMGCA. Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. Centro de Ciências Agrárias/UFSCAR, 2008.

PUTTI, F. F. **Análise dos indicadores biométricos e nutricionais da cultura da alface (*Lactuca sativa* L.) irrigada com água tratada magneticamente utilizando modelagem *fuzzy***. 2015. 205 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) - FCA/UNESP. Botucatu, 2015.

PUTTI, F. F.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; SILVA, A. O.; LUDWIG, R.; GABRIEL, C. P. C. *Fuzzy* logic to evaluate vitality of *catasetum fimbriatum* species (*Orchidacea*). **Revista Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 3, p. 405 - 413, 2014.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. IAC, Campinas. 2001. 285 p.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 233-243. (Boletim, 100).

REDDY, K. R. 1983. Soluble phosphorus release from organic soils. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 9, n. 4, p. 373-382, 1983.

RICHARDSON, A. E.; SIMPSON, R. J. (2011) Soil microorganisms mediating phosphorus availability. **Plant Physiology**. v. 156, n. 3, p. 989 - 996. 2011.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 2^a ed. Wiley. England, 2010. 607 p.

ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C. Future research challenges for eficiente crop water use in sugarcane production. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technology**, Brisbane, v. 16, p.193 – 200, 1994.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C. Fertilidade do solo, nutrição e adubação. In: DINARDO-MIRANDA, L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed). **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2010, p. 234.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A.C.; PRADO JÚNIOR, J. P. Q. P. Fósforo. In: DINARDO MIRANDA, L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010, p. 271-288.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Adubação: resíduos alternativos**. 2009. Disponível em:<<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html>>. Acesso em: 12 mar. 2018.

SANTOS, V. R.; MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W.; COSTA, J. P. V.; SANTOS, C. G.; SANTOS, A. C. I. 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.

SANTOS, D. H.; SILVA, M. A.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; ECHER, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 443-449, 2011.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S. Efeito residual da adubação fosfatada e torta de filtro na brotação de soqueiras de cana-de-açúcar. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 5, n. 15, p. 1-6, 2012.

SANYAL, S. K.; DE DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advances in Soil Science**, New York, v. 16, n. 2, p. 1-120, 1991.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B. 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.

SECREMIN, O. B. **Modelagem matemática em aveia por regressões, lógica fuzzy e redes neurais artificiais na otimização de uso do nitrogênio pelo emprego do hidrogel**. 2016. 115 f. Dissertação (Modelagem Matemática). Universidade Regional do Noroeste do estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. 2016.

SILVA, F. C.; BASSO, L. C. Avaliação da atividade in vivo da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, n. 3, p. 371-375, 1993.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Lógica *fuzzy* no mapeamento de variáveis indicadoras de fertilidade do solo. **Idesia**, Arica, v. 27, n. 3, p. 41- 46, 2009.

SMITH, S.; NOKLEBY, B.; COMER, D. *Fuzzy control systems*. In: SMITH, S.; NOKLEBY, B.; COMER, D. CRC Press. **A computational approach to fuzzy logic controller design and analysis using cell state of space methods**, 1994. p. 398-427.

SOUZA JUNIOR, J. A. **Impactos dos déficits hídricos na cultura de cana-de-açúcar em regiões produtoras de São Paulo, Minas Gerais e Paraná**. 2017. 147 f. (Tese em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B.; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. IAC, Campinas. 1997. p. 233-243.

STEFFENS, D.; LEPPIN, T.; LUSCHIN-EBENGREUTH, N.; YANG, Z. M.; SCHUBERT, S. Organic soil phosphorus considerably contributes to plant nutrition but is neglected by routine soil-testing methods. **Journal of Plant Nutrition in Soil Science**, Tharandt, v. 173, p. 765-771, 2010.

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

TANAKA, H.; UEJIMA, S.; ASAI, K. Linear Regression Analysis with *Fuzzy Model*. **IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics**, V. SMC-12, n. 6, 1982. p. 903-906.

TOPPA, E. V. B.; JADOSKI, C. J.; JULIANETTE, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 3, p. 3, p. 217-223, 2010.

TSADO, P. A.; LAWAL, B. A.; IGWE, C. A.; ADEBOYE, M. K. A.; ODOFIN, A. J.; ADEKAMBI, A. A. Effects of sources and levels of phosphorus on yield and quality of sugarcane in Southern Guinea Savanna Zone of Nigeria. **Agriculture Science Developments**, Lagos, v. 2, n. 3, p. 25- 27, 2013.

VASCONCELLOS, K. C. **Estudo do risco de falha ambiental em rios sujeitos à concessão de outorga de lançamento de efluentes mediante o uso da equação de streeter-phelps “fuzzificada”**. 2013. 75 f. (Dissertação em Engenharia Civil – Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2013.

VASCONCELOS, R. L. **Fontes de fósforo e torta de filtro sobre o estado nutricional e produtividade da cana-planta**. 2013. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2013.

VAZQUEZ, G. H.; BORTOLIN, R.; VANZELA, L. S.; BONINI, C. S. B.; BONINI NETO, A. Uso de fertilizante organofosfatado e torta de filtro em cana-planta. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 9, n.1, p. 53–64, 2015.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-37, 1934.

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

ZADEH, L. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. SMC-3, n. 1, 1973. p.28-44.

CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DA QUALIDADE INDUSTRIAL DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

RESUMO

A produção agrícola mundial tem o desafio de aumentar seus rendimentos sob a pressão de uma população global crescente e das adversidades climáticas que estão se tornando mais intensas e frequentes. A cana-de-açúcar, por ser uma cultura de cultivo em vastas áreas, particularmente na faixa tropical é sujeita a diversas condições, seja pela disponibilidade de nutrientes, em especial o fósforo (P), seja pela irregular precipitação pluviométrica, o que torna frequente o uso da irrigação, especialmente, irrigação de salvamento, por proporcionar melhores condições de umidade do solo para a emergência das plantas. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar por meio de técnicas multivariadas a produtividade e a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. Técnicas multivariadas, são eficazes em sintetizar elevado volume de dados, proporcionando uma filtragem de dados relevantes. O experimento foi realizado em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média, no município de Itajobi-SP. O arranjo experimental foi em blocos ao acaso, em triplicata, no esquema $3 \times 4 \times 2$, com fontes de P (superfosfato triplo, fosfato natural reativo Bayóvar e fosfato natural de Araxá), doses (0, 90, 180 e 360 kg de P_2O_5 ha⁻¹), na presença e ausência da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹, base seca). A irrigação de salvamento foi aplicada em lâmina única de 80 mm de água em área total. A produtividade da água/produção de açúcar apresentou-se elevada, especialmente quando houve a presença da torta de filtro e crescentes doses de P. Por meio das técnicas de análise multivariada, foi verificado que com exceção da variável fibra, a produção de colmos, sacarose, açúcar total recuperável (ATR) e toneladas de Pol ha⁻¹ (TPH) são correlacionadas entre si, e que sob as condições experimentais, a sacarose e particularmente a produção de colmos propiciaram uma elevada correlação positiva em TPH, contudo, pode-se inferir que a associação de alta temperatura do ar e alta precipitação pluviométrica resultaram em ATR com alta correlação negativa.

Palavras-chave: Produção de colmos. Sacarose. ATR. Componentes principais.

CHAPTER 2 - ANALYSIS OF PRINCIPAL COMPONENTS OF THE INDUSTRIAL QUALITY OF SUGARCANE IRRIGATED IN THE THE FUNCTION OF THE APPLICATION OF FILTER CAKE AND PHOSPHATE FERTILIZATION

ABSTRACT

World agricultural production has a challenge of increasing its incomes under pressures of a growing global population and also the climatic adversities that are becoming more intense and frequent. Sugarcane, because it is a crop growing in large areas, particularly in tropical areas, is subject to several conditions, either due to the nutrients' availability, especially phosphorus (P) or irregular rainfall, which frequent use irrigation, especially water saving irrigation, to provide better soil moisture conditions for plants' emergence. Thus, our aim was to evaluate the productivity and technological quality of irrigated sugar cane through multivariate techniques as a function of filter cake application and phosphate fertilization. Multivariate techniques are effective in synthesizing high data volume, providing filtering of relevant data. The experiment was carried out in a Red-Yellow Latosol Dystrophic, medium texture, in Itajobi-SP, Brazil. The experimental arrangement was in randomized blocks with three replications, in a $3 \times 4 \times 2$ factorial scheme with three sources of phosphorus (triple superphosphate, Bayóvar natural reactive phosphate and Araxá natural phosphate), doses (0, 90, 180 and 360 kg of $P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$), in the presence and absence of the filter cake (7.5 Mg ha^{-1} , dry basis). Water saving irrigation was applied in a single lamina of 80 mm of water in the total area. Productivity of water/sugar production was high, especially when there was the presence of filter cake and increasing doses of P. Using multivariate analysis techniques, it was verified exception to the fiber variable, sucrose, total recoverable sugar (ATR), and tons of $Pol \text{ ha}^{-1}$ (TPH) are correlated with each other, and that under sucrose conditions and particularly stalks production gave a high positive correlation in TPH, it was inferred that the association of high air temperature and high rainfall resulted in ATR with high negative correlation.

Keywords: Production of stalks. Sucrose. ATR. Multivariate statistics.

2 INTRODUÇÃO

As condições de produção agrícola nos trópicos se apresentam como uma das mais adversas, pois, está sujeita a vários processos, entre eles os que afetam a disponibilidade e absorção de nutrientes, em especial de fósforo (P), ou a grandes variações precipitação pluviométrica. O P influencia nas atividades metabólicas, no desenvolvimento e melhoria no processo de clarificação do caldo de cana-de-açúcar (ROSSETTO; DIAS; VITTI, 2010; SANTOS et al., 2010).

Por essas variações de precipitação pluviométrica, o manejo da cultura de sequeiro de cana-de-açúcar, no estado de São Paulo, exige uma irrigação de salvamento, pois segundo Bernardo; Soares; Mantovani (2006) os dois primeiros estádios da cultura, que são, brotação/emergência e perfilhamento/ estabelecimento da cultura, exigem suprimento adequado de água. Essa irrigação, em lâmina única, tem a função de reduzir possíveis efeitos negativos de períodos com baixa precipitação, especialmente nas soqueiras ou na emergência de perfilhos de cana-planta.

A cultura de cana-de-açúcar apresenta uma determinada tolerância à deficiência hídrica para seu cultivo, contudo, as oscilações climáticas atualmente observadas estão mudando as condições de manejo. A irregularidade da precipitação pluviométrica em condições tropicais afeta de forma estressante e com frequência, refletindo em redução na produção (DIACONO et al., 2012). O sistema produtivo compreende relações interligadas e sensíveis às mudanças.

Sua avaliação é dependente de conexões ainda não totalmente esclarecidas, sendo que é uma possibilidade de impulsionar a ampliação do cultivo de cana-de-açúcar, requer o uso de ferramentas que analisem, de modo amplo, todas as variáveis envolvidas, abrangendo os processos que compreendam o ambiente produtivo. A análise multivariada é capaz de identificar e descrever padrões estruturais, espaciais e temporais, portanto, seus resultados refletem as interações que ocorrem no meio (PINHO, 2013).

Com destaque para a análise de componentes principais, que apresenta os valores (autovalores) que mais se correlacionam em porcentagem com o atributo avaliado sendo diretamente ou inversamente proporcional. E também, o agrupamento hierárquico, que possibilita, interpretar visualmente as amostras, quanto menor a

distância, mais semelhança entre si, portanto, apresentando comportamento similar à determinado tratamento. Tais análises, se tornam muito importantes, pois, indicam que variáveis são mais relevantes e que processos são relacionados com seus resultados.

O uso destas técnicas são largamente empregadas na área agrícola, e com grande uso na avaliação da produção das culturas, como na análise de diversidade genética de acessos de cana-de-açúcar (TENA; MEKBIB; AYANA, 2016), na seleção de variedades mais produtivas (SANTCHURN et al., 2012) e de atributos do ambiente produtivo, nutricional e tecnológico da cana-de-açúcar (RODRIGUES JÚNIOR et al., 2013). Foi utilizada a análise de componentes principais, pois de acordo com Cruz; Regazzi; Carneiro (2004), esta possibilita avaliar qualitativamente os elementos e sua importância dentro de cada avaliação, indicando quais caracteres devem ser descartados (correlação) ou que não são muito importantes.

Avaliar a produtividade da água nos cultivos é essencial para incrementar o manejo e a eficiência do uso da água, pois, há forte relação entre os valores de água empregados ou precipitados e os retornos tecnológicos da cultura. Diante disso, torna-se pertinente relacionar o P e a água (irrigação+precipitação pluviométrica) e a produção final da cultura de cana-de-açúcar. O objetivo desse trabalho foi avaliar por meio de análise de componentes principais a qualidade industrial de açúcar da cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.

2.1 MATERIAL E MÉTODOS

2.1.1 Área experimental (clima e solo)

Os valores experimentais foram obtidos de Vasconcelos (2013), durante junho de 2011 a junho de 2012 na Fazenda Santo Antônio, município de Itajobi-SP, nas coordenadas 21° 11' S e 49° 1' W com altitude de 469 m, e clima Aw (CEPAGRI, 2018) na Figura 18. Com verão chuvoso e inverno seco, temperatura média anual de 23,2 °C e precipitação pluvial média anual de 1.328 mm (CEPAGRI, 2018).

Na área experimental, 20 dias após a implantação do cultivo foi aplicada a irrigação de salvamento no sulco de plantio com uma lâmina de 80 mm de água, pois no mês de maio de 2011, houve precipitação de 20 mm. Para o cultivo, foi utilizada a RB86 7515 que segundo o PMGCA (2008) apresenta alta velocidade de crescimento,

porte alto, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmo, teor de sacarose e produtividade agrícola elevados

Figura 18 - Foto da área do experimento com a cana-planta variedade RB86 7515 aos 120 dias após o plantio. Itajobi-SP (2011).

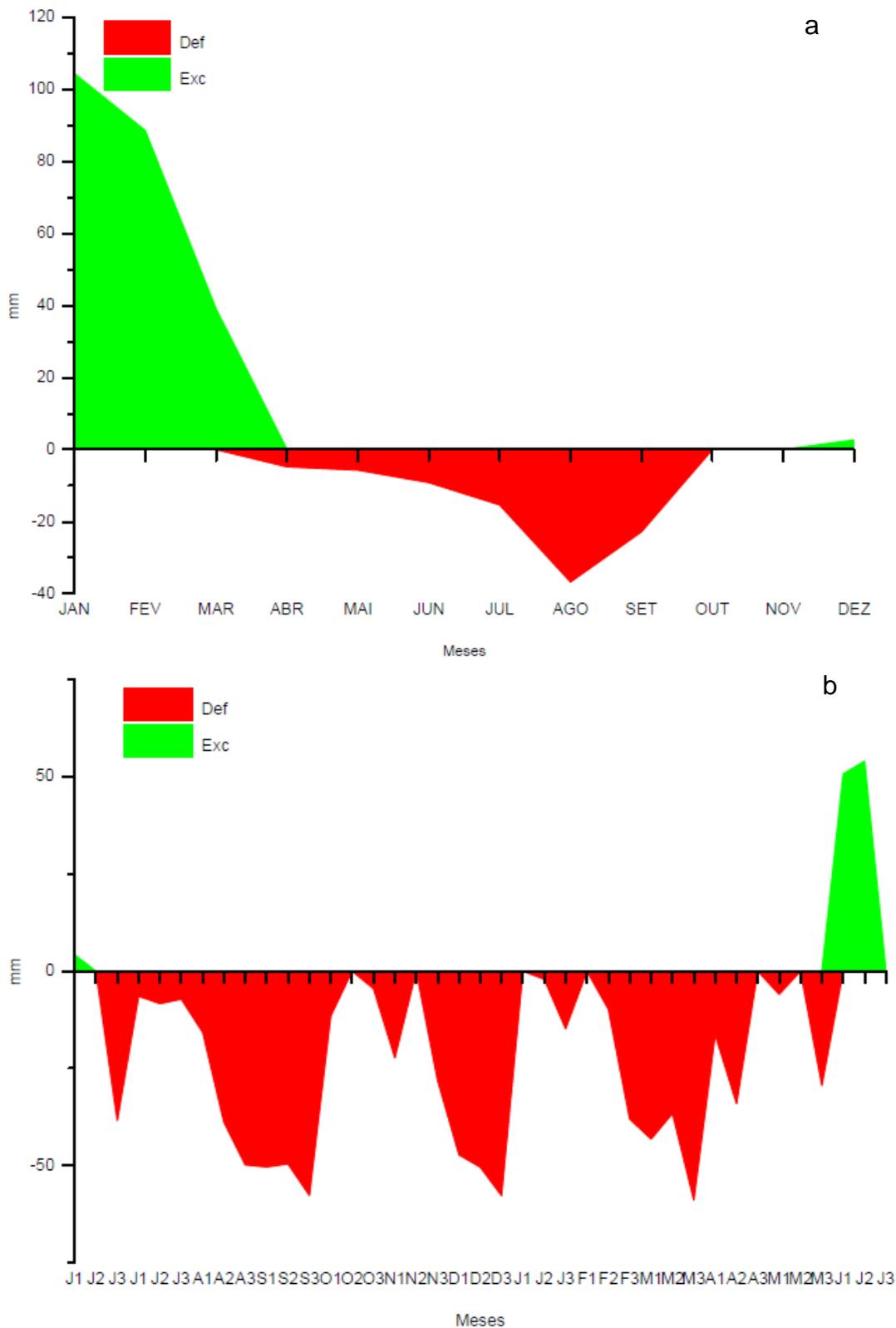


Os dados de balanço hídrico normal do município de Itajobi-SP foram obtidos no CEPAGRI (2018), baseado em um banco de dados climáticos de 30 anos e o balanço hídrico sequencial, que apresenta o período de cultivo dividido em decêndios são apresentados na Figura 19.

No balanço hídrico climatológico a entrada da água se faz: pela precipitação, irrigação, orvalho, escoamento superficial, drenagem lateral e ascensão capilar, com saídas pela evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda, há uma versão simplificada, feita por Thornthwaite; Mather (1955) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Há outro balanço climatológico, este, contempla o acompanhamento real de água no solo e pode ser feito em diferentes escalas de tempo durante o período de cultivo (PEREIRA; ANGELOCCI, SENTELHAS, 2007).

Figura 19 - Balanço Hídrico Normal (a) e Balanço Hídrico Sequencial (b) do município de Itajobi-SP (junho de 2011 a junho de 2012).



Os objetivos do balanço hídrico climatológico são apresentar informações da área avaliada, como a melhor época de semeadura, indicação de momentos de seca, determinação de área apta para determinados cultivos e a caracterização do potencial de armazenamento hídrico da área (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

De acordo com a Embrapa (2013), o solo da área é um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média. Quanto as análises químicas e granulométricas do solo foram realizadas segundo Raij et al. (2001) e Camargo et al. (2009), respectivamente (Tabela 7).

Tabela 7 - Análises química e granulométrica do solo da área experimental. Fazenda Santo Antonio, Itajobi - SP (2011).

Profundidade (m)	pH	M.O. ^a	P	K	Ca	Mg	H+Al	CTC ^b	T ^c	V ^d
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmolc dm ⁻³ -----						%
0,00–0,20	6,1	10,0	5,0	1,1	29,0	13,0	10,0	42,3	52,3	81
0,20–0,40	5,6	10,0	4,0	0,9	25,0	9,0	12,0	34,8	46,8	74
Profundidade (m)	Granulometria									
	Argila	Silte	Areia Fina		Areia Grossa		----- g kg ⁻¹ -----			
0,00–0,20	209	40	464		287					

Legenda: M.O.^a: matéria orgânica do solo, CTC^b: capacidade de troca catiônica, T^c: CTC + (H+Al), V^d: saturação por bases.

2.1.2 Tratamentos e variedade cultivada

A dose referência para os tratamentos foi de 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅, para o estado de São Paulo (SPIRONELLO et al., 1997). O delineamento experimental estatístico utilizado foi o de blocos completos ao acaso em esquema fatorial 3x4x2, tendo três fontes de P: superfosfato triplo (41% de P₂O₅ em ácido cítrico), fosfato natural reativo Bayóvar (14% de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico), e fosfato natural Araxá (4% de P₂O₅ em ácido cítrico); quatro doses de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico (0, 90, 180 e 360 kg ha⁻¹), na ausência e presença da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹ em base seca) com três repetições.

As recomendações para as adubações de plantio e cobertura foram de Spironello et al. (1997), no plantio aplicou-se 151,1 kg ha⁻¹ (sulfato de amônio), 204,4 kg ha⁻¹ (cloreto de potássio) e 24,8 kg ha⁻¹ (sulfato de zinco). Na adubação de cobertura empregou-se 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio (uréia) e 160 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio).

As avaliações químicas e teor de matéria orgânica, da torta de filtro foram realizadas de acordo com Alcarde (2009) e Walkley; Black (1934), obtendo-se: N(total): 3,4 g kg⁻¹; P₂O₅ (total): 8,2 g kg⁻¹; P₂O₅ (solúvel ácido cítrico 2%): 7,8 g kg⁻¹; K₂O: 2,2 g kg⁻¹; CaO: 12,2 g kg⁻¹ e para o teor de matéria orgânica de 304,7 g kg⁻¹.

Acrescentou-se o aditivo BioPack^{sc®}, (possui ácidos orgânicos e microrganismos fosfolubilizadores) na torta de filtro. Empregou-se 800 mL do produto para compostagem de oito toneladas de torta de filtro. Os tratamentos e a adubação básica de plantio foram adicionados e homogeneizados, após a sulcação foram depositados na profundidade de 0,30 m. Em relação ao manejo fitossanitário, não houve presença de pragas de solo ou plantas invasoras.

As parcelas apresentavam as seguintes dimensões: 112,5 m², com cinco linhas distanciadas de 1,5 m, com 15 m de comprimento cada, onde utilizou-se apenas as três linhas centrais (área útil de 67,5 m²) para as avaliações. A lâmina de irrigação de salvamento, no valor de 80 mm de água foi aplicada em área total de cada parcela.

2.1.3 Análise tecnológica e produtividade da água na cana-de-açúcar

Na colheita, aos doze meses, pesou-se vinte colmos de cada parcela e realizou-se o cálculo das médias de produtividade de colmos (Mg ha⁻¹), fibra (%), toneladas de Pol ha⁻¹ (TPH, em Mg ha⁻¹), sacarose (%) e açúcar total recuperável (ATR, em kg ha⁻¹), de acordo com Consecana, (2015).

A produtividade da água na cultura (PA_c) de cana-de açúcar, foi obtida com a inserção dos dados de produção de colmos, TPH na seguinte equação:

$$PA_c = \frac{P_c}{ET_c \text{ ou } (P+I)} \quad (3)$$

em que, PA_c : produtividade da água na cultura (kg mm, L, m⁻³), P_c : produção de colmos (Mg ha⁻¹), ET_c : evapotranspiração da cultura, P : precipitação pluviométrica, I : irrigação.

2.1.4 Análise de componentes principais da qualidade industrial da cana-de-açúcar

Aplicou-se a ferramenta de análise multivariada (componentes principais) e de produção de gráficos biplots e dendrograma do *software* Minitab 17[®] das seguintes variáveis: produção de colmos (Mg ha^{-1}), fibra (%), TPH (Pol ha^{-1} , em Mg ha^{-1}), sacarose (%) e ATR (kg ha^{-1}) que foram avaliados para determinação das combinações mais produtivas.

2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.2.1 Produtividade da água, análise multivariada, tratamentos aplicados e comportamento do clima: efeitos nas variáveis estudadas

Os valores referentes a produtividade da água para TPH da cana-de-açúcar, não apresentaram efeitos significativos para as interações, somente para torta de filtro e doses (Tabela 8).

Tabela 8 - Produtividade da água (PA_c) de TPH (Pol ha^{-1}) de cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento e adubação fosfatada.

Tratamentos	Pol ha^{-1} - TPH (kg m^{-3})
Torta de filtro	
Presença	1,95a
Ausência	1,16b
Teste (F)	1,27**
Fontes	
Superfosfato Triplo	1,70
Fosfato Bayóvar	1,57
Fosfato de Araxá	1,45
Teste F	1,21 ^{NS}
Doses	
0 kg ha^{-1} de P_2O_5	0,82
90 kg ha^{-1} de P_2O_5	2,37
180 kg ha^{-1} de P_2O_5	2,57
360 kg ha^{-1} de P_2O_5	3,44
Teste F	2,12**
(T) x (F)	0,9 ^{NS}
(T) x (D)	1,79 ^{NS}
(F) x (D)	3,25 ^{NS}
(T) x (F) x (D)	5,28 ^{NS}
C.V. (%)	5,08

Legenda: ** e ^{NS} significativo a 1% e não significativo, respectivamente.

A presença da torta de filtro e as doses crescentes de P proporcionaram as maiores produtividades de água para TPH. Tal fato, pode ser relacionado ao emprego da torta de filtro, pois de acordo com Rossetto; Santiago (2007) e Rossetto et al. (2010) o seu uso no plantio de inverno promove umidade do solo e reduz oscilações térmicas, beneficiando a brotação. E quanto ao P, tem participação em processos metabólicos diversos, como a formação da sacarose (ALEXANDER, 1973), o que pode representar a redução dos efeitos negativos da baixa precipitação, com o uso da torta de filtro, como fonte adicional de P e como material que reteve a água da irrigação de salvamento.

Em irrigação plena, foi obtida produtividade da água na faixa entre 0,69 e 1,22 kg m⁻³ de açúcar (TPH) na variedade RB92 579 (SILVA et al., 2011). Sob ambiente protegido cultivadas com irrigação plena e com 70% de reposição, a produtividade da água para 23 variedades, oscilou entre 2,0 a 2,11 kg m⁻³ de açúcar (LEAL et al., 2015). Percebe-se que fatores como aspectos edafoclimáticos, genéticos e de manejo, são responsáveis pelas variações observadas. Como pode ser exemplificado nos valores de produção da água sobre a produção de açúcar na variedade RB86 7515 cultivada em Nitosol Vermelho eutrófico, que variou entre 2,20 a 1,96 kg m⁻³, respectivamente (LEAL et al., 2017).

Em relação a condição climática que ocorreu durante o experimento (2011-2012), foi verificado a atuação do fenômeno atmosférico *El Niño* de intensidade fraca, originado do aquecimento das águas leste e central do Oceano Pacífico, sendo classificado como tipo MIX, porém entre 2010 e 2011, esse fenômeno atuava com moderada intensidade (KAYANO et al., 2016). É sabido, que oscilações no fluxo atmosférico, são capazes de transformar mesmo que momentaneamente o regime hídrico de regiões, acentuando secas ou intensificando volumosas precipitações.

Houve no cultivo experimental, na fase inicial de perfilhamento uma forte deficiência hídrica, onde foi preciso realizar irrigação de salvamento por 20 dias e na fase final de maturação e acúmulo de sacarose nos colmos, ocorreu elevação da precipitação pluviométrica (Figura 19), o que pode ser afetado o desenvolvimento inicial e os resultados da cultura respectivamente.

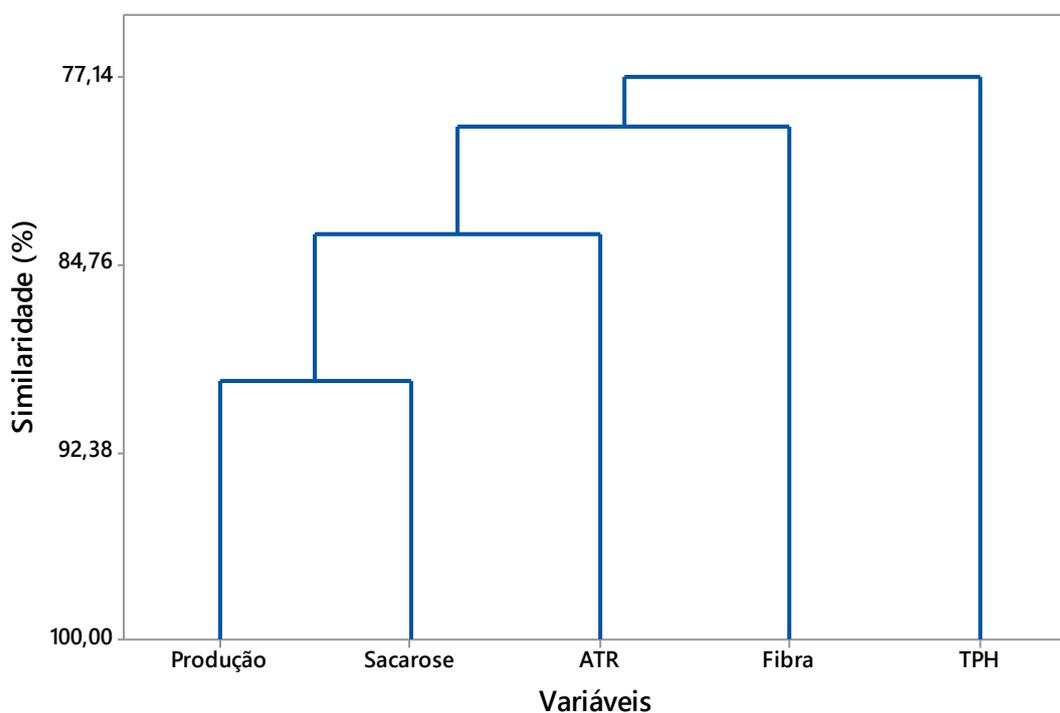
As fases de perfilhamento e formação (intenso crescimento) são as mais sensíveis às condições de deficiência hídrica (ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2010). Sob tais condições, é relatado intensas modificações no sistema fisiológico da planta, afetando entre outros, o fluxo fotoquímico de elétrons e a distribuição de

fotoassimilados, prejudicando as trocas gasosas, biometria da planta (altura e área foliar), com efeitos na produção final (TAIZ; ZEIGLER, 2004; ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2010; ENDRES et al., 2010).

A umidade do solo é fundamental para haja uma adequada condição de transporte de P até as raízes e absorção pela planta. Entre o transporte do elemento e sua assimilação pelo vegetal é imprescindível um satisfatório volume de água no solo, levando-se em consideração a distância entre o elemento e o sistema radicular, teor e interação do P - colóide na solução do solo e temperatura do ambiente produtivo, tais fatores interferem no mecanismo de difusão do P (COSTA et al., 2006).

Portanto, quando há períodos de veranico, ocorre uma interrupção deste mecanismo, o que afeta sua disponibilidade às plantas, com potencial de reduzir os resultados finais da cultura. Na Figura 20 é apresentado o comportamento das variáveis industriais (produção de colmos, sacarose, ATR, fibra e TPH)

Figura 20 - Dendrograma das inter-relações da produção de colmos (Mg ha^{-1}), sacarose (%), ATR (Kg ha^{-1}), fibra (%) e TPH (Mg ha^{-1}).



O agrupamento dos dados por meio do dendrograma, apresentou-se eficiente para definição das variáveis analisadas, observando-se que a produção de colmos e sacarose apresentam elevada semelhança em função dos tratamentos, seguida com menor similaridade, o ATR, fibra e TPH. Diante disto, é possível visualizar distinção

entre a produção de colmos e sacarose, das demais variáveis. O comportamento da produção de colmos e sacarose, demonstra que as condições produtivas afetaram fortemente estas variáveis. As variáveis TPH, fibra e ATR, que se apresentam mais externas, indicam que sob esta análise, são distantes entre si e em relação a produção de colmos e sacarose. A confirmação do desempenho destas variáveis é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 - Componentes principais (CP1 e CP2) e análise fatorial das variáveis industriais da cana-de-açúcar sob doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro) sob irrigação de salvamento.

Variável	Componente Principal	
	CP1	CP2
Variância explicada = 81,7%	72,2%	9,5%
Variável	Correlação ¹	
Produção de Colmos (Mg ha ⁻¹)	0,470	0,005
Fibra (%)	0,427	0,172
TPH (Mg ha ⁻¹)	0,421	0,735
Sacarose (%)	0,476	-0,250
ATR (kg ha ⁻¹)	0,439	-0,607
Variável	Análise Fatorial	
	Correlação ¹	
	Fator 1	Fator 2
Produção de Colmos (Mg ha ⁻¹)	0,892	0,004
Fibra (%)	0,811	0,119
TPH (Mg ha ⁻¹)	0,800	0,508
Sacarose (%)	0,905	-0,173
ATR (kg ha ⁻¹)	0,834	-0,419

Legenda: ¹Correlações consideradas na interpretação do componente principal e de análise fatorial.

Sob a análise multivariada, as variáveis estudadas são explicadas pelo primeiro componente - CP1 e segundo componente - CP2 respectivamente em 72,2% e 9,5% da variação total (Tabela 9). Para o CP1 relaciona-se as variáveis produção de colmos, fibra, TPH, sacarose e ATR, percebe-se que se destaca somente a produção de colmos (0,470) e sacarose (0,476) são as variáveis que mais se correlacionam com o primeiro componente principal (CP1), apresentando correlação positiva, portanto, um aumento destas variáveis eleva os valores de CP1. Para o CP2, há fortes correlações negativa para ATR (-0,607) e positiva para TPH (0,735), deste modo, um crescimento nos valores de TPH incrementariam os valores de CP2 e aumentos nos valores de ATR reduziriam CP2, para as demais variáveis, não houve relevância.

O uso de componentes principais apresenta a vantagem de condensar todo um sistema complexo de dados relacionados, de forma a fornecer informações da real

importância de cada variável estudada e sua conexão com as demais, sob este ponto, no presente trabalho é verificado maior relevância das variáveis produção de colmos, sacarose, ATR e TPH, que são extremamente correlacionadas entre si e de grande influência nos rendimentos finais da cultura.

A análise fatorial, que possui a capacidade de analisar a estrutura de um conjunto de variáveis inter-relacionadas entre si, visa construir uma relação de relevância entre as variáveis e os fatores recém gerados (MARÔCO, 2011). A análise de componentes e análise fatorial, são técnicas que se completam, podendo ser transcritas da Tabela 9, deste modo:

$$CP1 = 0,470xTCH + 0,427xfibra + 0,421xTPH + 0,476xsacarose + 0,439xATR$$

$$CP2 = 0,005xTCH + 0,172xfibra + 0,735xTPH + (-0,250)xsacarose + (-0,607)xATR$$

$$TCH = 0,470xFator\ 1 + 0,004xFator\ 2, \dots ATR = 0,834xFator\ 1 + (-0,419)xFator\ 2$$

Podendo-se inferir que sob as condições edafoclimáticas e tratamentos aplicados no cultivo, o ATR foi a variável que apresentou correlação negativa, representando perdas na recuperação da sacarose, contudo, para a produção de colmos, sacarose e TPH houve correlação positiva. Na Tabela 9 é mostrado os componentes principais das variáveis industriais da cana-de-açúcar sob fontes e doses de P na presença e ausência de torta de filtro.

Apesar da relação direta e positiva entre a produção de colmos e sacarose no CP1, houve durante os meses anteriores à colheita, temperaturas médias não tão baixas e elevada precipitação pluviométrica média, o que pode ter afetado o processo de maturação da cana-de-açúcar, possivelmente, reduzindo os níveis de sacarose, o que seria reforçado pela forte correlação negativa de ATR em CP2. A correlação negativa de ATR reflete uma menor recuperação de sacarose pelo processo industrial, contudo, a elevada correlação de TPH indica que a variável produção de colmos influenciou diretamente na produção de açúcar (TPH).

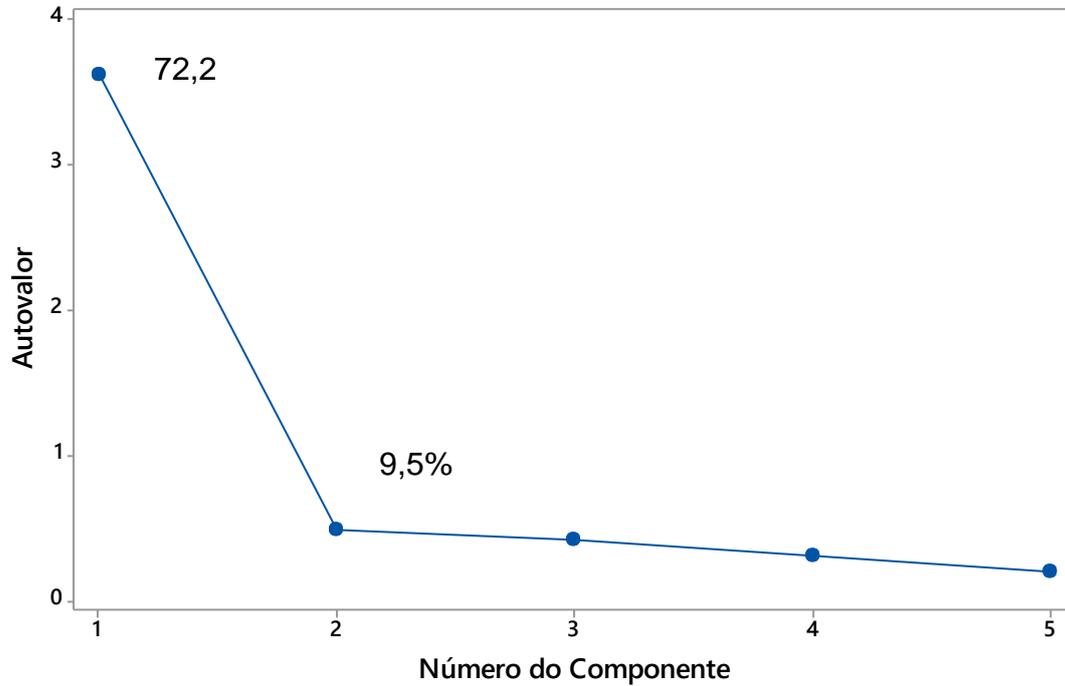
A associação de condições climáticas e nutricionais são capazes de interferir no mecanismo de maturação da cana-de-açúcar, onde excesso de fertilizantes ou de água (precipitação ou irrigação) aumentam o vigor vegetativo das plantas, o que retarda o processo de transferência e acúmulo de sacarose nos colmos. Pois a

maturação é um processo que requer temperatura e umidade do solo mais baixas, em que a primeira, reduz a absorção de nutrientes, diminuindo o desenvolvimento da planta, promovendo um acúmulo de açúcares e a segunda potencializa a desidratação (menor teor de água nos tecidos), resultando na transformação de açúcares redutores em sacarose (TOPPA et al., 2010). Além disso, os mesmos autores comentam que quando há excesso de fertilizantes há uma redução nos níveis de sacarose e elevação dos teores de açúcares redutores.

Corroborando o com presente trabalho, Fravet et al. (2010) ao utilizarem doses de torta de filtro em soqueira da variedade SP81 3250 cultivada Latossolo Vermelho Amarelo textura argilosa, observaram incrementos na produção de colmos e na TPH, no entanto, houve reduções nos teores de sacarose. Também é relatado comportamento semelhante, com aumentos na produção de colmos e de TPH na aplicação exclusiva de fósforo (superfosfato triplo) na variedade RB86 7515 cultivada em Latossolo Amarelo Distrófico (CALHEIROS et al., 2012). E ao empregar em conjunto a torta de filtro e doses de P (superfosfato triplo) na variedade RB86 7515 cultivada em Argissolo Vermelho Distroférrico, foi verificado elevação na produção de açúcar (SANTOS et al., 2011).

Durante a determinação dos componentes principais mais importantes para o estudo, é necessário verificar sua relevância, que pode ser obtida na escolha de autovalores (Tabela 9), e pelo gráfico de *scree-plot* (Figura 21), que apresenta de forma gráfica os autovalores, baseando-se na ordem de cada componente e representando a porcentagem de variância explicada de cada variável.

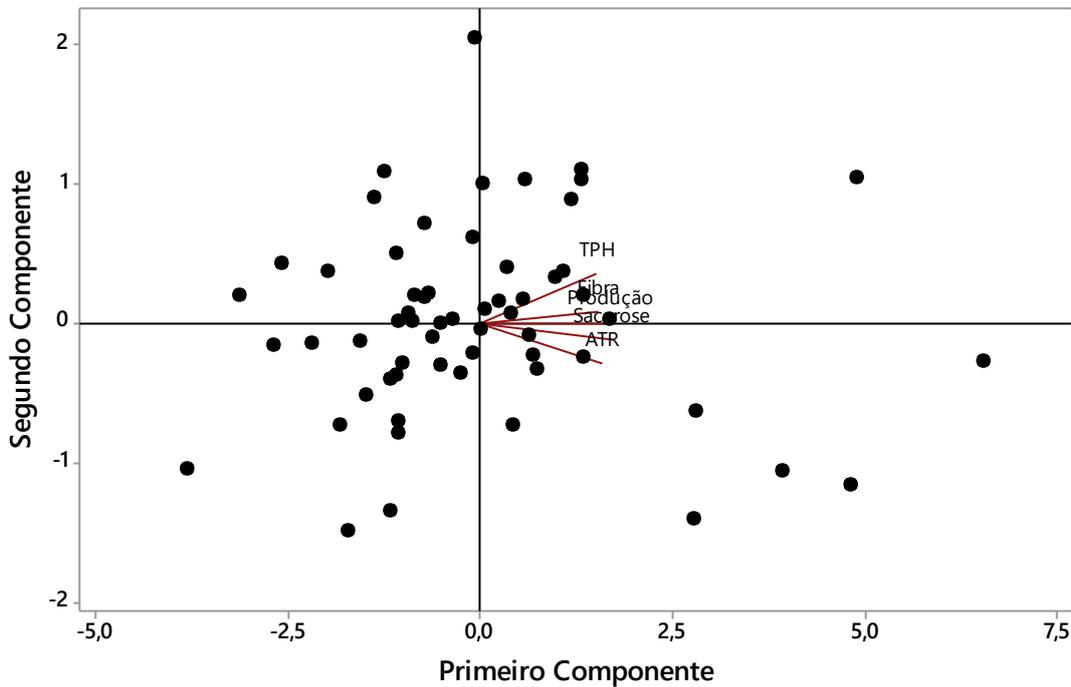
Figura 21 - Contribuição de cada variável para explicação da variância total (*scree plot*) da qualidade industrial da cana-de-açúcar sob doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro).



Deve-se atentar que, quando a curva se torna próxima de uma reta, paralela ao eixo das abscissas, os componentes relacionados podem ser descartados, pois apresentam variabilidade muito baixa. Conforme Hair Junior (2009), componentes principais que possuem autovalores acima de 1,0 ou que concentrem variância acumulada acima de 70% devem ser utilizados.

Além disso, realizou-se a construção do gráfico *bi plot*, que tem como objetivo discriminar as relações mais destacadas entre as variáveis e componentes principais (Figura 22).

Figura 22 - Dispersão (*bi plot*) dos componentes principais CP1 e CP2 contendo as variáveis (qualidade industrial) da cana-de-açúcar sob doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro).



Observa-se que as variáveis se concentram nos quadrantes I (TPH, fibra e produção de colmos) e IV (sacarose e ATR), nota-se que as variáveis produção de colmos e sacarose estão relacionadas, demonstrando que essas variáveis possuem a mesma representatividade no gráfico, ou seja, têm grandes cargas fatoriais positivas no CP1.

Além disso, as variáveis TPH e ATR também contribuem no processo, pois além de serem relevantes no sistema, estão bem próximas ao círculo unitário, no entanto, caracterizando extremos entre todas as variáveis.

Em Nitossolo e Latossolo cultivados com a variedade RB85 5453 e submetidos a fertilização com fontes de P na presença e ausência de torta de filtro, a máxima produção de colmos no Nitossolo foi obtida com o uso exclusivo da fonte mineral, enquanto que para o Latossolo a fonte mineral associada com a torta de filtro proporcionou a maior produção de colmos (MODA et al., 2015).

Ao avaliarem oito genótipos de cana-de-açúcar cultivados em diferentes solos da Flórida, constatou-se uma relação crescente e positiva entre a produção de colmos e de açúcar sob aumento das doses de P (GLAZ et al., 2000). Do mesmo modo, analisando variedades em solos da Flórida, McCray et al. (2010) observaram incrementos na produção de açúcar e de colmos.

No entanto, houve respostas diferenciadas da variedade RB86 3129 cultivada em solos de Pernambuco, em que apresentou para a produção de colmos e de TPH seus maiores valores sob as menores doses de P, o que indica, alta deficiência do elemento no solo combinado com a baixa precipitação pluviométrica, visto que essa variedade foi desenvolvida para locais mais úmidos (SIMÕES NETO et al., 2012). Os mesmos autores, apontam que, apesar do ATR não ter sido influenciado pelas doses de P, os maiores valores foram verificados em solos que apresentam maior deficiência de P.

Em estudo com doses de P e fertilizante organomineral, Teixeira; Sousa; Korndörfer (2014) observaram que a variedade IAC 95-5000 produziu colmos e açúcar em valores semelhantes sob ambos tratamentos, e que não houve efeito dos tratamentos para sacarose e ATR.

Uma planta de cana-de-açúcar que apresenta teores adequados de P e está sob condições apropriadas de produção tem condições de expressar uma boa relação entre produção de colmos e de açúcar, pois é capaz de aumentar sua produtividade e de elevar os níveis de sacarose acumulada, e potencialmente os teores de açúcar recuperável por meio de um processo fotossintético sem limitações nutricionais. Portanto, toda variação nas respostas observadas, devem ser atribuídas ao material de origem da torta de filtro, as condições edafoclimáticas, a solubilidade e a dose da fonte de P empregada e a genética da variedade cultivada.

CONCLUSÕES

O açúcar total recuperável apresentou correlação negativa, representando perdas na recuperação da sacarose. Possivelmente, a deficiência hídrica na maior parte do cultivo e a elevada precipitação pluviométrica na fase de maturação da cana-de-açúcar reduziu os níveis de sacarose, o que seria reforçado pela forte correlação negativa do açúcar total recuperável. A elevada correlação de Pol indica que a variável produção de colmos influenciou diretamente na produção de açúcar. Os maiores incrementos na produtividade da água em Pol foram obtidos na presença de torta de filtro (altos teores de matéria orgânica) e nas maiores doses de P.

REFERÊNCIAS

ALCARDE, J. C. **Manual de análise de fertilizantes**. FEALQ, Piracicaba. 2009, 279 p.

ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, 52 p, 1973.

BERNARDO, S; SOARES, A. A; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. p. 361-570.

CALHEIROS, A. S.; OLIVEIRA, M. W.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. B.; SANTIAGO, A. D.; ARISTIDES, E. V. S. Production of biomass, from sugar and protein in function of sugarcane varieties and phosphorous fertilization. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina. v. 33, n. 2, p. 809-818, 2012.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. IAC, Campinas. 2009. 77p.

CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_253.html>. Acesso em: 10 fev. 2018.

CONSECANA. Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. 6ª ed. Consecana. Piracicaba. 2015. 81 p.

COSTA, J. P. V.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, A. W.; FILHO, G. M.; SANTOS, J. R. Influence of phosphorus doses and soil moisture on diffusion flow. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 828 - 835. 2006.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**, vol. 1. Viçosa: Editora UFV, 2004. p. 171- 201.

DIACONO, M.; A. CASTRIGNANO, A.; TROCCOLI, A.; BENEDETTO, D.; BASSO, B.; RUBINO, P. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. **Field Crops Research**, v. 131, n. 49-62, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

ENDRES, L.; SILVA, J. V.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. S. Photosynthesis and water relations in Brazilian sugarcane. **The Open Agriculture Journal**, v. 4, p. 31 - 37, 2010.

FRAVET, P. R. F.; SOARES, R. A. B.; LANA, R. M. Q.; LANA, A. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 618-624, 2010.

GLAZ, B.; POWELL, G.; PERDOMO, R.; ULLOA, M. F. Sugarcane response to phosphorus fertilizer in relation to soil test recommendations on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 375–380, 2000.

HAIR JUNIOR., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre, Bookman, 2009. 688 p.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F.; GARCIA, S. R.; CALHEIROS, A. J. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. **Revista Climanalise**. p. 7- 12, 2016.

LEAL, D. P. V.; BARBOSA, F. S.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; COELHO, R. D.; MASCHIO, R.; SANTOS, L. C. Water Productivity into sugar and biomass for sugarcane. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 3., Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI, 2015. 1 CD-ROM.

LEAL, D.P.V.; COELHO, R. D.; BARBOSA, F. S.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; MAURI, R.; SANTOS, L. C. Water productivity for sugar biomass of sugarcane varieties. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 21, n. 9, p. 618-622, 2017.

MARÔCO, J. **Análise Estatística com a Utilização do SPSS**. 5. ed. Lisboa: Pero Pinheiro, 2011

McCRAY, J. M.; RICE, R. W.; LUO, Y.; JI, S. Sugarcane response to phosphorus fertilizer on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 5, p. 1468 - 1477, 2010.

MODA, L. R.; PRADO, R. M.; CAIONE, G.; CAMPOS, C. N. S.; SILVA, E. C.; FLORES, R. A. Effect of sources and rates of phosphorus associated with filter cake on sugarcane nutrition and yield. **Australian Journal of Crop Science**, Melbourne, v. 9, n. 6, p. 477 - 485, 2015.

PINHO, R. E. E. **Aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar por gotejamento subsuperficial: dinâmica de íons e balanço de água**. 2013. 97f. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

PMGCA. Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. Centro de Ciências Agrárias/UFSCAR, 2008.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. IAC, Campinas. 2001. 285 p.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 233-243. (Boletim, 100).

RODRIGUES JUNIOR, F. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; FRANCO, H. C. J. Soil attributes and leaf nitrogen estimating sugar cane quality parameters: brix, pol and fibre. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 3, p. 270-289, 2013.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A.C.; PRADO JÚNIOR, J. P. Q. P. Fósforo. In: DINARDO MIRANDA, L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. (Ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010, p. 271-288.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Cana-de-açúcar**: Adubação - resíduos alternativos. Agência de Informações Embrapa, Brasília, 2007. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html . Acesso em: 05 jan 2018.

SANTCHURN, D.; RAMDOYAL, K.; BADALOO, M. G. H.; LABUSCHAGNE, M. From sugar industry to cane industry: Evaluation and simultaneous selection of different types of high biomass canes. **Biomass and Bioenergy**, v. 61, p. 82-92, 2014.

SANTOS, D. H.; SILVA, M. A.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; ECHER, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 443-449, 2011.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. D.; ROCHA, A. T. D.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. D. S.; NASCIMENTO, C. W. D. Industrial characteristics of sugar cane under phosphate fertilization in soils of Pernambuco Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 347-354, 2012.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; GOMES JÚNIOR, W. F. Demanda hídrica e eficiência do uso da água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 12, p. 1257-1265, 2011.

SOUZA JUNIOR, J. A. **Impactos dos déficits hídricos na cultura de cana-de-açúcar em regiões produtoras de São Paulo, Minas Gerais e Paraná**. 2017. 147 f. (Tese em Meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B.; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. IAC, Campinas. 1997. p. 233-243.

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

TEIXEIRA, W. G.; SOUSA, R. T. X.; KORNDÖRFER, G. H. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 6, p. 1729-1736, 2014.

TENA, E.; MEKBIB, F.; AYANA, A. Genetic Diversity of Quantitative Traits of Sugarcane Genotypes in Ethiopia. **American Journal of Plant Sciences**, v. 7, p. 1498-1520, 2016.

TOPPA, E. V. B.; JADOSKI, C. J.; JULIANETTE, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 3, p. 3, p. 217-223, 2010.

VASCONCELOS, R. L. **Fontes de fósforo e torta de filtro sobre o estado nutricional e produtividade da cana-planta**. 2013. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2013.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-37, 1934.

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

CAPÍTULO 3 - COMPORTAMENTO MULTIVARIADO DO ESTADO NUTRICIONAL E BIOMETRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR IRRIGADA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE TORTA DE FILTRO E DA ADUBAÇÃO FOSFATADA

RESUMO

Dentre os desafios da cultura de cana-de-açúcar, destaca-se a nutrição mineral, particularmente o P, que em solos tropicais encontra-se pouco disponível à cultura e o fornecimento adequado de água. A região tropical possui irregularidade em suas precipitações pluviométricas, tornando recorrente o uso da irrigação, principalmente a irrigação de salvamento, que visa possibilitar condições de umidade necessária para emergência de plantas ou rebrota de soqueiras. A análise multivariada (componentes principais) é capaz de indicar a importância individual e a de correlações de uma variável, dentro do sistema produtivo agrícola, que é extremamente complexo. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar por meio de processos multivariados o estado nutricional e biometria de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada. A análise multivariada, é eficiente em converter elevado número e complexidade de dados em relações de relevância de fácil compreensão. O solo da área experimental foi um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média, no município de Itajobi-SP. O delineamento do experimento foi em blocos ao acaso, com três repetições, no arranjo $3 \times 4 \times 2$, com fontes de P (superfosfato triplo, fosfato natural reativo Bayóvar e fosfato natural de Araxá), doses (0, 90, 180 e 360 kg de P_2O_5 ha⁻¹), na presença e ausência da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹, base seca). Em toda a área experimental, foi aplicada a irrigação de salvamento em lâmina única de 80 mm de água. A análise de componentes principais mostrou que a variável nutricional K apresentou comportamento distinto e fortemente negativo das demais, especialmente de P, Fe, Mn e B, que possuem alto grau similaridade. Para as variáveis biométricas, os perfilhamento e perfilhamento final apresentaram correlação, no entanto, a altura de plantas, expressou alta correlação negativa.

Palavras-chave: Perfilhamento final. Altura de planta. Matéria orgânica. Agrupamentos hierárquicos.

CHAPTER 3 - MULTIVARIATE BEHAVIOR OF THE NUTRITIONAL STATE AND BIOMETRY OF SUGARCANE IRRIGATED IN THE FUNCTION OF THE APPLICATION OF FILTER CAKE AND PHOSPHATE FERTILIZATION

ABSTRACT

Among sugarcane cultivation challenges, mineral nutrition, particularly P, is outstanding, which in tropical soils is shortly available to the crop and adequate water supply. The tropical region has an irregularity in its rainfall, making recurrent the use of irrigation, mainly the water saving irrigation that aims to enable conditions of humidity necessary for the plants' emergence or ratoon regrowth. Multivariate analysis (main components) is able to indicate individual importance and variable correlation within the agricultural production system, which is extremely complex. Thus, our aim was to evaluate nutritional status and biometry of irrigated sugar cane using multivariate processes as a function of filter cake application and phosphate fertilization. The multivariate analysis is efficient in converting high number and complexity of data into relations of the relevance of easy comprehension. Experimental area soil was a Red Dystrophic Yellow Latosol, medium texture, in Itajobi-SP, Brazil. The experimental arrangement was in randomized blocks with three replications, in a $3 \times 4 \times 2$ factorial scheme with three sources of phosphorus (triple superphosphate, natural reactive phosphate Bayóvar and natural phosphate from Araxá), doses (0, 90, 180 and 360 kg of P_2O_5 ha⁻¹), in the presence and absence of filter cake (7.5 Mg ha⁻¹, dry basis). Throughout the experimental area, the water saving irrigation was applied in a single slide of 80 mm of water. The analysis of main components showed the nutritional variable K presented a distinct and strongly negative behavior of the others, especially of P, Fe, Mn, and B, that have high degree similarity. For biometric variables, tillering and final tillering showed correlation, however, plants height, expressed high negative correlation.

Keywords: Final tillering. Plant height. Organic matter. Hierarchical groupings.

3 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura que apresenta uma determinada tolerância térmica e a deficiência hídrica para seu cultivo, no entanto, as variações climáticas atualmente observadas estão mudando as condições de manejo. As regiões tropicais apresentam oscilações na precipitação pluviométrica, o que acarreta estresse nos cultivos, impactando de forma negativa a produção (DIACONO et al., 2012).

Para tal cenário, o uso da irrigação é essencial e responsável por aumentos na produção e qualidade dos cultivos agrícolas, fornecendo teores de umidade adequados para o desenvolvimento satisfatório da planta, proporcionando produção na entressafra. Em especial, o cultivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo é realizado em sequeiro, no entanto, há fornecimento pleno ou compensatório das necessidades hídricas da cultura.

E a irrigação de salvamento é a mais indicada, pois de acordo com Bernardo; Soares; Mantovani (2006) as fases mais sensíveis a deficiência hídrica são a brotação/emergência e perfilhamento/estabelecimento da cultura, exigindo suprimento adequado de água. Em lâmina única, essa irrigação apresenta a função de minimizar os potenciais efeitos negativos dos períodos de baixa precipitação pluviométrica, particularmente em soqueiras ou na emergência de perfilhos de cana-planta.

Sob este aspecto, a irrigação é um fator que aumenta a complexidade de avaliação de relações e interações do sistema produtivo, exigindo o uso de ferramentas que analisem de modo amplo todas as variáveis envolvidas, deste modo, abrangendo os processos que compreendam o ambiente produtivo. A análise exploratória (análise multivariada) é capaz de diferenciar e representar os modelos estruturais, espaciais e temporais, refletindo todas as possíveis relações que ocorram no meio (PINHO, 2013).

Em particular, a análise de agrupamentos, que reúne os dados obtidos com graus de semelhança e variabilidade entre si, onde se obtém/confirma de forma visual as dependências entre as características estudadas. Outro método que pode ser empregado é o de componentes principais, que também apresenta a forma gráfica dos valores (autovalores), representando as correlações mais relevantes dentro de cada componente principal.

O uso dessas análises são largamente utilizadas na área agrícola, e com grande emprego na produção das culturas, como na avaliação de cultivos de milho sob deficiência hídrica (MUSTAFA et al., 2015), caracterização morfológica de milho sob estresse térmico (KHODARAHMPOUR, 2012), seleção de genótipos de cana-de-açúcar tolerantes ao estresse salino (CHA-UM et al., 2012), interação de microrganismos na rizosfera e produção de cana-de-açúcar (INUI-KISHI et al., 2012).

Uma maior compreensão da relação da cultura de cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento e da aplicação da adubação fosfatada associada a torta de filtro, contribui para a tomada de decisões no manejo do nutriente dentro do sistema produtivo, reforçando a importância do presente trabalho. Portanto o objetivo deste estudo é a avaliar o comportamento multivariado do estado nutricional e biometria de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.

3.1 MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 Área experimental (clima e solo)

Os dados avaliados foram extraídos de Vasconcelos (2013), relativo ao experimento conduzido entre junho de 2011 a junho de 2012 na Fazenda Santo Antônio (Figura 23), no município de Itajobi-SP (21° 11' S e 49° 1' W com altitude de 469 m, e clima Aw). De acordo com CEPAGRI (2012) possui verão chuvoso e inverno seco, com temperatura média anual 23,2°C e precipitação pluvial média de 1.328 mm.

Foi aplicada 20 dias após a instalação do experimento, em lâmina única, 80 mm de água no sulco de plantio em forma de irrigação de salvamento. A baixa precipitação, de 20 mm no mês de maio, exigiu o uso de irrigação de salvamento.

Figura 23 - Foto da área do experimento com a cana-planta variedade RB86 7515 aos 120 dias após o plantio. Itajobi-SP (2011).



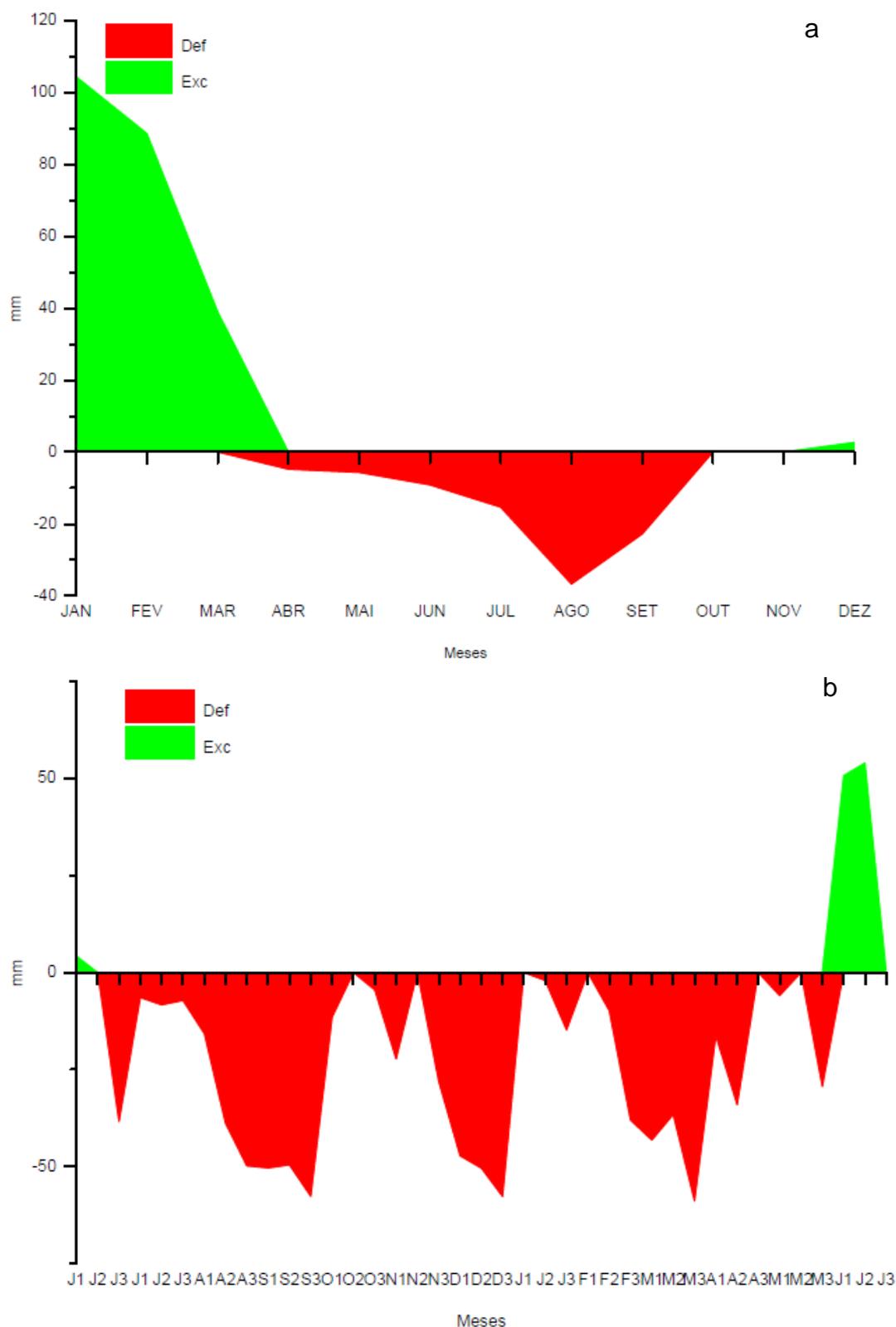
Fonte: Vasconcelos (2011).

Os balanços hídrico normal e sequencial do município de Itajobi-SP foram obtidos no banco de dados climáticos de 30 anos do CEPAGRI (2018), adotou-se para o balanço hídrico sequencial, períodos divididos em decêndios (Figura 24).

No sistema água-solo-planta-atmosfera a água entra por meio de: precipitação pluviométrica, irrigação, orvalho, escoamento superficial, drenagem lateral e ascensão capilar, sua saída ocorre: pela evapotranspiração, escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda, caracterizando uma multiplicidade de fatores, no entanto, existe uma versão reduzida, feita por Thornthwaite; Mather (1955) (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007).

Já o balanço hídrico sequencial, tem a função de acompanhar os teores reais de água no solo, representando uma condição mais efetiva, pode ser realizado em diferentes escalas de tempo, dependendo do cultivo (PEREIRA; ANGELOCCI, SENTELHAS, 2007).

Figura 24 - Balanço Hídrico Normal (a) e Balanço Hídrico Sequencial (b) do município de Itajobi-SP (junho de 2011 a junho de 2012).



Legenda: Balanço Hídrico Normal (a) - representação da média anual referente a 30 anos de dados climáticos. Balanço Hídrico Sequencial (b) - representação em escala decenal (a cada 10 dias) dentro de cada mês do período de cultivo (julho de 2011 a julho de 2012).

De acordo com a Embrapa (2013), o solo da área experimental é classificado como um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, textura média, para caracterização físico-químicas do solo, empregou-se análises recomendadas por Camargo et al. (2009) e Raij et al. (2001) respectivamente (Tabela 10).

Tabela 10 - Análises química e granulométrica do solo da área experimental. Fazenda Santo Antonio, Itajobi - SP (2011).

Profundidade (cm)	pH CaCl ₂	M.O. g dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	SB	T	V %
-----mmolcdm ⁻³ -----										
0-20	6,1	10,0	5,0	1,1	29,0	13,0	10,0	42,3	52,3	81
20-40	5,6	10,0	4,0	0,9	25,0	9,0	12,0	34,8	46,8	74
Profundidade (cm)	Granulometria									
0-20	Argila		Silte		Areia fina			Areia grossa		
----- g kg ⁻¹ -----										
	209		40		464			287		

3.1.2 Tratamentos e variedade cultivada

As doses de fósforo aplicadas, se basearam na dose de referência para o estado de São Paulo, 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (SPIRONELLO et al., 1997). O arranjo experimental foi em blocos completos ao acaso em esquema fatorial 3x4x2, tendo três fontes de P: superfosfato triplo (41% de P₂O₅ em ácido cítrico), fosfato natural reativo Bayóvar (14% de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico), e fosfato natural de Araxá (4% de P₂O₅ em ácido cítrico); quatro doses de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico (0, 90, 180 e 360 kg ha⁻¹), na ausência e presença da torta de filtro (7,5 Mg ha⁻¹ em base seca) com três repetições.

Ainda de acordo com Spironello et al. (1997) a adubação de plantio foram aplicados 151,1 kg ha⁻¹ (sulfato de amônio), 204,4 kg ha⁻¹ (cloreto de potássio), 24,8 kg ha⁻¹ (sulfato de zinco) e na adubação de cobertura 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio (uréia) e 160 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio).

A avaliação química (ALCARDE, 2009) e de teor de matéria orgânica (WALKLEY; BLACK, 1934) da torta de filtro apresentaram os seguintes resultados: N(total): 3,4 g kg⁻¹, P₂O₅ (total): 8,2 g kg⁻¹, P₂O₅ (solúvel ácido cítrico 2%): 7,8 g kg⁻¹, K₂O: 2,2 g kg⁻¹, CaO: 12,2 g kg⁻¹ e 304,7 g kg⁻¹ de matéria orgânica.

Na torta de filtro aplicou-se o aditivo BioPack^{sc}®, (rico em ácidos orgânicos e microrganismos fosfolubilizadores), na razão de 800 mL do produto para compostagem de oito toneladas de torta de filtro. Após a homogeneização dos tratamentos e da adubação de plantio, estes foram depositados no sulco de plantio, na profundidade de 0,30 m. Não houve incidência de pragas, doenças ou plantas invasoras na área experimental.

O experimento era composto por parcelas de 112,5 m², constituídas por cinco linhas de 1,5 m de distância entre as linhas, com 15 m de comprimento cada, no entanto, utilizou-se 67,5 m² para fins de avaliação, correspondendo as três linhas centrais. Foi aplicado em área total, a irrigação de salvamento, com lâmina de 80 mm de água.

3.1.3 Análise de componentes principais da biometria e estado nutricional da cana-de-açúcar

A determinação do estado nutricional de plantas de cana-de-açúcar foi realizada aos quatro e oito meses, com coleta de 15 folhas +1 utilizando-se o terço médio de cada folha amostrada por parcela, segundo metodologia de Miyazawa et al., 2009 e Raij; Cantarella (1997). Após a adequada limpeza das amostras, foram acondicionadas em sacos de papel em estufa a 65° C até atingirem peso constante e, moídas em moinho tipo Willey. Avaliou-se o número de colmos em um metro linear, nas três linhas centrais de cada parcela, no momento da colheita.

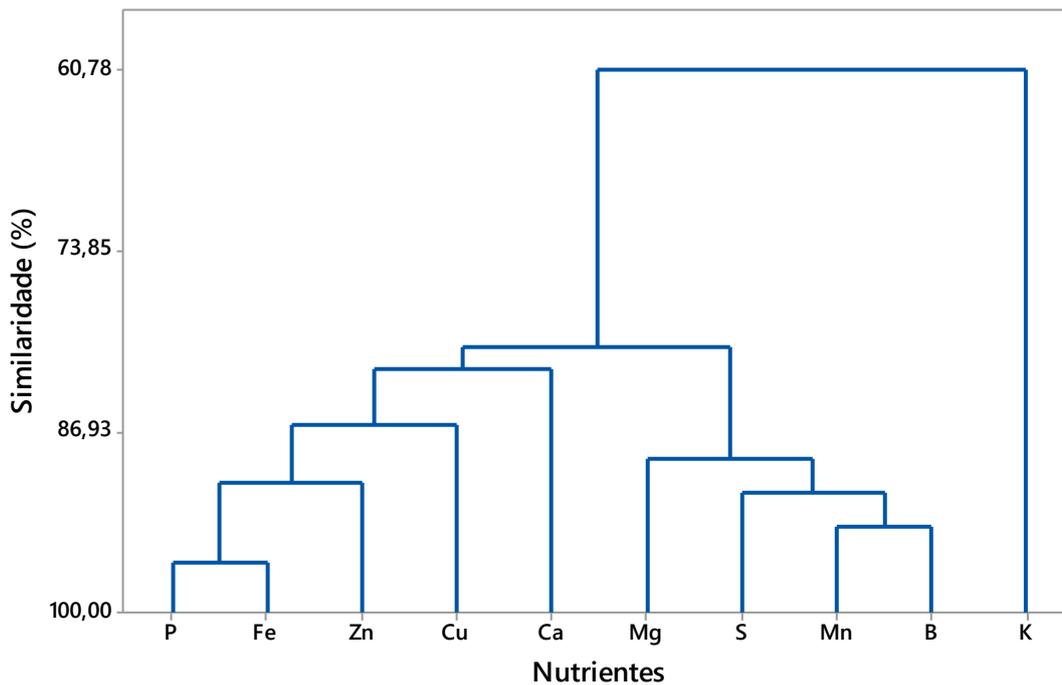
Foram utilizadas a análise de agrupamento e a análise de componentes principais, que de acordo com Cruz; Regazzi; Carneiro (2004), a primeira constrói a representação de todos os níveis de relações dos fatores avaliados e seus coeficientes de dissimilaridade e distância euclidiana entre outros, a segunda, possibilita avaliar as variáveis quanto a sua relevância dentro o universo estudado e em relação as correlações que participa.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Não houve resposta significativa para os teores de nutrientes aos quatro meses, e aos oito meses os teores de nitrogênio (N) foliar nas plantas de cana-de-açúcar não apresentaram resposta significativa para os tratamentos aplicados. Observa-se que o emprego do dendrograma (Figura 25) foi capaz de indicar o

comportamento dos nutrientes nas plantas de cana-de-açúcar, definindo três grupos distintos, o primeiro composto por Ca, Cu, Zn, Fe e P, sendo que Fe e P com elevada semelhança de comportamento, o segundo agrupamento é constituído por Mg, S, Mn, B, no qual Mn e B apresentam elevada semelhança entre si, já o K, com posição mais externa, possui comportamento distinto dos demais.

Figura 25 - Dendrograma do estado nutricional de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.



As condições experimentais e tratamentos aplicados, atuaram fortemente em P, Fe, Mn e B, pois estes possuem altas semelhanças de respostas. A demonstração do comportamento espacial dos nutrientes nas plantas de cana-de-açúcar é verificada na Tabela 11.

Tabela 11 - Componentes principais (CP1 e CP2) e análise fatorial do estado nutricional de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.

Variância explicada = 83%	Componente Principal	
	CP1 73,6%	CP2 9,4%
Variável	Correlação ¹	
Fósforo - P	0,331	0,057
Potássio - K	0,159	-0,901
Cálcio - Ca	0,292	0,193
Magnésio - Mg	0,306	-0,228
Enxofre - S	0,332	0,015
Manganês - Mn	0,348	-0,074
Cobre - Cu	0,323	0,139
Ferro - Fe	0,349	0,068
Boro - B	0,347	0,019
Zinco - Zn	0,329	0,255
Análise Fatorial		
Variável	Correlação ¹	
	Fator 1	Fator 2
Fósforo - P	0,899	0,055
Potássio - K	0,432	-0,874
Cálcio - Ca	0,791	0,187
Magnésio - Mg	0,831	-0,221
Enxofre - S	0,901	0,014
Manganês - Mn	0,944	-0,071
Cobre - Cu	0,875	0,135
Ferro - Fe	0,948	0,066
Boro - B	0,941	0,018
Zinco - Zn	0,892	0,247

Legenda: ¹Correlações consideradas na interpretação do componente principal e de análise fatorial.

De acordo com a análise multivariada, o primeiro componente - CP1 e segundo componente - CP2 explicam as variáveis estudadas em 73,6 e 9,4%, respectivamente (Tabela 11). O CP1 explica P (0,331), Mg (0,306), S (0,332), Mn (0,348), Cu (0,323), Fe (0,349), B (0,347) e Zn (0,329) como os que mais se correlacionam com este componente principal, seus valores positivos, indicam que uma elevação destas variáveis aumentam os valores de CP1. O CP2 explica o K (-0,901), alta correlação negativa, significando que os aumentos nos valores de K reduziram o CP2.

Uma das vantagens do emprego de componentes principais é a condensação do universo estudado e a determinação de todas as interações, no atual trabalho, constata-se uma grande correlação entre P, Mg, S, Mn, Cu, Fe, B e Zn, com forte influência na produtividade da cultura.

Em relação a análise fatorial, esta tem a vantagem de descrever categorias básicas, ou seja, fatores que são a representação das interrelações entre as variáveis, de forma reduzida, explicando a variância das variáveis estudadas, assim como, as correlações entre as variáveis (SOUZA; VICINI, 2005). Neste aspecto, todos os nutrientes contribuíram para o fator 1, com exceção do K, as maiores contribuições foram de Fe, Mn, B e S, contudo para o fator 2, o K contribui de forma negativa.

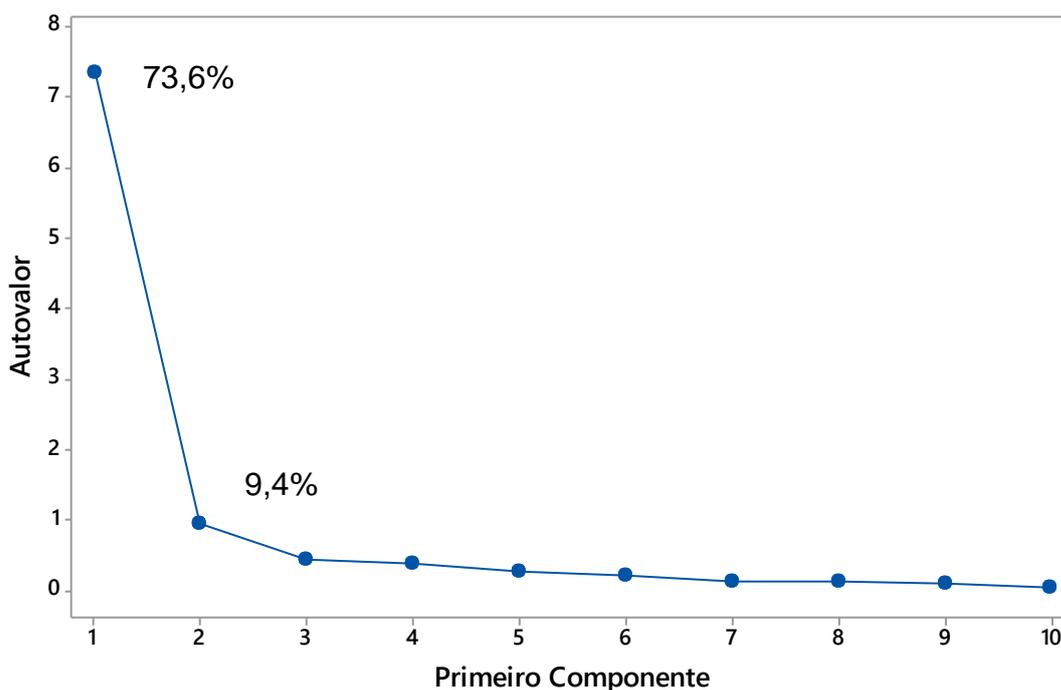
As relações obtidas pela análise de componentes e análise fatorial, são complementares (Tabela 11), podendo ser descritas desta forma:

$$CP1=0,331xP+0,159xK+0,292xCa+0,306xMg+0,332xS+...0,347xB+0,329xZn$$

$$P= 0,889xFator\ 1+0,055xFator\ 2, \dots Zn= 0,892xFator\ 1+0,247xFator\ 2$$

Os autovalores referentes as variáveis estudadas, indicam a sua importância dentro de cada componente principal (Tabela 11) e sua caracterização gráfica, pelo gráfico de *scree-plot* (Figura 26), que explicita a magnitude de cada componente principal em porcentagem.

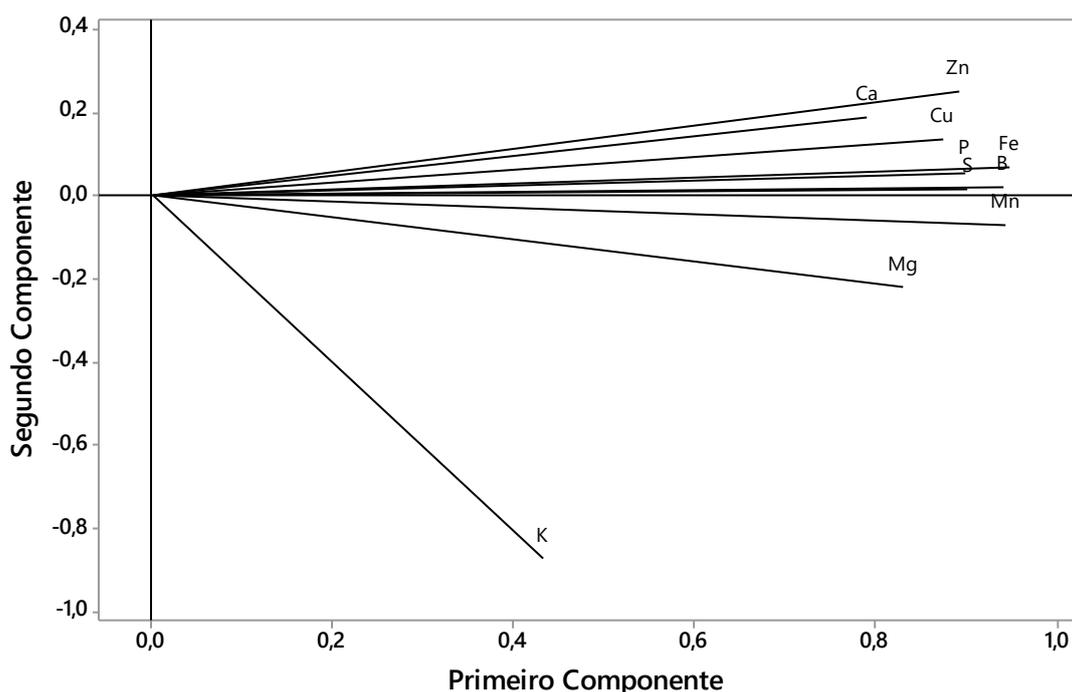
Figura 26 - Contribuição de cada variável para explicação da variância total (*scree plot*) do estado nutricional da cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e de adubação fosfatada.



Destaca-se, que a relevância de cada componente principal é estabelecida, até quando a curva se torna paralela ao eixo das abscissas, a partir deste ponto, os componentes podem ser desconsiderados, devido a muito baixa variabilidade. Além disso, é sugerido por Hair Junior (2009), a utilização de componentes principais que apresentem autovalores acima de 1,0 ou variância acumulada superior a 70%.

Deve-se ressaltar, que o comportamento diferenciado do K, pode ser atribuído aos teores muito baixo e baixo nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, respectivamente (Tabela 10). A apresentação visual dos componentes principais e as associações com as variáveis estudadas pode ser melhor avaliada, por meio do gráfico de cargas fatoriais, que representa a importância de cada variável dentro de cada componente (Figura 27).

Figura 27 – Contribuição de cargas fatoriais para o estado nutricional de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação da torta de filtro e da adubação fosfatada.



Verifica-se a confirmação de uma forte associação (carga fatorial) negativa do K com o CP2, contudo, a maior parte dos nutrientes possuem associação (carga fatorial) positiva com o CP1, e também, há grande semelhança de comportamento entre P, Fe, Mn e B.

Além disso, a torta de filtro utilizada possui baixos teores do nutriente, sua composição, é variável e dependente de fatores edafoclimáticos, manejo empregado

e variedade cultivada. Adorna; Crusciol; Rossato (2013) verificaram teores de potássio na torta de filtro variando entre 3,8 a 4,5 g kg⁻¹, já Caione et al. (2015) observaram teores de 3,4 g kg⁻¹ de potássio na torta de filtro.

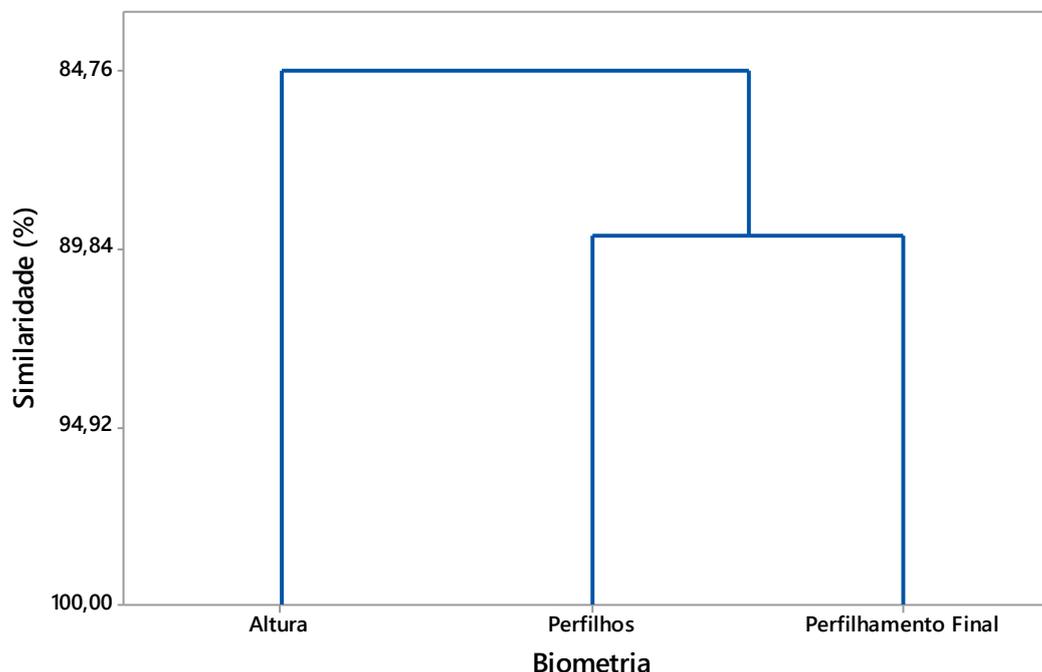
A torta de filtro em geral é rica em matéria orgânica; e esta tem grande capacidade de reter potássio, cálcio e magnésio, e sendo reservatório de nitrogênio, fósforo, enxofre e boro (BOT; BENITES, 2005). Tal informação corrobora com os resultados obtidos, além disso, o cobre, ferro, manganês estão adsorvidos ou disponíveis por meio da matéria orgânica. Nota-se que, em relação ao P, a matéria orgânica contida na torta de filtro, libera ácidos que competem pelos mesmos sítios de adsorção, portanto aumentando a presença de P disponível na solução do solo (PAVINATO; ROSOLEM, 2008). A aplicação de 5 Mg ha⁻¹ de torta de filtro é capaz de suprir 15 e 50% das necessidades da cana-de-açúcar em relação ao potássio e magnésio respectivamente (NUNES JUNIOR, 2008).

A disponibilização de Fe pela torta de filtro para plantas de cana-de-açúcar, se dá pela degradação dos óxidos de Fe da matéria orgânica em íons de Fe (ALMEIDA JUNIOR et al., 2011; GUPTA, 2011). Para o S, a mineralização da matéria orgânica promove a passagem da forma orgânica para sulfato na solução do solo, portanto, seus teores no solo e conseqüentemente na folha, dependerão do teor de matéria orgânica (TIECHER et al., 2012).

Em relação ao Cu, devido a sua natureza calcofílica, sua elevada presença na matéria orgânica da torta de filtro é relacionada a afinidade com grupos aminos e cianos, presentes na estrutura da matéria orgânica (SANTOS, 2014). Os micronutrientes Mn e Zn, apresentam elevados teores na torta de filtro, que perfazem 500 a 800 mg kg⁻¹ e 150 a 220 mg kg⁻¹, respectivamente (NUNES JUNIOR, 2008). A matéria orgânica é uma das principais fontes de B e sua liberação é devida a ação de microrganismos (BERGER; PRATT, 1963). Os elevados teores de matéria orgânica na torta de filtro, potencializaram a sua disponibilidade para as plantas.

As informações reforçam os benefícios que a torta de filtro representa como uma rica fonte de macro e micronutrientes, podendo ser aplicada como material que complementa as adubações minerais em inúmeras culturas. Para as avaliações biométricas, o dendrograma indica que as variáveis perfilhos e perfilhamento final apresentaram respostas semelhantes, diferindo da variável altura, que tem menor semelhança com as demais (Figura 28).

Figura 28 - Dendrograma das inter-relações da biometria de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.



Para a avaliação de componentes principais, a análise multivariada apresentou índice explicativo de 82,9% para o primeiro componente - CP1 e de 10,4% para o segundo componente - CP2 (Tabela 12).

Tabela 12 - Componentes principais (CP1 e CP2) da análise multivariada da biometria de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.

Variância explicada = 100%	Componente Principal	
	CP1	CP2
	82,9%	10,4%
Variável	Correlação ¹	
Altura aos oito meses	0,565	-0,790
Perfilhos aos seis meses	0,589	0,185
Perfilhamento final	0,577	0,585
Correlação ¹		
Análise Fatorial		
Variável	Fator 1	Fator 2
Altura aos oito meses	0,892	-0,440
Perfilhos aos seis meses	0,930	0,103
Perfilhamento final	0,910	0,326

¹Correlações consideradas na interpretação do componente principal e de análise fatorial.

O CP1 explica as variáveis altura aos oito meses (0,565), perfilhos aos seis meses (0,589) e perfilhamento final (0,577), que se correlacionam positivamente com o CP1, portanto, uma correlação direta, entre as variáveis e o CP1. O CP2 explica a variável altura aos oito meses (-0,790) e perfilhamento final (0,585) a primeira possui correlação inversa e a segunda, direta com o CP2.

Verifica-se que, a altura de colmos aos oito meses é a única variável apresentando alta correlação negativa, com CP2, que apesar de caracterizar um universo de menor relevância explicativa, torna-se um fator limitante para uma maior produtividade de cana-de-açúcar sob as condições experimentais e tratamentos empregados. Os perfilhamentos aos seis meses e final, apresentam maior relevância no CP1, já a altura aos oito meses, em CP2.

A análise fatorial indicou que todas as variáveis biométricas contribuíram fortemente na explicação do fator 1, no entanto, para o fator 2, não houve contribuição das variáveis. São complementares as respostas obtidas na análise de componentes e análise fatorial (Tabela 12), sendo descritas deste modo:

$$CP1=0,565xAltura+0,589xPerfilhamento+0,577xPerfilhamento Final$$

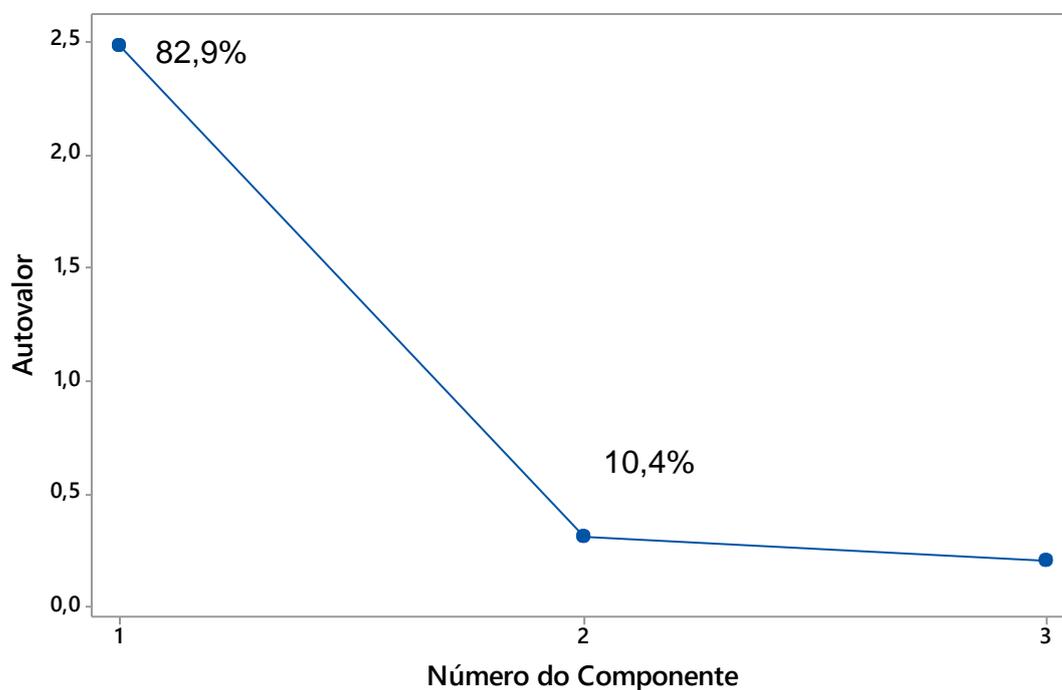
$$CP2=(-0,790)xAltura+0,185xPerfilhamento+0,585xPerfilhamento Final$$

$$Altura=0,892xFator 1+(-0,440)xFator 2, \dots Perfilhamento Final=0,910xFator 1+0,247xFator 2$$

Além de definir os componentes principais para o estudo, deve-se indicar a relevância de cada fator, relacionando-se os autovalores (Tabela 14) e sua descrição gráfica, pelo gráfico de *scree-plot* (Figura 29), que expressa a importância de cada componente principal em porcentagem.

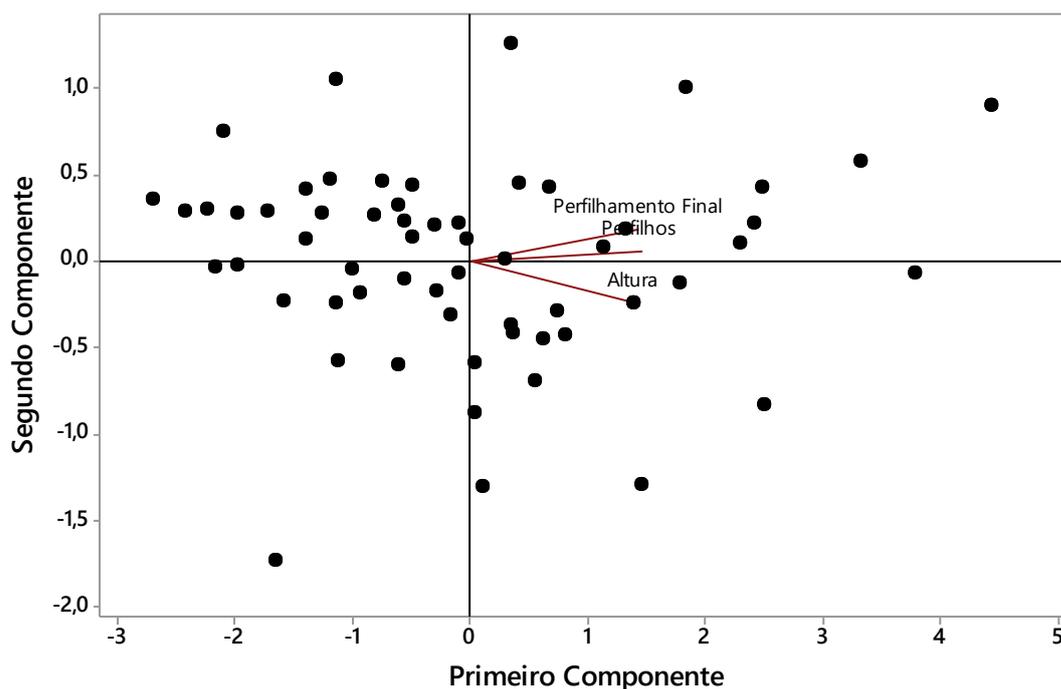
Ressalta-se, que a importância de cada componente principal é definida, até quando a curva se torna paralela ao eixo das abscissas, a partir deste ponto, os componentes podem ser desconsiderados, devido a muito baixa variabilidade. Outro modo, de definição, é recomendado por Hair Junior (2009), em somente deve ser utilizado os componentes principais que apresentem autovalores acima de 1,0 ou variância acumulada superior a 70%.

Figura 29 - Contribuição de cada variável para explicação da variância total (*scree plot*) da biometria da cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.



Para complementar o entendimento das variáveis e sua relevância, construiu-se um gráfico *bi plot*, que tem a função de distinguir as correlações mais expressivas entre as variáveis e componentes principais (Figura 30).

Figura 30 - Dispersão (*bi plot*) dos componentes principais CP1 e CP2 da biometria de cana-de-açúcar irrigada em função da aplicação de torta de filtro e da adubação fosfatada.



As variáveis perfilhos e perfilhamento final estão agrupadas no quadrante I e a altura no quadrante IV, constata-se que perfilhos e perfilhamento final estão relacionadas, demonstrando que essas variáveis possuem a mesma expressão no gráfico, ou seja, têm grandes cargas fatoriais positivas no CP1. A variável altura também colabora no processo, pois além de ser relevante para o sistema, está bem próxima da região central do gráfico, contudo, representa um extremo entre variáveis.

A altura de colmos, juntamente com área foliar, massa de colmos, perfilhamento e diâmetro são determinantes para a produtividade da cultura de cana-de-açúcar (SANTANA; OLIVEIRA; MELO, 2010). A aplicação de 5 Mg ha⁻¹ de torta de filtro em Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico, cultivado com a variedade RB92 579 resultou em incrementos na altura de plantas e para perfilhamento, efeito similar a adubação mineral (COSTA et al., 2016). No entanto, o perfilhamento da variedade RB79 579 cultivada Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico, apresentou incremento na aplicação de torta de filtro (GONÇALVES, 2015).

O máximo perfilhamento ocorre até o sexto mês de cultivo, após este período, há uma redução, devido, a competição dos perfilhos, por água, nutrientes e radiação solar (OLIVEIRA et al., 2010). A aplicação da irrigação de salvamento, com lâminas de 60 a 80 mm de água, reverte em incrementos médios de 12 a 15 Mg ha⁻¹ nos cultivos de cana-de-açúcar (PEREIRA et al., 2015), portanto, tem efeito positivo nas variáveis relacionadas a produtividade da cultura. A altura de plantas de cana-de-açúcar, sob irrigação de salvamento, de lâmina de 60 mm de água, foi superior, em comparação à altura de plantas, que não foram irrigadas, resultando em elevação da produtividade final da cultura (SILVA, 2015).

CONCLUSÕES

As variáveis altura de plantas e K apresentaram alta correlação negativa, o que pode ter contribuído para uma limitação na produtividade de cana-de-açúcar. As variáveis biométricas perfilhos e perfilhamento final possuem alta correlação positiva, mesmo comportamento dos nutrientes, com destaque para a forte relevância de P, Fe, Mn e B. Pode-se atribuir ao comportamento da variedade e a composição da torta de filtro as respostas obtidas.

REFERÊNCIAS

- ADORNA, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C.; ROSSATO, O. B. Fertilization with filter cake and micronutrients in plant cane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, São Paulo, v. 37, n. 3, p. 649-657, 2013.
- ALCARDE, J. C. **Manual de análise de fertilizantes**. FEALQ, Piracicaba. 2009, 279 p.
- ALMEIDA JÚNIOR, A. B.; NASCIMENTO, C. W. A.; SOBRAL, M. F.; SILVA, F. B. V.; GOMES, W. A. Fertilidade do solo e absorção de nutrientes em cana-de-açúcar fertilizada com torta de filtro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 10, p. 1004-1013, 2011.
- BERGER, K. C.; PRATT, P. F. Advances in secondary and micronutrient fertilization. In: McVICKAR, M. H.; BRIDGER, G. L.; NELSON, L. B. (eds). *Fertilizer Technology and Usage*. Madison, WI: **Soil Science Society of America**, 1963, p. 287–340
- BERNARDO, S; SOARES, A. A; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. p. 361-570.
- BOT, A.; BENITES, J. The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustains food and production. Roma, FAO: **Soils Bulletin** 80, 95 p.
- CAIONE, G.; PRADO, R. M.; CAMPOS, C. N. S.; MODA, L. R.; VASCONCELOS, R. L.; PIZAURO JÚNIOR, J. M. Response of sugarcane in a Red Ultisol to phosphorus rates, phosphorus sources, and filter cake. **Scientific World Journal**, v. 2015, p. 1–10, 2015.
- CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. IAC, Campinas. 2009. 77p.
- CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. **Clima dos municípios paulistas**. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_253.html>. Acesso em: 10 fev. 2017.
- CHA-UM, S.; CHUENCHAROEN, S.; MONGKOLSIRIWATANA, C.; ASHRAF, M.; KIRDMANEE, C. Screening Sugarcane (*Saccharum* sp.) Genotypes for Salt Tolerance Using Multivariate Cluster Analysis. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v. 110, n. 1, p. 23-33, 2012.
- COSTA, N. R.; LIMA, R. A.; SILVA, G. D. S.; MATOSO, A. O.; GARCIA, G. C.; ROMEIRO, E. R.; MARASCA, I.; SOUZA, D. M.; LIMA, C. G. R. Aplicação de torta de filtro no sulco de plantio sobre o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, João Pessoa. v. 10, n. 6, p. 1 - 7, 2016.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**, vol. 1. Viçosa: Editora UFV, 2004. p. 171- 201.

DIACONO, M.; A. CASTRIGNANO, A.; TROCCOLI, A.; BENEDETTO, D.; BASSO, B.; RUBINO, P. Spatial and temporal variability of wheat grain yield and quality in a Mediterranean environment: A multivariate geostatistical approach. **Field Crops Research**, v. 131, n. 49-62, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353 p.

GONÇALVES, C. A. **Biossólido e torta de filtro na composição de fertilizantes organominerais para a cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum sp*)**. 2018. 116 f. Tese (Doutorado em Biocombustíveis) - Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018.

GUPTA, N.; TRIPATHI, S.; BALOMAJUMDER, C. Characterization of pressmud: A sugar industry waste. **Fuel**, v. 90, n. 1, p. 389–394, 2011.

HAIR JUNIOR., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre, Bookman, 2009. 688 p.

INUI-KISHI, R. N.; KISHI, L. T.; PICCHI, S. C.; BARBOSA, J. C.; LEMOS, M. T. O.; MARCONDES, J.; LEMOS, E. G. M. Phosphorus solubilizing and IAA production activities in plant growth promoting rhizobacteria from brazilian soils under sugarcane cultivation. **Journal Engineering Applied Sciences**, v. 7, n. 11, p. 1446-1454, 2012.

KHODARAHMPOUR, Z. Morphological classification of maize (*Zea mays* L.) genotypes in heat stress condition. **Journal of Agricultural Science**, v. 4, n. 5, p. 1-14, 2012.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MURAOKA, T.; CARMO, C. A. F. S.; MELO, W. J. Análise química de tecido vegetal. In: SILVA, F. C. DA (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2009. p. 191–233.

MUSTAFA, H. S. B.; ASLAM, M.; HASSAN, E. U.; FAROOQ, J. Genetic variability and path coefficient in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Agricultural Sciences**, v. 9, n. 1, 37-43, 2014.

NUNES JÚNIOR, D. Torta de filtro: de resíduo a produto nobre. **IDEA News**, Ribeirão Preto, v. 8, n. 92, p. 22-30, 2008.

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

PAVINATO, P. S., ROSOLEM, C. A., 2008. Effects of organic compounds produced by plants on soil nutrient availability. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 911 - 920, 2008.

PEREIRA, A R; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Meteorologia agrícola**. Apostila de curso. ESALQ, 2007. 192p.

PEREIRA, R. M.; JUNIOR, J. A.; CASAROLI, D.; SALES, D. L.; RODRIGUEZ, W. D. M.; SOUZA, J. M. F. Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no cerrado brasileiro. **Revista Irriga & Inovagri**, Botucatu, v. 1, n. 2, p. 149-157, 2015

PINHO, R. E. C. **Aplicação de vinhaça em cana-de-açúcar por gotejamento subsuperficial**: dinâmica de íons e balanço de água. 2013. 97 f. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

PMGCA. Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. Centro de Ciências Agrárias/UFSCAR, 2008.

RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. IAC, Campinas. 2001. 285 p.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 233-243. (Boletim, 100).

SANTANA, M. S.; OLIVEIRA, F. J.; MELO, L. J. O T. Correlações genéticas em alguns clones RB e em variedades de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p. 460-467, 2010.

SANTOS, O. S. **Adsorção de micronutrientes e metais potencialmente tóxicos por torta de filtro da cana-de-açúcar: influência da matéria orgânica na interação desses elementos no ambiente**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado em Química e Biotecnologia) - Instituto de Química e Biotecnologia, Programa de Pós-Graduação em Química e Biotecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B. 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.

SILVA, D. N. **Comportamento de genótipos de cana-de-açúcar com irrigação de salvamento em Goianésia-GO**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Genética e Melhoramento). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2015.

SOUZA, A. M.; VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria: Departamento de Estatística UFSM. 2005. 215 p.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B.; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. IAC, Campinas. 1997. p. 233-243.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton: Laboratory of Climatology. 1955. 104 p. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1.).

TIECHER, T.; SANTOS, D. R, RASCHE, J. W. A.; BRUNETTO, G.; MALLMANN, F. J. K.; PICCIN, R. Resposta de culturas e disponibilidade de enxofre em solos com diferentes teores de argila e matéria orgânica submetidos à adubação sulfatada. **Bragantia**, v. 71, n. 4, p. 518-527, 2012.

VASCONCELOS, R. L. **Fontes de fósforo e torta de filtro sobre o estado nutricional e produtividade da cana-planta**. 2013. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2013.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-37, 1934.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas aplicadas nos capítulos possibilitaram analisar informações que contribuíram para uma maior compreensão, de aspectos relacionados aos efeitos de doses de P (fontes de P na presença e ausência de torta de filtro) na cana-de-açúcar sob irrigação de salvamento.

Os modelos *fuzzy* apresentados demonstraram que a variável de entrada doses de P tem efeito positivo nas fontes de P em todas as variáveis de saída seja na presença e ausência de torta de filtro, em particular no superfosfato triplo e na produção de colmos.

A análise de componentes principais foi eficiente em indicar a relevância das variáveis: produção de colmos, sacarose, TPH e ATR na cultura de cana-de-açúcar nas condições experimentais. Sendo para TPH e ATR verificado comportamento inverso, podendo-se atribuir a condição climática do local, com efeito na fase de maturação da cultura.

A produtividade da água para produção de colmos e açúcar apresentaram maiores valores, quando na presença da torta de filtro e doses de P. A torta de filtro, por possuir grande capacidade higroscópica contribuiu com a manutenção da umidade do solo, e, por conseguinte, com melhores resultados para todas as variáveis.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, R. P.; QUEIROZ, T. R. Caracterização dos aspectos e impactos econômicos, sociais e ambientais do setor sucroalcooleiro Paulista. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46., 2008, Rio Branco. **Anais...** Rio Branco: SOBER, 2008. p. 21.
- AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS- ANA. **Atlas da Irrigação – Uso da água na agricultura irrigada**, 2017. Disponível em: <http://atlasirrigacao.ana.gov.br/>. Acesso em: 10 nov 2018.
- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolo e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1003-1011, 2003.
- ANDRADE NETO, ROMEU C.; MIRANDA, NEYTON O.; DUDA, GUSTAVO P.; GÓES, GLÊIDSON B.; LIMA, ANDRÉ S. Crescimento e produtividade do sorgo forrageiro BR 601 sob adubação verde. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 14, n. 2, 124-130, 2010.
- ARALDI, R.; SILVA, F. M. L.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência. Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, 2010.
- ARGENTON, P. E. **Influências das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região de Piracicaba, São Paulo**. 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- ASPELMEIER, S.; LEUSCHNER, C. Genotypic variation in drought response of silver birch (*Betula pendula*): leaf water status and carbon gain. **Tree Physiology**, Oxford, v. 24, n. 5, p. 517-528, 2004.
- AVALHÃES, C. C.; PRADO, R. M. Compostagem de resíduos da indústria sucroalcooleira enriquecidos com fontes alternativas de P. **Nucleus**, Ituverava, v. 6, n. 1, p. 271-283, 2009.
- BATISTA, E. L. S.; ZOLNIER, S. R. A.; LYRA, G. B.; SILVA, T. G. F.; BOEHRINGER, D. Modelagem do crescimento de cultivares de cana-de-açúcar no período de formação da cultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 17, n. 10, p. 1080-1087, 2013.
- BARBIERI, V.; VILLA NOVA, N. A. **Climatologia e a cana-de-açúcar**. In: PLANALSUCAR, COORDENADORIA REGIONAL SUL. COSUL. Araras. 1977. p. 1-22.
- BESFORD, R. T. Nutrients imbalances in tomato plants and acid phosphatase activity in the leaves. **Journal of the Science Food Agriculture**, Londres, v. 30, n. 3, p. 275-280, 1979.

BORGHETTI, J. R.; SILVA, W. L. C.; NOCKO, H. R.; LOYOLA, L. N.; CHIANCA, G. K. **Agricultura irrigada sustentável no Brasil: identificação de áreas prioritárias.** Agência Nacional de Águas - ANA, Brasília, 2017, 243 p.

BOVI, M. L. A.; BASSO, L. C.; TUCCI, M. L. S. Avaliação da atividade "in vivo" da fosfatase ácida e do crescimento de progênies de pupunheira cultivadas em duas doses de nitrogênio e P. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 427-434, 1998.

BREZOLIN, A. P. **Modelagem matemática para otimização e previsibilidade de produtividade do trigo pelas formas de fornecimento do nitrogênio.** 2015, 149 f. (Dissertação em Modelagem Matemática), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Unijuí.

BURR, G. O.; HARTT, C. E.; BRODIE, H. W.; TANIMOTO, T.; KORTSCHAK, H. P.; TAKAHASHI, D.; ASHTON, F. M.; COLEMAN, R. E. The sugarcane plant. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 8, p. 275-308, 1957.

CAIONE, G.; FERNANDES, F. M.; LANGE, A. Efeito residual de fontes de P nos atributos químicos do solo, nutrição e produtividade de biomassa da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 8, n. 2, p. 189-196, 2013.

CAIONE, G.; LANGE, A.; BENETT, C. G. S.; FERNANDES, F. M. Fontes de P para adubação de cana-de-açúcar forrageira no cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 66-73, 2011.

CALHEIROS, A. S.; OLIVEIRA, M. W.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. B.; SANTIAGO, A. D.; ARISTIDES, E. V. S. Production of biomass, from sugar and protein in function of sugarcane varieties and phosphorous fertilization. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 2, p. 809-818, 2012.

CARDOZO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Climatic effects on sugarcane ripening under the influence of cultivars and crop age. **Scientia Agricola**, v. 70, n.6, p. 449-456, 2013.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento.** Acompanhamento da Safra Brasileira, v. 4 - Safra 2014 - 2015, Quarto Levantamento. Disponível em: https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/1199_6d17e4217b4a7eb35f603_c18b0b3e06. Acesso em: 10 fev. 2018.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento.** Acompanhamento da Safra Brasileira, v. 4 - Safra 2017 - 2018, Quarto Levantamento. Disponível em: https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/17026_e0504d08aca77ee13e86c2e7e7f43424. Acesso em: 19 fev. 2018.

COSTA, V. M. **Irrigação em cana-de-açúcar: uma realidade ainda oculta no Brasil.** CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, 2011, v. 30, n. 2.

COSTA, B. S. J.; BEZERRA, C.; GUEDES, L. A. Desenvolvimento de um software para automação de processos utilizando lógica *fuzzy*., CBA (2012). **XIX Congresso Brasileiro de Automática**.

COX, E. **The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems**. A. P Professional. 1994.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2.ed. rev. Viçosa: UFV. 2001. 390 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético, vol. 1**. Viçosa: Editora UFV, 2004. p. 171- 201.

DONZELLI, J. L.; COSTA, V. M. Workshop - **Impacto da produção de etanol no balanço hídrico nas regiões de expansão**. CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, p.1-2, 2010.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yields response to water**. Rome: FAO, 1979. 306p. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 33).

EVERITT, B. S.; LANDAU, S.; LEESE, M.; STAHL, D. **Cluster analysis**. London, 2011. 346p.

FADEL, M.; ABDEL-NASER, A. Z.; MAKAWY, M.; HSONA, M. S.; ABDEL-AZIZ, A. M. Recycling of vinasse in ethanol fermentation and application in Egyptian distillery factories. **African Journal of Biotechnology**. Nairobi. v. 13, n. 47, p. 4390 – 4398, 2014.

FERRAUDO, A. S. **Técnicas de análise multivariada**. 1ª edição. São Caetano do Sul, StatSoft -South America, 2005.

FRAVET, P. R. F.; SOARES, R. A. B.; LANA, R. M. Q.; LANA, A. M. Q.; KORNDÖRFER, G. H. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 618-624, 2010.

FRIZZONE, J. A. **Otimização em Irrigação com Déficit**. In: PAZ, V. P. S.; OLIVEIRA, A. S.; PEREIRA, F. A.; GHEYI, H. R. Manejo e Sustentabilidade da Irrigação em Regiões Áridas e Semi-Áridas. Cruz das Almas: UFRB, 2014. p. 274 – 307.

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

GOUDRIAAN, J.; MONTEITH, J. L. A mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. **Annals of Botany**, Oxford. v. 66, p. 695-701, 1990.

GOUVÊA, J. R. F. **Mudanças Climáticas e a expectativa de seus impactos da cultura de cana-de-açúcar na região Piracicaba- SP**. 2008. 99 f. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

HAAG, H. P.; DECHEN, A. R.; CARMELO, Q. A. C. Nutrição mineral da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. **Cana-de-açúcar, cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. cap. 1, p. 88-159.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (ed). **P na Agricultura Brasileira**. POTAFOS, Piracicaba. 2004. p. 665-682.

HOUSSAIN, A. A.; ABO GHALIA, H. H.; ABDALLAH, S. A. Rock phosphate solubilization by Aspergilli species grown on olive-cake waste and its application in plant growth improvement. **Egyptian Journal of Biology**, Cairo, v. 3, n.1, p. 89-96, 2001.

KEATING, B. A.; VERBURG, K.; HUTH, N. I.; ROBERTSON, M. J. Nitrogen management in intensive agriculture: sugar cane in Australia. In: KEATING, B. A.; WILSON, J. R. (Ed.). **Intensive sugar cane production: meeting the challenges beyond 2000**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 221-242.

KEFLENS, P. C. O. **O Biplot na análise fatorial multifatorial**. 2009. 103 f. Dissertação (Mestre em Ciências – Estatística e Experimentação Agronômica) – Escola Superior "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2009.

KNOX, J.W.; RODRÍGUEZ DÍAZ, J.A.; NIXON, D.J.; MKHWANAZI, M. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. **Agricultural Systems**, v.103, p.63-72, 2010.

KROPFF, M. J.; MUCHOW, R. C.; RABBINGE, R.; AGGARWAL, P. K. Limits to intensive agricultural systems and opportunities for sustainable agricultural development. In: KEATING, B. A.; WILSON, J. R. (Ed.). **Intensive sugarcane production: meeting the challenges beyond 2000**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 17-35.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005.

JACOB, J.; LAWLOR, D. W. Stomatal and mesophyll limitations of photosynthesis in phosphate deficient sunflower, maize and wheat plants. **Journal Experimental Botany**, Exeter, v. 42, n. 241, p. 1003-1011, 1991.

KORNDÖRFER, G. H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004. p. 290-306.

KORNDÖRFER, G. H. Importância da adubação na qualidade da cana-de-açúcar. In: SÁ, M. E.; BUZETTI, S. (Ed.). **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 1994, cap. 7. p. 133-142.

KORNDÖRFER, G. H. Resposta da cultura da cana-de-açúcar à adubação fosfatada. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 102, p. 7, 2003.

KUWAHARA, F. A.; SOUZA, G. M. P como possível mitigador dos efeitos da deficiência hídrica sobre o crescimento e as trocas gasosas de *Brachiaria brizantha* cv. MG-5 Vitória. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 261-267. 2009.

LYRA, G. B.; ZOLNIER, S.; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; SEDIYAMA, M. A. N. Modelos de crescimento para alface (*Lactuca sativa* L.) cultivada em sistema hidropônico sob condições de casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, p. 69-77, 2003.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 638 p.

MAMDANI, E. **Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems**. *Fuzzy, Sets and Systems*, v. 26, p. 1182–1191, 1977.

MARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULIO JÚNIOR, J. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J. E. B. A. (Org.). **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET, 2009. p. 111-130.

MASCHIO, R. **Produtividade da água em biomassa e energia para 24 variedades de cana-de-açúcar**. 2011. 87f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

MATIAS, G. C. S. **Eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados em solos com diferentes capacidades de adsorção de P e teores de matéria orgânica**. 2010. 175f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MOORE, P. H.; BOTHA, F. C.; FURBANK, R. T.; GROF, C. P. L. Potential for overcoming physio-biochemical limits of sucrose accumulation. In: KEATING, B. A.; WILSON, J. R. (Ed.). **Intensive sugarcane production: meeting the challenges beyond 2000**. Wallingford: CAB International, 1997. p. 141–155.

NARDIN, R. R. **Torta-de-filtro aplicada em Argissolo e seus efeitos agronômicos em duas variedades de cana-de-açúcar colhidas em duas épocas**. 2007. 57f. Dissertação de mestrado (Mestrado em Agricultura tropical e subtropical) – Curso de pós-graduação em agricultura tropical e subtropical, Instituto Agronômico, Campinas, 2007.

NICKELL, L. G. Sugarcane. In: ALVIN, P. KOZLOWSKI, T. (Ed.). **Ecophysiology of tropical crops**. New York: Academic Press, 1977. p. 89-110.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399 p.

NUNES JÚNIOR, D. Torta de filtro: de resíduo a produto nobre. **IDEA News**, Ribeirão Preto, v. 8, n. 92, p. 22-30, 2008.

O'LEARY, G.J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. **Field Crops Research**, v. 68, p. 97-111, 2000.

PEACOCK, S. D.; STARZAK, M. Modelling of climbing film evaporators. **Proceedings of South African Sugarcane Technology Association**, Bangkok, v. 70, p. 213–220, 1996.

PEDRYCZ, W. An identification algorithm in *fuzzy* relational systems. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 13, p. 153–167, 1984.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 233-243. (Boletim, 100).

RAMOS, R. C.; NACHILUK, K. Geração de Bioenergia de Biomassa da Cana-de-açúcar nas Usinas Signatárias ao Protocolo Agroambiental Paulista, Safra 2015/2016. **Análises e Indicadores do Agronegócio**., São Paulo, v. 12, n. 4, abr. 2017. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/out/LerTexto.php?codTexto=14278>. Acesso em: mai. 2018.

REICH, P. B.; OLEKSYN, J.; WRIGHT, I. J. Leaf phosphorus influences the photosynthesis-nitrogen relation: a cross-biome analysis of 314 species. **Oecologia**, Heidelberg, v. 160, n. 2, p. 207-212, 2009.

REIS, N. P. Perspectivas para o P. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO SETOR DE FERTILIZANTES, 2., 2002, São Paulo. **Palestra...** São Paulo: ANDA, 2002. 364 p.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C.; PRADO JÚNIOR, J. P. Q. Fósforo. In: DINARDO-MIRANDA, L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A (Ed). **Cana-de-açúcar**. IAC, Campinas. 2010, p. 272.

REZENDE, R. S. ANDRADE JUNIOR, A. S. **Cana-de-açúcar: irrigação**. 2019. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/canadeaucar/arvore/CONTAG01_56_711200516718.html. Acesso em: 17 fev 2019.

SALGADO, S. A. B. **Avaliação da probabilidade de ocorrência de queda de estruturas metálicas de linhas de transmissão usando regressão logística e redes neurais artificiais combinadas com doe**. 2015. 127 f. (Tese em Engenharia Elétrica – Ciências de Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

SANTOS, L. C. **Produção de biomassa e eficiência no uso da água para oito variedades de cana-de-açúcar irrigadas or gotejamento em dois ciclos de cultivo**. 2016. 196f. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

SANTOS, V. R.; MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W.; COSTA, J. P. V.; SANTOS, C. G.; SANTOS, A. C. I. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de P. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 389-396, 2009.

SANTOS, D. L.; SENTELHAS, P. C. Climate change scenarios and their impact on the water balance of sugarcane production areas in the State of São Paulo, Brazil. **Ambiente e Água**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 7-17, 2012.

SANTOS, D. H.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; FABRIS, L. B. 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.

SILVA, F. C.; BASSO, L. C. Avaliação da atividade in vivo da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, n. 3, p. 371-375, 1993.

SILVA, F. C.; BERGAMASCO, A. F. Levantamento de modelos matemáticos descritos para a cultura da cana-de-açúcar. **Revista Biociências**, v. 7, n. p. 7-14, 2001.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; CARMO, J. F. A.; SOUZA, L. S. B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no submédio do vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 500-509, 2012.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C. D.; ROCHA, A. T. D.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. D. S.; NASCIMENTO, C. W. D. Industrial characteristics of sugar cane under phosphate fertilization in soils of Pernambuco Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 347-354, 2012.

SOUSA JUNIOR, P. R. **Modos de aplicação e doses de fósforo na cana-de-açúcar em distintos manejos de solo**. 2016. 52f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2016.

SOUZA, R. F.; FAQUIN, V.; TORRES, P. R. F.; BALIZA, D. P. Calagem e adubação orgânica: Influência na adsorção de P em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 975-983, 2006.

SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana-de-açúcar: avaliação do Modelo Mosicas**. 2006. 62 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. *Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control*. **IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics**, v. 1, n. 15, p. 116–132, 1985.

TARUMOTO, M. B. **Eficiência de uso de fósforo por dois genótipos de cana-de-açúcar cultivados em solução nutritiva**. 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016

ÚNICA. **União da Indústria de Cana-de-Açúcar**. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br>. Acesso em: 19 fev. 2018.

VASCONCELOS, R. L. **Fontes de fósforo e torta de filtro sobre o estado nutricional e produtividade da cana-planta**. 2013. 61 f. (Dissertação em Agronomia - Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Jaboticabal.

VASCONCELOS, R. L.; ALMEIDA, H. J.; PRADO, R. M.; SANTOS, L. F. J.; PIZAURO JÚNIOR, J. M. Filter cake in industrial quality and in the physiological and acid phosphatase activities in cane-plant. **Industrial Crops and Products**, v. 105, p. 133-141, 2017.

VASSILEV, N.; MEDINA, A.; AZCON, R.; VASSILEVA, M. Microbial solubilization of rock phosphate on media containing agro-industrial wastes and effect of the resulting products on plant growth and P uptake. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 287, n. 1-2, p. 77-84. 2006.

VERMAAS, L. L. G. **Aprendizado supervisionado de sistemas de inferencia fuzzy aplicado em veículos inteligentes**. 2010. 133 f. (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais.

WALDRON, J. C.; GLASZIOU, K. T.; BULL, T. A. The physiology of sugar cane. IX. Factors affecting photosynthesis and sugar storage. **Australian Journal of Biological Sciences**, East Melbourne, v. 20, n. 6, p. 1043-1052, 1967.

WOOD, A. W. Application of crop growth models to sugar milling and raw sugar marketing. In: ROBERTSON, M.J. (Ed.). **Research and modelling approaches to assess sugarcane production opportunities and constraints**. Brisbane: CSIRO, 1995. p. 97-101.

ZHANG, J.; BARBER, A. S. Maize root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. **S. S. S. A. J.**, Madison, 2012, v. 56, n. 3, p. 819-822, 2012.