**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Metodologia para caracterizar a composição e a produção de matéria seca,
e a extração e a correlação entre nutrientes na cultura de milho**

Karla Vilaça Martins

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2015**

Karla Vilaça Martins
Engenheira Agrônoma

**Metodologia para caracterizar a composição e a produção de matéria seca, e a extração
e a correlação entre nutrientes na cultura de milho**

Orientador:
Prof. Dr. **DURVAL DOURADO NETO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Martins, Karla Vilaça

Metodologia para caracterizar a composição e a produção de matéria seca, e a extração e a correlação entre nutrientes na cultura de milho / Karla Vilaça Martins. - - Piracicaba, 2015.

89 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Adubação 2. Evapotranspiração 3. Produtividade 4. Concentração de nutrientes
I. Título

CDD 633.15
M386m

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

À Kamila Vilaça Martins Faria

Pelos eternos momentos vivenciados ao lado.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, por guiar meus passos e me dar coragem e serenidade para enfrentar os desafios.

Aos meus pais Adenir e Marina e meus irmãos Kamila e Júnior, se cheguei até aqui foi graças ao apoio de vocês.

Ao meu orientador, professor Dr. Durval Dourado Neto, pela orientação, pelos ensinamentos e por todo conhecimento a mim transmitido.

Ao professor Dr. Klaus Reichardt pela acolhida, pela orientação, pela paciência e por ser sempre solícito.

Ao professor Dr. Evandro Binotto Fagan, pela orientação e pela amizade ao longo desses anos.

Ao professor Dr. Takashi Muroaka pela contribuição e considerações sugeridas.

Ao professor Dr. Carlos Tadeu dos Santos Dias pela contribuição na análise estatística dos dados.

Ao professor Dr. José Laercio Favarin pela orientação e disponibilidade em ensinar.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e ao Programa de Pós-graduação em Fitotecnia pela oportunidade de estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

À Forquímica Agrociência, em nome do Sr. José Sartori, pelas análises dos elementos minerais, esse trabalho só foi possível graças à valiosa contribuição da empresa.

À Luciane Aparecida Lopes Toledo pela presteza em atender todas as minhas solicitações e esclarecer todas as minhas dúvidas.

Ao GFASP – Grupo de Fisiologia Aplicada à Sistemas de Produção meu eterno agradecimento e a alegria em fazer parte desse grupo que tanto contribuiu para o meu crescimento profissional.

Ao Thiago que entrou na minha vida e fez dela ainda melhor do que era.

Aos meus amigos do laboratório Multiusuário em Produção Vegetal e do Departamento de Produção Vegetal pelo apoio e pelos momentos compartilhados.

Aos amigos do Núcleo de Pesquisa em Fisiologia e Estresse de Plantas (NUFEP) de Patos de Minas e ao prof. Luís Henrique Soares meus sinceros agradecimentos.

Aos amigos que fiz nestes anos, foram seis anos, seis anos de muitas amizades, fazendo parte de muitas vidas e deixando que outras vidas fizessem parte da minha, pessoas que Deus colocou no meu caminho, a todos vocês meu muito obrigado.

Às virgínetes e as minhas queridas irmãs do Cenáculo, minha família em Piracicaba, que foram muito importantes durante todo o período de doutorado.

Enfim, aqueles de que de algum modo se fizeram presentes nessa caminha, muito obrigada!

“Eu gostaria de desafiá-lo a utilizar seus anos na Universidade para ampliar o desenvolvimento de todo o talento inerente ao potencial genético de seus pais, avós, bisavós, etc. Não desperdice esses anos, não se satisfça com a mediocridade, busque alcançar uma estrela. Embora você nunca alcance, se você se esforçar suficientemente vai conseguir alguma ‘poeira de estrela’ em suas mãos. Com isso, como catalisador você se surpreendera com o sucesso que será capaz de obter para si mesmo, para seus familiares, para seu Estado, para seu País e, para o bem estar da humanidade em um contexto global. Além disso, lembre-se que a educação deve ser um processo continuo ao longo de sua vida”.

Norman Borlaug

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1 Características da produção de milho.....	25
2.2 Fenologia da cultura de milho	25
2.3 Aspectos da nutrição mineral da cultura de milho	26
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
3.1 Local do experimento.....	29
3.2 Caracterização do experimento	29
3.3 Disposição do experimento e tratamentos.....	30
3.4 Avaliações	33
3.4.1 Fenologia.....	33
3.4.2 Elementos do clima	33
3.4.3 Balanço hídrico	33
3.4.4 Massa de matéria seca.....	33
3.4.5 Área foliar	34
3.4.6 Análise dos macronutrientes e micronutrientes	34
3.4.7 Produtividade e componentes de produção.....	34
3.4.8 Massa de 1000 grãos	34
3.5 Modelagem dos dados.....	34
3.6 Análise estatística.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Precipitação e temperatura	39
4.2 Fenologia.....	41
4.3 Massa de matéria seca	42
4.3.1 Massa de matéria seca da planta de milho	42
4.3.2 Massa de matéria seca total da cultura de milho.....	45
4.4 Taxa de crescimento da cultura de milho.....	47
4.5 Teores de macro e micronutrientes nos órgãos da planta de milho.....	48

4.6 Correlação entre macronutrientes e micronutrientes	55
4.7 Interação entre os nutrientes	59
4.8 Teor total e absorção dos elementos minerais	61
4.8.1 Nitrogênio	61
4.8.2 Fósforo.....	63
4.8.3 Potássio	64
4.8.4 Cálcio.....	65
4.8.5 Magnésio.....	66
4.8.6 Enxofre	67
4.8.7 Boro	69
4.8.8 Cobre.....	70
4.8.9 Ferro.....	71
4.8.10 Manganês	72
4.8.11 Zinco.....	73
5 CONCLUSÕES	81
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS.....	85

RESUMO

Metodologia para caracterizar a composição e a produção de matéria seca, e a extração e a correlação entre nutrientes na cultura de milho

O aprimoramento das práticas agronômicas e a utilização de alta tecnologia nas lavouras contribuiu para os aumentos significativos na produtividade das culturas e, pode ter alterado a dinâmica de absorção e partição dos nutrientes pelas plantas. As recomendações oficiais de adubação para a cultura de milho no Brasil estão baseadas no teor crítico do nutriente no solo e são provenientes de literaturas mais antigas. Por serem dinâmicos, os fatores que interagem em um sistema de produção agrícola podem ser melhor estudados através de modelos matemáticos. A técnica de modelagem em agricultura pode expandir a compreensão das interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera. Sendo assim, o objetivo deste estudo é propor um modelo para o cálculo de recomendação de adubação da cultura de milho, a partir da modelagem da marcha de absorção de nutrientes, da evapotranspiração potencial da cultura e, da partição dos nutrientes nas plantas, levando em consideração a taxa de absorção de cada nutriente para cada genótipo em um determinado sistema de produção. O modelo proposto considera que a recomendação de adubação deve ser realizada com base na variação temporal da taxa de absorção de nutrientes, a qual define melhor a demanda da cultura, em comparação com o teor crítico dos nutrientes no solo. Para a validação do modelo, sugere-se um ensaio de campo comparando as metodologias.

Palavras-chave: Adubação; Evapotranspiração; Produtividade; Concentração de nutrientes

ABSTRACT

A methodology to characterize the composition and the production of dry matter, and the extraction and correlation between nutrients for the maize crop

The improvement of agronomic practices and the use of high technology in field crops contributed for their significant increases in productivity, and could also have altered the dynamics of nutrient uptake and partition by the plant. Official recommendations for fertilizer applications to the maize crop in Brazil are based on the critical soil nutrient content and are relatively outdated. Since the factors that interact in an agricultural production system are dynamic, mathematical modeling turns out to be an appropriate tool for these studies. Agricultural modeling can expand our knowledge about the interactions prevailing in the soil-plant-atmosphere system. In this way, the objective of this study is to propose a model for fertilizer recommendation of the maize crop, based on modelling nutrient uptake, potential evapotranspiration of the crop, and the partition of nutrients in the plant, taking into account the nutrient uptake rate of each genotype in a given production system. The proposed model considers that the fertilizer recommendation should be made based on the temporal variation of the uptake rate, which should better define crop needs in relation to the classic recommendation based on the critical soil nutrient content. To validate the model an experiment is suggested to compare methodologies.

Keywords: Evapotranspiration; Fertilization; Productivity; Nutrient concentration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área experimental do Departamento de Produção Vegetal da Esalq/Usp	32
Figura 2 – Divisão da área experimental em parcelas	32
Figura 3 – Modelo para o cálculo da curva de crescimento (A), curva do teor de nutrientes da planta (B) e curva da marcha de absorção de macronutriente e micronutriente (C) ...	36
Figura 4 – Modelo para o cálculo da curva da taxa de crescimento (A) e curva da taxa de absorção de nutriente (B).....	37
Figura 5 – Modelo para o cálculo da taxa de oferta do nutriente pelo solo (λ_s corresponde à taxa máxima de absorção do nutriente do solo) (A) e do teor crítico de macronutrientes (B) e micronutrientes (C) no solo.	37
Figura 6 – Precipitação (mm) e temperatura (°C) registradas na cidade de Piracicaba, São Paulo entre os meses de março e agosto de 2013	40
Figura 7 – Capacidade de água disponível no solo (CAD, mm); Armazenamento de água no solo (Arm, mm) e Evapotranspiração real (ET _r , mm) entre os meses de março e agosto de 2013	41
Figura 8 – Massa de matéria seca total ($y = Y$) por hectare da cultura de milho (kg ha^{-1}) em relação ao tempo ($x = t =$ dias após a semeadura - DAS).....	46
Figura 9 – Massa de matéria seca nos diferentes órgãos da planta de milho (g planta^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	47
Figura 10 – Taxa de crescimento de plantas de milho ($\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	48
Figura 11 – Teor de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) em folhas (●) e em colmos (▲) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	49
Figura 12 – Teor de B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) em folhas (●) e em colmos (▲) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	50
Figura 13 – Teor de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) no pendão (●), no estilo-estigma (▲) e na palha (■) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS).....	51
Figura 14 – Teor de B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) no pendão (●), no estilo-estigma (▲) e na palha (■) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	52

Figura 15 – Teor de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) na espiga (●), no sabugo (▲) e no grão (■) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	53
Figura 16 – Teor de B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) na espiga (●), no sabugo (▲) e no grão (■) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	54
Figura 17 – Correlação entre os elementos minerais nas folhas de plantas de milho	56
Figura 18 – Correlação entre os elementos minerais em plantas de milho	58
Figura 19 – Interação entre os elementos minerais em de plantas de milho em função dos dias após a semeadura	61
Figura 20 – Teor ($T, \text{kg kg}^{-1}$), absorção ($A, \text{kg ha}^{-1}$) e taxa de absorção ($\lambda, \text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de N (Nitrogênio) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	63
Figura 21 – Teor ($T, \text{kg kg}^{-1}$), absorção ($A, \text{kg ha}^{-1}$) e taxa de absorção ($\lambda, \text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de P (Fósforo) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	64
Figura 22 – Teor ($T, \text{kg kg}^{-1}$), absorção ($A, \text{kg ha}^{-1}$) e taxa de absorção ($\lambda, \text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de K (Potássio) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	65
Figura 23 – Teor ($T, \text{kg kg}^{-1}$), absorção ($A, \text{kg ha}^{-1}$) e taxa de absorção ($\lambda, \text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de Ca (Cálcio) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	66
Figura 24 – Teor ($T, \text{kg kg}^{-1}$), absorção ($A, \text{kg ha}^{-1}$) e taxa de absorção ($\lambda, \text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de Mg (Magnésio) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	67
Figura 25 – Teor ($T, \text{kg kg}^{-1}$), absorção ($A, \text{kg ha}^{-1}$) e taxa de absorção ($\lambda, \text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de S (Enxofre) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	68
Figura 26 – Teor ($T, \text{kg kg}^{-1}$), absorção ($A, \text{kg ha}^{-1}$) e taxa de absorção ($\lambda, \text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de B (Boro) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	70
Figura 27 – Teor ($T, \text{kg kg}^{-1}$), absorção ($A, \text{kg ha}^{-1}$) e taxa de absorção ($\lambda, \text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de Cu (Cobre) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)	71

Figura 28 – Teor (T, kg kg ⁻¹), absorção (A, kg ha ⁻¹) e taxa de absorção (λ , kg ha ⁻¹ dia ⁻¹) de Fe (Ferro) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS).....	72
Figura 29 – Teor (T, kg kg ⁻¹), absorção (A, kg ha ⁻¹) e taxa de absorção (λ , kg ha ⁻¹ dia ⁻¹) de Mn (Manganês) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS).....	73
Figura 30 – Teor (T, kg kg ⁻¹), absorção (A, kg ha ⁻¹) e taxa de absorção (λ , kg ha ⁻¹ dia ⁻¹) de Zn (Zinco) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS).....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Descrição resumida dos estádios fenológicos da cultura de milho	26
Tabela 2 - Análise de solo (0-20 cm) da área de condução dos experimentos.....	30
Tabela 3 - Descrição da data de ocorrência (D) dos estádios fenológicos da cultura de milho (DKB 390 VT PRO ²), e do correspondente número de dias após a semeadura (DAS, d), número de graus-dia (GD, °C.d) (temperatura basal inferior: 10°C) e desenvolvimento relativo (Dr). Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo	42
Tabela 4 - Área foliar (cm ² planta ⁻¹) e massa de matéria seca de folha, colmo, pendão, espiga, estilo-estigma, palha e total (g planta ⁻¹) em relação aos dias após a semeadura (DAS) de plantas de milho, híbrido DKB 390 VT PRO ²	45
Tabela 5 - Correlação entre os elementos minerais na folha de plantas de milho, híbrido DKB 390 VT PRO ²	57
Tabela 6 - Correlação entre os elementos minerais em de plantas de milho, híbrido DKB 390 VT PRO ²	59
Tabela 7 – Valores médios ponderados pela massa de matéria seca dos órgãos, referentes ao teor total de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg), Enxofre (S), B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) em plantas de milho em relação aos dias após a semeadura (DAS).....	75
Tabela 8 – Valores médios ponderados pela massa de matéria seca dos órgãos, referentes a absorção total de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg), Enxofre (S), B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) em plantas de milho em relação aos dias após a semeadura (DAS).....	76
Tabela 9 – Valores médios ponderados pela massa de matéria seca dos órgãos, referentes a taxa de absorção de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg), Enxofre (S), B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) em plantas de milho em relação aos dias após a semeadura (DAS)	77
Tabela 10 – Cálculo (Equação 6) da concentração crítica (Cc) de cada nutriente na seiva bruta da planta no dia da máxima absorção ($\lambda_{\max}$).....	78

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal mais cultivado no mundo. Sua importância econômica é caracterizada pelas diversas formas de sua utilização que vão desde a alimentação humana e animal, até a indústria de alta tecnologia. É alimento básico para a população em muitos países, utilizado na ração de animais devido ao elevado valor nutricional e energético, cada vez mais importante em muitos países para aplicações industriais e farmacêuticas, podendo ainda ser empregado na produção de amido, etanol, plástico e como base para a produção de antibióticos (EDWARDS, 2009).

A agricultura evoluiu muito nos últimos anos, alcançando aumentos significativos na produtividade das culturas (LOPES; GUILHERME, 2007). A produtividade média brasileira de milho na safra de 1976/77 era de 1632 kg ha⁻¹ (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015a). Na safra de 2014/15 a média de produtividade do Brasil foi de 5382 kg ha⁻¹ (CONAB, 2015b) e a projeção do agronegócio brasileiro indica que na safra de 2023/2024 a produção de milho deverá estar na faixa de 104 milhões de toneladas (BRASIL, 2014).

Os aumentos de produtividade da cultura de milho se devem ao desenvolvimento da agricultura com relação ao melhoramento genético das plantas e as práticas de manejo, entre elas, a correção e fertilização dos solos (CIAMPITTI et al., 2013; BENDER et al., 2013). Stewart et al. (2005) relataram que 57% do aumento de produtividade da cultura de milho pode ser atribuída às aplicações de corretivos e fertilizantes.

No entanto, as informações sobre absorção e partição dos nutrientes na cultura de milho são provenientes de literaturas mais antigas (CIAMPITTI et al., 2013). Os trabalhos mais recentes sobre a absorção e partição dos nutrientes na cultura de milho têm sido realizados principalmente nos Estados Unidos (CIAMPITTI; VYN, 2011; CIAMPITTI et al., 2013).

São poucos os estudos de absorção e partição de nutrientes para os modernos híbridos de milho utilizados no Brasil (VON PINHO et al., 2009). As recomendações de calagem e adubação estão baseadas em estudos realizados há muitos anos e estão organizadas em manuais e tabelas, como por exemplo: Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo – Boletim Técnico 100 (RAIJ et al., 1996), Recomendações para o uso de Corretivos e Fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação (RIBEIRO et al., 1999), Manual de Adubação e Calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (SBCS, 2004) e Sugestão de Adubação e Calagem para Culturas de Interesse Econômico no Estado do Paraná – Circular Técnica 128 (OLIVEIRA, 2003).

Além disso, o sistema de produção também se modificou, atualmente se observa lavouras com maior densidade de plantas, semeadura em espaçamento reduzido, utilização de agroquímicos para a proteção das culturas e utilização dos híbridos transgênicos (BENDER et al., 2013).

O aprimoramento das práticas agronômicas e a utilização cada vez mais crescente de alta tecnologia nas lavouras pode ter alterado a dinâmica de absorção e partição dos nutrientes pela cultura de milho. Portanto, há uma necessidade de estudar os atuais padrões de absorção e partição dos nutrientes (BENDER et al., 2013).

Também chama a atenção o fato de que na literatura atual disponível não existem trabalhos que levem em consideração a absorção de todos os macronutrientes e micronutrientes e, a redistribuição destes elementos minerais em todos os órgãos da planta de milho.

É importante ressaltar que mesmo com o crescente desenvolvimento da agricultura, as recomendações oficiais de adubação para a cultura de milho no Brasil ainda estão baseadas no teor crítico do nutriente no solo, o qual apresenta um enfoque estático e não é específico do sistema de cultivo.

O teor crítico ou nível crítico pode ser definido como o teor do nutriente no solo que corresponde à disponibilidade para se obter a produção de máxima eficiência econômica, que normalmente está entre 80 a 90% da produção máxima (CANTARUTTI et al., 2007).

A determinação do teor crítico deriva-se de modelos empíricos, que relacionam o teor do nutriente extraído pela análise química do solo, com o conteúdo do nutriente na planta ou com a produção (BRAY, 1948; CATE; NELSON, 1965; COREY, 1987; ALVAREZ, 1996; CANTARUTTI et al., 2007).

Essa metodologia tem sua importância e é relativamente simples, porém não considera que o teor crítico pode variar de acordo com a espécie, com estágio fenológico da cultura, com a produtividade esperada e com as interações edafoclimáticas (SANTOS et al., 2008).

Por serem dinâmicos, os fatores que interagem em um sistema de produção agrícola podem ser melhor estudados através de modelos matemáticos. A técnica de modelagem em agricultura pode ampliar a compreensão das interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera (DOURADO NETO et al., 1998).

Os modelos matemáticos são desenvolvidos com base no conhecimento científico, denominados de modelos mecanísticos e, com base em observações, chamados de modelos empíricos (DOURADO NETO et al., 1998). Esses modelos buscam representar os processos

naturais que determinam a disponibilidade e a absorção de nutrientes e assim, aumentar a compreensão do sistema, permitindo um ajuste fino nas recomendações de corretivos e fertilizantes (OLIVEIRA et al., 2005; CATARUTTI et al., 2007).

Do exposto, a presente pesquisa tem por objetivo propor metodologia para caracterizar, na cultura de milho: (i) a composição e a produção de matéria seca dos diferentes órgãos e total, (ii) a extração e a exportação de nutrientes, e (iii) a interação e a correlação entre macro e micronutrientes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Características da produção de milho

O milho (*Zea mays* L.) se destaca mundialmente por ser usado não só na alimentação humana, como também na alimentação animal. É matéria-prima básica em inúmeros produtos industrializados, atingindo um papel socioeconômico importante na cadeia produtiva (EMBRAPA, 2012).

O Brasil é o 3º maior produtor de milho do mundo, ficando apenas atrás dos Estados Unidos e da China. A produção nacional na safra de 2011/12 foi de 72.979,5 mil toneladas. Estima-se que a safra de 2012/13 alcance um recorde de 77.451,5 mil toneladas, representando uma evolução de 6,1% em relação à obtida no ano passado (CONAB, 2013).

A área cultivada no país na primeira (2014/15) e segunda safra (2015) foi de 15.627,3 mil hectares, com produtividade média de 4,9 t ha⁻¹. Porém, existem produtores com rendimentos superiores a 12 t ha⁻¹, esses valores distintos demonstram a diferença entre os sistemas de produção, com relação ao uso e o potencial de produtividade (EMBRAPA, 2006, 2012).

2.2 Fenologia da cultura de milho

A caracterização dos estádios de desenvolvimento das culturas permite o estabelecimento de estratégias de manejo e de tomadas de decisão, objetivando a obtenção de rendimentos mais satisfatórios e lucrativos (FANCELLI; DOURADO NETO, 2004).

No entanto, para facilitar o estudo e a caracterização dos estádios fenológicos, o ciclo da cultura do milho foi dividido em alguns em estádios diferentes de desenvolvimento (Tabela 1). A metodologia mais utilizada divide o ciclo de crescimento da cultura de milho em dois estádios, o de desenvolvimento vegetativo (representado pela letra V) e o estágio de desenvolvimento reprodutivo (representado pela letra R) (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1996).

O estágio de desenvolvimento vegetativo é caracterizado utilizando o método do colar visível da folha, ou seja, quando as folhas de milho apresentam a aurícula visível, sendo assim determinadas de folhas completamente expandidas. O final do estágio vegetativo é denominado V_T e é caracterizado pela emissão do pendão. Os estádios reprodutivos iniciam em R₁, distintos pela emergência do estilo-estigma fora da palha. As etapas seguintes do desenvolvimento reprodutivo fazem referência ao desenvolvimento dos grãos (EDWARDS, 2009).

Tabela 1 - Descrição resumida dos estádios fenológicos da cultura de milho

Fase	Estádios	Descrição de cada estágio
Vegetativa	V _E	Cultura com 50% das plantas emergidas
	V ₃	Cultura com 50% das plantas apresentando 3 folhas totalmente desdobradas
	V ₆	Cultura com 50% das plantas apresentando 6 folhas totalmente desdobradas
	V ₉	Cultura com 50% das plantas apresentando 9 folhas totalmente desdobradas
	V ₁₂	Cultura com 50% das plantas apresentando 12 folhas totalmente desdobradas
	V ₁₅	Cultura com 50% das plantas apresentando 15 folhas totalmente desdobradas
Reprodutiva	V _T	Cultura com 50% das plantas apresentando pendão completamente desenvolvido
	R ₁	Cultura com 50% das plantas apresentando estilo-estigma fora da palha
	R ₂	Cultura com 50% das plantas apresentando grãos leitosos
	R ₃	Cultura com 50% das plantas apresentando grãos pastosos
	R ₄	Cultura com 50% das plantas apresentando grãos farináceos
	R ₅	Cultura com 50% das plantas apresentando grãos farináceos duros
	R ₆	Cultura com 50% das plantas apresentando a “camada preta” (maturidade fisiológica)

Adaptada de Ritchie; Hanway e Benson (1996)

2.3 Aspectos da nutrição mineral da cultura de milho

A produtividade da cultura de milho no Brasil registrou nos últimos 36 anos um aumento de 3,62% ao ano (CONAB, 2015) e está previsto crescer 1,25% ao ano nos próximos 10 anos. Essa taxa de crescimento poderia ser maior, pois a projeção é conservadora e, a cultura tem grande potencial de crescimento no país (BRASIL, 2012), principalmente por motivos de nutrição mineral.

Esse incremento na produtividade dos grãos se deve principalmente ao melhoramento genético e ao melhor manejo da cultura (HAEGELE et al., 2013). Por meio do melhoramento genético, foi possível selecionar plantas de milho mais tolerantes aos estresses,

principalmente àqueles relacionados à densidade de plantio (FASOULA; FASOULA, 1997; TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004); à delonga do processo de senescência das folhas (THOMAS; HOWARTH, 2000); à seleção de plantas com sistema radicular mais efetivo (HAMMER et al., 2009), ao aumento da partição de matéria seca para a espiga (ECHARTE et al., 2000, LUQUE et al., 2006) e à manutenção da área foliar fotossinteticamente ativa durante o período de enchimento de grãos (DING et al., 2005, ECHARTE et al., 2008).

Além do melhoramento genético, a forma como a cultura de milho vem sendo conduzida contribuiu para os aumentos de produtividade. Observa-se no campo maior densidade de plantas, redução do espaçamento entre linhas e, aumento do uso de fertilizantes (CARLONE; RUSSEL, 1987; DWYER et al., 1991; TOLLENAAR, 1991).

Uma análise a partir de resultados de pesquisas realizadas nos Estados Unidos, Inglaterra e países tropicais, com as culturas de milho, trigo, soja, arroz e feijão que em média 40% do aumento de produtividade do milho foi devido ao uso de fertilizantes e de calcário (STEWART et al., 2005).

Além disso, a seleção genética normalmente é conduzida em solos com altos teores de nitrogênio, para que a disponibilidade desse elemento no solo não seja um fator restritivo durante o processo de seleção (KAMPRATH et al., 1982). Com isso, grande parte das pesquisas referentes à nutrição mineral de milho relaciona o aumento da aplicação de fertilizantes nitrogenados com os aumentos de produtividade (DUVICK; CASSMAN, 1999; SANGOI, 2001; CIAMPITTI; VYN, 2011, 2013; HAEGELE et al., 2013; CIAMPITTI et al., 2013).

Ainda em 1984, um estudo comparando 25 cultivares de milho, cultivados entre 1930 e 1980, demonstrou que a produtividade da cultura aumentou em média $51 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em solo com baixo teor de nitrogênio, e $87 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ em solo com alto teor de nitrogênio (CASTLEBERRY et al., 1984). No Brasil, uma pesquisa realizada com quatro híbridos, lançados entre 1960 e 1990, demonstrou que o híbrido mais recente produziu mais grãos, independente dos teores de nitrogênio no solo (SANGOI et al., 2001).

Embora os estudos sobre os aumentos de produtividade de milho estejam relacionados com a adubação nitrogenada, também são de importância estudos que considerem a influência e o processo de redistribuição dos outros elementos minerais nos atuais híbridos de milho. Para atender a demanda e otimizar produtividade dos híbridos modernos deve-se buscar uma nutrição mineral apropriada para a cultura. Desta forma, a melhor compreensão do balanço nutricional da cultura de milho pode ser adquirida através de

estudos que avaliem os teores dos elementos nos diferentes órgãos da planta nos diferentes estágios de desenvolvimento da cultura (CIAMPITTI et al., 2013).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido na área experimental do Departamento de Produção Vegetal, no Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (Esalq/Usq), no município de Piracicaba, SP. A área está localizada nas seguintes coordenadas geográficas: 22° 41’ 30” de latitude Sul e 47° 38’ 30” de longitude Oeste e 546 m de altitude.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico argiloso (HEIFFIG, 2002). O clima da região, segundo a classificação de Köppen é Cwa, com verão chuvoso e estiagem de inverno e temperatura média anual em torno de 21,4°C. A precipitação média anual é de 1257 mm (SENTELHAS; PEREIRA, 2000).

3.2 Caracterização do experimento

Utilizou-se o híbrido simples de milho DKB 390 VT PRO². Este foi selecionado por ser considerado de alto potencial produtivo, que apresenta a tecnologia VT PRO² e que é a junção da tecnologia RR que confere tolerância ao herbicida glifosato, mais a tecnologia “YieldGard” que propicia o controle da lagarta-do-cartucho (*Spodoptera frugiperda*), da lagarta-da-espiga (*Helicoverpa zea*) e da broca-do-colmo (*Diatraea*).

A semeadura foi realizada no dia 26 de março de 2013, no espaçamento de 0,45 m entrelinha, com densidade populacional de 65.000 plantas por hectare. Antes da semeadura as sementes foram tratadas com Fipronil + Piraclostrobina + Tiofanato Metílico na dose de 200 mL por 100 kg de sementes.

Antes da instalação do experimento foi realizada a análise de solo (Tabela 2), com base na análise foi calculada a adubação de semeadura na qual foram aplicados 286 kg.ha⁻¹ da formulação 8:28:16 + 0,3% Zn. Adubação de cobertura foi feita no estágio V₄ (emissão da quarta folha) com 50 kg.ha⁻¹ de nitrogênio na forma de ureia revestida.

O controle de plantas daninhas aplicado em pós-emergência, com o herbicida Glifosato na dose de 3 L ha⁻¹ aos 38 dias após a semeadura (Estádio V₈ – cultura com 50% das plantas apresentando 8 folhas completamente desdobradas).

Tabela 2 - Análise de solo (0-20 cm) da área de condução dos experimentos

pH	P-Res	K⁺	Ca²⁺	Mg²⁺	H+Al
CaCl₂	mg dm⁻³	mmol_c dm⁻³			
5,1	13	5,3	31	16	39
SB	T	V	M.O.		
mmol_c dm⁻³		%	g dm³		
52,2	91,4	57	21		

3.3 Disposição do experimento e tratamentos

Como o objetivo do estudo era avaliar a nutrição mineral da cultura de milho nos seus diversos estádios de desenvolvimento, era necessário estabelecer um talhão o mais homogêneo possível. Assim, uma área total e homogênea foi cultivada com o mesmo híbrido e utilizando a mesma prática de manejo, inclusive adubação. Esta área de 5.000 m² foi dividida em 315 parcelas para distribuir melhor as amostragens de plantas inteiras. As parcelas eram constituídas de quatro linhas de sete metros de comprimento, espaçadas de 0,45 metros, sendo as duas linhas centrais consideradas úteis para a amostragem de plantas. A área total de cada parcela era de 12,6 m² (Figura 1) e em cada uma foram colhidas ao acaso não mais que uma planta por linha útil.

Apesar do experimento não apresentar tratamentos formais, definiu-se como tratamentos as épocas (estádios) de coleta das plantas de acordo com escala proposta por Ritchie, Hanway e Benson (1996), mostrada na Tabela 1.

Foram coletadas ao acaso dentro de cada parcela delimitada (também escolhida ao acaso) uma planta, em cada um dos estádios fenológicos V₂, V₄, V₆, V₈ e V₁₀, respectivamente aos 14, 21, 28, 35 e 42 dias após a semeadura (DAS), totalizando 60 plantas. As 60 plantas retiradas em cada coleta foram divididas ao acaso em seis repetições, formando seis amostras compostas de dez plantas para cada amostragem.

Aos 50 (estádio V₁₂), 56 (estádio V₁₅), 70 (estádio R₁), 77 (estádio R₂), 84 (estádio R₂), 91 (estádio R₃), 104 (estádio R₄), 111 (estádio R₄), 118 (estádio R₅), 127 (estádio R₅) e 139 (estádio R₆) dias após a semeadura, o número de plantas por amostragens foi reduzido pela metade, isto é, foram retiradas de forma aleatória um total de 30 plantas a cada coleta. Da mesma forma, as 30 plantas retiradas em cada coleta foram também divididas em seis repetições formando amostras compostas de cinco plantas.

Ao final, de cada parcela foram retiradas apenas duas plantas (uma em cada linha útil) com o intuito de não afetar o desenvolvimento das demais, principalmente no momento da colheita.

Como já mencionado acima, durante todo o período de condução do experimento foram coletadas e analisadas 630 plantas de milho (1,93 % do total de plantas do talhão cultivado) e para evitar que mais de uma planta fosse retirada das linhas centrais úteis de cada parcela (Figura 2), foram estabelecidas 315 parcelas dentro do campo experimental. Como os dados colhidos são apresentados “por planta” as coletas pouco afetaram o *stand*.

Figura 1 – Área experimental do Departamento de Produção Vegetal da Esalq/Usq

Figura 2 – Divisão da área experimental em parcelas

3.4 Avaliações

3.4.1 Fenologia

Para a caracterização de cada estágio de desenvolvimento, foram efetuadas medidas fenológicas a cada dois dias durante o ciclo da cultura de acordo com a escala proposta por Ritchie, Hanway e Benson (1996) (Tabela 1). Como algumas coletas coincidiram com os mesmos estágios, os dados são apresentados na forma de dias após a semeadura (DAS).

3.4.2 Elementos do clima

Os dados de temperatura e precipitação foram obtidos no Posto Meteorológico de Piracicaba, localizado no Departamento de Engenharia de Biossistemas, da Esalq/Usf. Com esses dados, foram calculados: (a) graus-dia (GD, °C d⁻¹), calculado com base no método proposto por Arnold (1959):

$$GD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_b \quad (1)$$

em que: GD, é o total de graus-dia acumulado; T_{max} é a temperatura do ar máxima diária (°C); T_{min} é a temperatura do ar mínima diária (°C) e T_b é a temperatura basal inferior tomada como 10°C para a cultura do milho.

3.4.3 Balanço hídrico

Foi elaborado o balanço hídrico (BH) da cultura, sendo a evapotranspiração potencial de referência (E_{To}, mm d⁻¹), calculada com base no método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998). O balanço hídrico propriamente dito foi calculado com base no método de Thornthwaite e Mather (1955), que também estima a evapotranspiração real (E_{Tr}, mm d⁻¹), utilizada na estimativa do fluxo de seiva na planta, como será visto adiante.

3.4.4 Massa de matéria seca

No laboratório as plantas foram separadas em folha, colmo, pendão, espiga, palha e estilo-estigma. Posteriormente estes órgãos foram separados em sacos de papel individualizados, identificados e levados à estufa de secagem de ventilação forçada de ar a 65°C, até massa constante para a determinação da massa de matéria seca. O somatório da massa de matéria seca de cada órgão por planta resultou no total de massa de matéria seca de cada planta. As pesagens foram realizadas em balança digital com precisão de 0,001 grama.

3.4.5 Área foliar

A área foliar nos diferentes estádios foi avaliada por intermédio de um sensor comercial da marca LI-COR®, modelo Li-3100C. As folhas foram removidas e passadas no equipamento, uma a uma e, obteve-se o valor da área foliar de cada amostra.

3.4.6 Análise dos macronutrientes e micronutrientes

As amostras do material vegetal seco, conforme descrito acima, foram homogeneizadas, identificadas e encaminhadas para o laboratório de análise foliar Laborfort Análises Químicas. Neste laboratório sub-amostras homogêneas foram utilizadas para a determinação dos macronutrientes e micronutrientes através dos métodos descritos por Silva (2009).

3.4.7 Produtividade e componentes de produção

A colheita do experimento foi realizada no estádio R₆ (maturidade fisiológica). A produtividade de grãos foi realizada através da colheita de duas fileiras centrais, onde foram eliminados 0,5 m das bordas iniciais e finais de cada parcela. As pesagens foram realizadas em balança digital com precisão de 0,001 grama.

3.4.8 Massa de 1000 grãos

Após colheita de cada parcela, os grãos foram secos a umidade padrão de 13% e realizada a pesagem de 1000 grãos escolhidos aleatoriamente.

3.5 Modelagem dos dados

Com base nos resultados obtidos realizou-se um estudo de modelagem da absorção e da partição dos nutrientes da cultura de milho, com o intuito de aprimorar a metodologia utilizada classicamente para a recomendação de adubação.

O modelo proposto considera que a recomendação de adubação deve ser realizada com base na variação temporal da taxa de absorção de nutrientes, a qual deveria definir melhor a demanda da cultura, em comparação com a recomendação clássica baseada no teor crítico dos nutrientes no solo.

Considerando que em determinado instante t a cultura tenha acumulado uma massa de matéria seca Y e que neste instante seu teor de determinado nutriente seja T , é fácil de verificar que a absorção acumulada A desse nutriente é dada pelo produto $Y \times T$. Assim sendo, o acúmulo de Y em função do tempo t e os teores de nutrientes T , também em função do tempo t , foram modelados por equações apropriadas.

Para o desenvolvimento do modelo geral (Figura 3), tem-se como base para a curva de crescimento da planta de milho (Figura 3A), isto é, do acúmulo da matéria seca total, o modelo de uma curva sigmoidal. A característica das sigmoidais é de aumentos positivos (taxas) crescentes na fase vegetativa e aumentos positivos (taxas) decrescentes na fase reprodutiva, daí sua forma típica em S. A separação dessas duas fases é feita pelo ponto de inflexão.

A curva sigmoidal de crescimento das plantas de milho Y em função do tempo t mais adequada para essa pesquisa foi do tipo:

$$Y = \left[a + \frac{b}{1 + \left[\frac{(t-c)}{d} \right]^2} \right] \quad (2)$$

em que Y é a variável dependente, que é a massa de matéria seca da planta (kg ha^{-1}) e, t (dias - dias após a semeadura, DAS) é a variável independente. Nesse caso, t é o tempo que abrange todo o ciclo da cultura a partir da semeadura. Este modelo foi encontrado pelo emprego do programa TableCurve (SYSTAT SOFTWARE, 2015) com cinco parâmetros empíricos, a , b , c , e d de ajuste, calculados com os dados experimentais minimizando a soma do quadrado dos desvios.

Para a curva do teor do nutriente na planta T (Figura 3B), assumiu-se o modelo de potencia decrescente, que mais se adaptou a maioria dos dados experimentais dos nutrientes. Para alguns nutrientes que apresentaram um comportamento aleatório, sem diferenças significativas adotou-se o valor médio, isso é T como uma constante:

$$T = e.x^f \text{ ou } T = k \quad (3)$$

onde e e f são parâmetros de ajuste e k é a média dos teores dos elementos minerais em questão.

Multiplicando o valor de Y (kg ha^{-1} – kg de matéria seca por hectare) em cada momento t_i (d) da curva de crescimento (Figura 3A) pelo respectivo teor T de cada nutriente (kg kg^{-1} – kg do nutriente por kg de matéria seca) da planta (Figura 3B), obtém-se a curva da marcha de absorção A (kg ha^{-1} – kg do nutriente por hectare) deste nutriente (Figura 3C e

Equação 4), sendo que o teor do nutriente T pode ser constante ou não ao longo do período de avaliação, isto é:

$$A(t) = Y(t)T(t) \quad (4)$$

Figura 3 – Modelo para o cálculo da curva de crescimento (A), curva do teor de nutrientes da planta (B) e curva da marcha de absorção de macronutriente e micronutriente (C)

A proposta deste estudo envolve obter a curva da taxa de absorção do nutriente ($kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$) (Figura 4B). Ela pode ser calculada através da derivada primeira da equação (2), representada na Figura 4A, que em seguida é multiplicada pelo teor do nutriente na planta (3B).

Para expressões em função do tempo, como a da Equação 2 (Figura 3A), a primeira derivada β ($dY/dt=\beta$) é uma taxa, no caso a taxa de crescimento, apresentada na Figura 4A. Para as curvas sigmoidais, suas derivadas tem a forma de sino, passando por um máximo que corresponde ao ponto de inflexão da Figura 3A.

Na Figura 4 observa-se que as taxas de crescimento e absorção são crescentes antes do máximo e depois decrescentes, mas sempre positivas.

Como dito acima, multiplicando o valor de β ($kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ – kg de matéria seca por hectare por dia) em cada momento t_i (DAS) da curva da taxa de crescimento (Figura 4A) pelo respectivo teor médio T de cada nutriente ($kg\ kg^{-1}$ – kg do nutriente por kg de matéria seca) da planta (Figura 3B), obtém-se a curva da taxa de absorção $\lambda = dA/dt$ ($kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ - kg do

nutriente por hectare por dia) deste nutriente (Figura 4B e Equação 5), representadas graficamente na Figura 4^a e 4B, respectivamente.

$$\lambda(t) = \beta(t)T(t) \quad (5)$$

Figura 4 – Modelo para o cálculo da curva da taxa de crescimento (A) e curva da taxa de absorção de nutriente (B)

A partir da derivada primeira da taxa de absorção de nutrientes λ (ou derivada segunda da marcha de absorção $A(t)$) é possível calcular a máxima taxa de absorção dos 14 nutrientes de interesse. O estudo sugere que a taxa máxima de absorção do nutriente (λ_{max}) esteja relacionada ao teor crítico (T_c) do mesmo nutriente no solo, conforme representado na Figura 5, a qual corresponde à taxa de oferta do solo (λ_s), considerada constante.

Figura 5 – Modelo para o cálculo da taxa de oferta do nutriente pelo solo (λ_s corresponde à taxa máxima de absorção do nutriente do solo) (A) e do teor crítico de macronutrientes (B) e micronutrientes (C) no solo

Desta forma, para cada nutriente, conhecendo a taxa máxima de absorção (λ_{max}), pode-se estimar a concentração média crítica (Cc , mol.L^{-1}) desse nutriente na seiva bruta (assumida como equivalente à da solução do solo). O fluxo de água que vem das raízes até as folhas, pode ser considerada como o próprio fluxo de evapotranspiração real da cultura (ETr ,

mm d⁻¹), que pode ser calculada pelo balanço hídrico de Thornthwaite e Matter (1955). Da *ET_r* subtrai-se a taxa de evaporação (*E*, mm d⁻¹), da superfície do solo (ausência de nutrientes) e adiciona-se a taxa de água (*Ams*, mm d⁻¹) que é absorvida pela planta. Considerando a massa molecular do nutriente (*M_N*, g.mol⁻¹) em questão, temos:

$$C_c = \frac{\lambda \max}{10.M_N.(ET_c - E + Ams)} \quad (6)$$

O valor de *C_c* obtido pela Equação 6 representa a concentração do nutriente, quando sua taxa de absorção for máxima, e deve representar a concentração crítica. Desta forma, conhecido o *C_c* correspondente à taxa máxima de absorção de nutrientes pela cultura de milho, pode-se desenvolver uma metodologia de adubação visando atingir a produtividade máxima do milho.

3.6 Análise estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada com o auxílio do programa SAS® (SAS INSTITUTE, 2003). O mesmo foi utilizado para as análises de variância (ANOVA), para a análise de comparação de médias por meio do teste de Tukey (*p* < 0,05) e para a análise multivariada com base nos componentes principais. Para as análises de regressão e ajuste dos modelos utilizou-se o TableCurve 2D versão 5.01 (SISTAT SOFTWARE, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Precipitação e temperatura

A precipitação média observada, entre os meses de março e agosto de 2013, época de condução do experimento de campo, foi de 409,6 mm (Figura 6). A chuva ocorreu do final do mês de março até meados do mês de abril, entre 0 e 20 dias após a semeadura da cultura de milho, período compreendido entre a semeadura e o estágio fenológico V₄ (cultura com 50% das plantas apresentando 4 folhas totalmente desdobradas).

Após esse período de chuva, houve uma estiagem que se estendeu até o final do mês de maio, aproximadamente entre 20 a 56 dias após a semeadura (Figura 6), particularmente entre os estádios fenológicos V₄ (cultura com 50% das plantas apresentando 4 folhas totalmente desdobradas) e V₁₅ (cultura com 50% das plantas apresentando a 15ª folha totalmente desdobradas). Esse período sem chuva também pode ser observado na Figura 7, onde o armazenamento de água no solo (Arm) calculado pelo balanço hídrico (BH) é representado graficamente. O armazenamento de água no solo reduziu de uma capacidade de água disponível (CAD) igual a 46,4 mm para aproximadamente 12 mm, evidenciando um estresse hídrico.

Os registros de chuva voltaram a ocorrer no final do mês de maio até final do mês de julho, entre 57 a 121 dias após a semeadura, período entre os estádios fenológicos V₁₅ e R_{5.1} (cultura com 50% das plantas apresentando grãos farináceos duros) (Figura 6). Entre 96 e 115 dias após a semeadura (estádios fenológicos R₃ e R₄), o volume de chuva diminui, mas o armazenamento de água no solo só se reduziu a aproximadamente 30 mm, sem déficit hídrico pronunciado (Figura 7).

O acúmulo de chuva observado no período de condução do experimento foi favorável ao cultivo do milho segunda safra. A cultura de milho requer, em média, de 350 a 600 mm de água durante todo o seu ciclo, o consumo de água varia com as práticas de manejo adotadas e com as condições climáticas (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000; SILVA et al., 2006; EMBRAPA, 2011). O período de estiagem também não afetou o desenvolvimento da cultura e a produção de grãos. Um dos motivos para que a cultura de milho não sentisse o efeito estresse deve-se ao armazenamento de água no solo durante os primeiros 20 dias chuvosos do desenvolvimento da cultura.

Além disso, o efeito do estresse hídrico varia de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura. Quando ocorre no estágio vegetativo as plantas ficam mais baixas e apresentam folhas menores e, conseqüentemente menor área foliar. No entanto, o

estresse hídrico é principalmente mais prejudicial à produção de grãos quando ocorre no início do desenvolvimento do pendão até o enchimento de grãos (EDWARDS, 2009). A demanda de água aumenta rapidamente cerca de duas semanas antes do desenvolvimento do pendão, atinge um pico no florescimento e o máximo uso da água permanece por aproximadamente mais duas semanas e depois decresce rapidamente (EDWARDS, 2009).

Figura 6 – Precipitação (mm) e temperatura (°C) registradas na cidade de Piracicaba, São Paulo entre os meses de março e agosto de 2013

As temperaturas máximas e mínimas variaram bastante ao longo do ciclo e foram favoráveis ao desenvolvimento da cultura. A temperatura máxima foi em média de 28,4°C e a temperatura mínima foi em média de 14,6°C (Figura 6).

A temperatura é muito importante para o desenvolvimento da cultura de milho. A faixa de temperatura da cultura está entre 10 a 30°C. O ideal é temperaturas entre 26 e 30°C durante o dia e, 16 e 19°C durante a noite (EDWARDS, 2009; EMBRAPA, 2011). Altas temperaturas diurnas comprometem o metabolismo da cultura, há a desnaturação enzimática (FLOSS, 2011), inibição da fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2011) e redução da absorção de água e nutrientes (EDWARDS, 2009). Da mesma forma, temperaturas noturnas altas comprometem a produtividade, pois a respiração da planta aumenta e consome boa parte dos

fotoassimilados acumulados durante o dia (EMBRAPA, 2011). Em temperaturas menores o metabolismo da planta decresce decresce e há um menor acúmulo de massa de matéria seca (EDWARDS, 2009; EMBRAPA, 2011).

Figura 7 – Capacidade de água disponível no solo (CAD, mm); Armazenamento de água no solo (Arm, mm) e Evapotranspiração real (ETr, mm) entre os meses de março e agosto de 2013

4.2 Fenologia

A data referente a cada um dos estádios fenológicos da cultura de milho bem como, do correspondente número de dias após a semeadura, do número de graus-dia (temperatura basal inferior: 10°C) e desenvolvimento relativo estão descrito na Tabela 3.

A condução do experimento ocorreu entre o mês de março a agosto, época denominada na agricultura brasileira de segunda safra de milho. O ciclo da cultura de milho foi de 139 dias, o estágio reprodutivo iniciou-se aos 70 dias após a semeadura (estádio R_1) nesse mesmo período o número de graus-dia foi de 863°C, o número total de graus-dia foi de 1596°C (Tabela 3).

A caracterização dos estádios de desenvolvimento das culturas é uma ferramenta importante, pois possibilita identificar os diferentes estádios de desenvolvimento morfológico da planta, permitindo o estabelecimento de estratégias de manejo e consequentemente a obtenção de rendimentos satisfatórios e lucrativos (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Tabela 3 - Descrição da data de ocorrência (D) dos estádios fenológicos da cultura de milho (DKB 390 VT PRO²), e do correspondente número de dias após a semeadura (DAS, d), número de graus-dia (GD, °C.d) (temperatura basal inferior: 10°C) e desenvolvimento relativo (Dr). Departamento de Produção Vegetal, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo

Fase	T	Estádio	D	DAS	GD	Dr
Vegetativa		Semeadura	26/3/2013	0	-	-
		V _E	2/4/2013	7	0	0,000
	1	V ₂	9/4/2013	14	215	0,135
	2	V ₄	16/4/2013	21	307	0,192
	3	V ₆	23/4/2013	28	385	0,241
	4	V ₈	30/4/2013	35	474	0,297
	5	V ₁₀	7/5/2013	42	567	0,355
Reprodutiva	6	V ₁₂	15/5/2013	50	653	0,409
	7	V ₁₅	21/5/2013	56	728	0,456
	8	R ₁	4/6/2013	70	863	0,541
	9	R ₂	11/6/2013	77	943	0,591
	10	R _{2.1}	18/6/2013	84	1021	0,640
	11	R ₃	25/6/2013	91	1097	0,687
	12	R ₄	8/7/2013	104	1249	0,783
	13	R _{4.1}	15/7/2013	111	1325	0,830
	14	R ₅	22/7/2013	118	1411	0,884
	15	R _{5.1}	31/7/2013	127	1462	0,916
	16	R ₆	12/08/2013	139	1596	1,000

4.3 Massa de matéria seca

4.3.1 Massa de matéria seca da planta de milho

Observaram-se incrementos crescentes e positivos na massa de matéria seca de folha desde o início do crescimento e desenvolvimento da cultura de milho até o final do estágio vegetativo, aproximadamente 56 dias após a semeadura (estádio V₁₅), quando apresentou 42,8 g planta⁻¹ (Tabela 4).

Com relação à área foliar, no início do crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (estádio V₂) seu valor foi de 99,77 cm² planta⁻¹ e, aos 70 dias após a semeadura (estádio R₁) se observa a máxima expansão de área foliar com 6129,08 cm² planta⁻¹. A partir dessa data (florescimento), a área foliar foi decrescendo e, ao final do ciclo da cultura, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆), o valor observado foi de 4454,81 cm² planta⁻¹ (Tabela 4).

No final do estágio vegetativo, a planta de milho prioriza o desenvolvimento do pendão e da espiga, com isso há a remobilização dos fotoassimilados e nutrientes da folha para a produção e dispersão de pólen e para o enchimento de grãos (SANGOI et al., 2002; BORGES, 2006).

Pode-se observar também uma redução na massa de matéria seca de colmo aos 91 e 104 dias após a semeadura (estádio R_3 e R_4) (Tabela 4). No estágio reprodutivo, a espiga é um dreno significativo e, desta forma a planta de milho, redistribui os fotoassimilados e os nutrientes das folhas e do colmo são utilizados para o enchimento de grãos. Consequentemente, quanto mais a cultura se aproxima da maturidade fisiológica, mais as folhas e o colmo entram em senescência.

A senescência é um processo natural do desenvolvimento da planta (SRIVASTAVA, 2002). Ocorre principalmente para remobilização de nutrientes e fotoassimilados das folhas e do colmo para outros órgãos, como os grãos em desenvolvimento (DANGL; DIETRICH; THOMAS, 2000; LIM; KIM; NAM, 2007). Em algumas culturas, como o girassol, o milho e o sorgo, o processo de senescência é acelerada durante o período de enchimento de grãos (LAFARGE; HAMMER, 2002).

Aos 70 dias após a semeadura (estádio R_1), a cultura iniciou a fase reprodutiva com o desenvolvimento do pendão e da espiga (Tabela 4). A massa de matéria seca do pendão foi maior no estágio R_1 , a partir deste momento houve uma redução em sua massa de matéria seca, mantendo-se praticamente constante até o final do ciclo (Tabela 4). No estágio fenológico VT (cultura com 50% das plantas apresentando pendão completamente desenvolvido) o pendão atinge seu crescimento máximo e sua maior massa de matéria seca (ABENDROTH et al., 2011).

Neste estudo, o maior desenvolvimento do pendão foi observado no estágio R_1 , isso porque o estágio fenológico VT é caracterizado quando a última ramificação do pendão é completamente visível e os estigmas ainda não emergiram, no entanto, nos atuais híbridos de milho, a diferenciação do estágio fenológico VT para o R_1 não ocorre exatamente nessa sequência, podendo em alguns casos a emergência dos estilos-estigmas para fora da palha ocorre antes do desenvolvimento completo do pendão (NIELSEN, 2009).

Com o desenvolvimento do pendão, a planta de milho disponibiliza a maior parte de suas reservas para a produção e dispersão de pólen (SANGOI; SALVADOR, 1998). Através do melhoramento genético os híbridos modernos produzem pendões menores (DUVICK; CASSMANN, 1999) que demandam menores quantidades e fotoassimilados para o seu desenvolvimento (SANGOI; SALVADOR, 1998).

Com relação, ao crescimento do estilo-estigma, a massa de matéria seca inicial é menor, com incrementos até 91 dias após a semeadura (estádio R_3) e, posteriormente decresce. Observa-se um valor maior de sua massa de matéria seca aos 111 e 139 dias após a semeadura, que pode está relacionado a problemas de amostragem (Tabela 4).

Cada óvulo (potencial grão) desenvolve o seu próprio estilo-estigma. Os estilos-estigmas começam a se desenvolver 10 a 14 dias antes do estágio R_1 , a partir dos óvulos mais próximos da base da espiga e, sequencialmente até o a ponta. Sendo assim, os estilos-estigmas dos óvulos da base da espiga são os primeiros a emergir e os da ponta da espiga são os últimos emergir para fora da palha. Os estilos-estigmas podem crescer de 2,5 a 3,8 cm por dia e se desenvolvem até que sejam fertilizados. Quando a cultura se encontra no estágio R_3 , já ocorreu a formação da maior parte dos grãos e os estilos-estigmas neste período já estão marrons e secos ou começando a secar (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 1993; NIELSEN, 2013).

A massa de matéria seca de palha foi crescente ao longo do período reprodutivo, atingindo o maior acúmulo de massa de matéria seca de palha aos 127 dias após a semeadura (estádio $R_{5.1}$) (Tabela 4).

Em um estudo realizado com milho doce, observou-se que a palha da espiga contribuiu para o enchimento de grãos (FUJITA et al., 1994). A significativa participação da palha na produção de grãos é devido à eficiência de remobilização de fotoassimilados e nutrientes da palha para a espiga. A proximidade da palha com a espiga contribui para que a remobilização de fotoassimilados seja mais eficiente quando comparada com a remobilização a partir das folhas. (SAWADA et al., 1994).

O acúmulo de massa de matéria seca de espiga, inicialmente é menor, com incrementos crescentes até os 139 dias após a semeadura (estádio R_6), quando se observa a maior massa de matéria seca de espiga (Tabela 4). A máxima massa de matéria seca de grão, normalmente pode ser observada no momento em que a cultura de milho se encontra na maturidade fisiológica (NIELSEN, 2013).

Tabela 4 - Área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$) e massa de matéria seca de folha, colmo, pendão, espiga, estilo-estigma, palha e total (g planta^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS) de plantas de milho, híbrido DKB 390 VT PRO²

DAS	Estádio	Área foliar $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$	Folha	Colmo	Pendão	Espiga	Estigma	Palha	Total
		g planta^{-1}							
14	V ₂	99,77	0,28	0,12	.	.	.	.	0,40
21	V ₄	432,54	1,54	0,91	.	.	.	.	2,45
28	V ₆	1152,84	4,40	3,13	.	.	.	.	7,53
35	V ₈	2400,91	10,08	15,50	.	.	.	.	25,58
42	V ₁₀	3807,22	20,04	17,02	.	.	.	.	37,06
50	V ₁₂	5152,32	31,26	42,76	.	.	.	.	74,02
56	V ₁₅	6047,51	42,80	58,05	.	.	.	.	100,85
70	R ₁	6129,08	37,38	63,90	6,43	0,57	0,35	3,60	112,22
77	R ₂	5933,97	35,84	76,66	3,49	2,06	1,00	8,24	127,29
84	R _{2,1}	5927,17	35,42	86,70	2,44	7,21	1,48	14,91	148,16
91	R ₃	5680,66	33,72	76,33	2,35	17,23	1,88	19,29	150,80
104	R ₄	5345,48	32,36	74,29	2,25	52,26	1,01	22,99	185,16
111	R _{4,1}	5932,09	36,53	106,56	2,61	92,61	3,89	30,72	272,92
118	R ₅	5524,86	39,84	102,01	2,36	130,11	1,31	33,06	308,69
127	R _{5,1}	5823,16	43,24	99,94	2,24	154,31	0,85	34,11	334,69
139	R ₆	4454,81	39,32	99,69	2,35	179,37	2,35	31,83	354,90

4.3.2 Massa de matéria seca total da cultura de milho

Com o crescimento e desenvolvimento da planta de milho, a massa de matéria seca total Y aumentou até a maturidade fisiológica (estádio R₆), e nesse estágio (139 dias após a semeadura) a massa de matéria seca total foi de $354,9 \text{ g planta}^{-1}$ (Tabela 3). Consequentemente, a massa de matéria seca da cultura de milho por hectare também foi crescente, ao final do ciclo da cultura a massa de matéria seca foi de $23068,48 \text{ kg hectare}^{-1}$ para uma população de $65.000 \text{ plantas ha}^{-1}$ (Figura 8). Esse acúmulo de massa de matéria seca total ajustando os dados experimentais ao modelo descrito na Equação 2, pode ser visto na Figura 8. O ajuste foi muito bom, com um R^2 significativo de 0,97. Portanto, para os cálculos subsequentes utilizou-se esse modelo.

Figura 8 – Massa de matéria seca total ($y = Y$) por hectare da cultura de milho (kg ha^{-1}) em relação ao tempo ($x = t =$ dias após a semeadura - DAS)

No início do crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (estádio V_2 - cultura com 50% das plantas apresentando 2 folhas totalmente desdobradas) as folhas representavam aproximadamente 70% e o colmo 30% da massa de matéria seca total. Aos 70 dias após a semeadura (estádio R_1 - cultura com 50% das plantas apresentando estilo-estigma fora da palha) as folhas contribuíram em média com 33%, o colmo com 57% e os órgãos reprodutivos com 10% da massa de matéria seca total. No final do ciclo de desenvolvimento, aos 139 dias após a semeadura (estádio R_6) se observa que as folhas representavam aproximadamente 11% e o colmo 28% da massa de matéria seca total, enquanto que a massa de matéria seca de pendão, espiga, estilo-estigma e palha representavam em média 61% do total (Tabela 3 e Figura 9).

Com base nesses resultados pode se inferir que o acúmulo e a remobilização de massa de matéria seca na cultura de milho tem uma sequência ao longo do ciclo. Alguns autores relatam que senescência, em cultura como o milho e a soja, é um processo que engloba toda a planta (DANGL; DIETRICH; THOMAS, 2000; LIM; KIM; NAM, 2007), além de ser provocado por fatores internos e externos e mediado por um programa genético (DANGL; DIETRICH; THOMAS, 2000; SRIVASTAVA, 2002).

Inicialmente, a maior porcentagem de massa de matéria seca é atribuída às folhas, que são responsáveis pela fotossíntese da planta e, conseqüentemente pela disponibilidade de fotoassimilados para o crescimento de folhas novas e do colmo. Além disso, parte dos carboidratos produzidos durante o processo fotossintético é armazenada no colmo. No entanto, normalmente no campo, se observa senescência das folhas do estrato inferior ainda

no estágio vegetativo, antes mesmo do florescimento. Portanto, aos 70 dias após a semeadura a maior porcentagem de massa de matéria seca é do colmo, e nessa fase é o principal órgão de reserva da planta de milho. A partir do estágio reprodutivo, a maior massa de matéria seca é conferida as estruturas reprodutivas, pois após o florescimento há intensa demanda de carboidratos e nutrientes para o desenvolvimento do pendão e para o enchimento de grãos, sendo que o maior acúmulo de massa de matéria seca é na espiga (Figura 9).

Figura 9 – Massa de matéria seca nos diferentes órgãos da planta de milho (g planta^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.4 Taxa de crescimento da cultura de milho

A taxa de crescimento da cultura de milho β (dY/dt , $\text{kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$) aumenta diariamente a medida que a cultura se desenvolve (dY^2/dt^2 = aceleração do crescimento o ganho de massa de matéria seca), sendo que o maior ganho de massa de matéria seca foi observado aos 84 dias após a semeadura, igual a $3,26 \text{ kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$ (Figura 10). Após esse período, os ganhos diminuíram até se tornarem zero, no instante em que a taxa de crescimento é máxima (β_{max}), sendo observada aos 112 dias após a semeadura, quando a taxa de crescimento da cultura de milho foi de $289,39 \text{ kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$ (Figura 10).

A partir desse máximo, aos 112 dias após a semeadura, os valores de taxa de crescimento continuaram positivos, mas com ganhos decrescentes, ou seja, a planta de milho desacelera seu acúmulo de massa de matéria seca, em consequência do processo de senescência (Figura 10).

Figura 10 – Taxa de crescimento de plantas de milho ($\text{kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.5 Teores de macro e micronutrientes nos órgãos da planta de milho

Os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S) nas folhas e nos colmos de plantas de milho são maiores no início e, decresce ao longo do ciclo de desenvolvimento da planta de milho (Figura 11). Observa-se que o teor dos elementos minerais é maior na folha quando comparado ao colmo, com exceção do K que estava em maiores concentrações no colmo até os 77 dias após a semeadura (estádio R_2).

Ao contrário dos demais macronutrientes, o teor de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) na folha é menor no início e, aumenta ao longo do ciclo de desenvolvimento da planta de milho. No colmo, os teores de Ca e Mg é crescente, atinge um pico aos 42 dias após a semeadura (estádio V_{10}) e, posteriormente decresce (Figura 11).

Na folha, os teores de N seguido dos teores de K são maiores, no colmo observa-se o contrário, o teor de K seguido do teor de N, é maior quando comparado aos demais macronutrientes (Figura 11).

Figura 11 – Teor de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) em folhas (●) e em colmos (▲) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

O teor dos micronutrientes, Boro (B), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn) na folha e no colmo também são maiores no início e decresce com desenvolvimento da planta de milho, com oscilações no decorrer do ciclo da planta de milho, sendo possível verificar pontos com teores maiores ou menores independentes da época de coleta. No colmo, os teores de Mn são constantes (Figura 12). O Fe é o micronutriente com maior teor tanto na folha quanto no colmo, sendo maior na folha.

Figura 12 – Teor de B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) em folhas (●) e em colmos (▲) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

Observa-se na Figura 13 o teor dos macronutrientes no pendão, no estilo-estigma e na palha. No pendão e na palha os teores dos nutrientes seguiu um padrão similar à folha e ao colmo, para N, P, K e S os teores são maiores no início e decrescem com o desenvolvimento da planta. Já os teores de Ca e Mg são maiores nos estádios finais de desenvolvimento da planta de milho. No estilo-estigma, há maiores teores de P, K e S no início e, decrescem com o desenvolvimento da planta de milho. O teor de N é constante durante todo o período de avaliação. Os teores de Ca e Mg, ao contrário, são menores no início e aumentam com o desenvolvimento da planta de milho.

O N seguido do K são os nutrientes que apresentam maiores teores no pendão, no estilo-estigma e na palha. Além disso, quando se compara os três órgãos observa-se maiores teores de N, P, K, e S no estilo-estigma e, de Ca e Mg no pendão (Figura 13).

Figura 13 – Teor de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) no pendão (●), no estilo-estigma (▲) e na palha (■) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

Com relação aos micronutrientes, no pendão os teores são menores no início e aumentam com o desenvolvimento da planta, sendo maiores aos 111 e 118 dias após a semeadura (estádio R_{4-5}). No estilo-estigma os teores oscilam em todo o ciclo de desenvolvimento da planta com valores maiores ou menores, independente da época de

coleta. Na palha os teores de Fe e Mn são constantes em todo o período de coleta e, os teores de Zn são menores nos estádios finais de desenvolvimento da planta de milho (Figura 14).

Quando se compara os três órgãos, observa-se maiores teores dos micronutrientes no estilo-estigma e no pendão em relação à palha (Figura 14).

Figura 14 – Teor de B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) no pendão (●), no estilo-estigma (▲) e na palha (■) de plantas de milho (g kg⁻¹) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

Os teores dos elementos minerais na espiga (sabugo + grão) foram analisados dos 70 aos 91 dias após a semeadura (estádio R₁₋₃). A partir dos 104 dias após a semeadura (estádio R₄) foi realizada a análise em separado do sabugo e do grão (Figura 15).

O teor dos macronutrientes e micronutrientes é maior no início do desenvolvimento da espiga e decresce até o período de avaliação, 91 dias após a semeadura (estádio R₃). Da mesma forma que na espiga, os teores dos nutrientes no sabugo e no grão decresce até o final do ciclo de cultivo (Figura 15 e 16). No entanto, no sabugo os teores de Ca, Fe e Mn são constantes e, no grão os teores constantes são de N, P, S, Fe e Zn.

A partir dos 104 dias após a semeadura (estádio R₄) se observa maiores teores de N, P, Mg e S no grão quando comparado ao sabugo. Ao contrário, os teores dos micronutrientes são maiores no sabugo quando comparados aos teores no grão (Figuras 15 e 16).

Figura 15 – Teor de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) na espiga (●), no sabugo (▲) e no grão (■) de plantas de milho (g kg⁻¹) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

Figura 16 – Teor de B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) na espiga (●), no sabugo (▲) e no grão (■) de plantas de milho (g kg^{-1}) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

Experimentos de campo avaliando os teores de N, P, K e S na cultura de milho apresentaram resultados similares, ou seja, os teores dos nutrientes analisados são maiores no início do desenvolvimento da cultura e depois decrescem até a maturidade fisiológica (CIAMPITTI et al., 2013; CIAMPITTI, 2012).

Durante o crescimento inicial, como existe uma baixa concentração de massa se observa uma elevada concentração de nutrientes, oriundos do solo ou remobilizados de outras partes da planta. Com crescimento da planta, que normalmente segue um modelo exponencial,

o acúmulo de massa é mais expressivo do que a capacidade que a planta tem de absorver e concentrar nutrientes. Desta forma verifica-se o efeito de diluição em decorrência do crescimento da planta.

Além disso, sabe-se que as maiores concentrações de N, por exemplo, estão ligadas as folhas. Com o passar do tempo estruturas, principalmente, de caule ganham maior proporção na participação da massa de matéria seca total caracterizando assim, parte desse efeito de diluição.

4.6 Correlação entre macronutrientes e micronutrientes

Os gráficos a seguir são denominados de Matriz de Dispersão, através da análise desses gráficos, observa-se a correlação dos elementos minerais nos diferentes órgãos da planta, no entanto, optou-se nesse estudo por expor apenas a correlação entre os nutrientes na folha e em toda a planta de milho ao longo do período de desenvolvimento da cultura (Figuras 17 e 18 e Tabelas 5 e 6).

Quanto menor o diâmetro da elipse maior será a correlação entre os elementos minerais considerados. A correlação será positiva quando a elipse estiver inclinada à direita e negativa quando estiver à esquerda. Quando a elipse formar um círculo, a correlação tende para zero, ou seja, os elementos minerais não estão correlacionados.

Além dos gráficos, a correlação entre os nutrientes na folha e em toda a planta de milho pode ser analisada através das tabelas dispostas a seguir. Os nutrientes que apresentam correlação estatística, positiva ou negativa, estão destacados em negrito, sendo que aqueles que apresentam o sinal negativo (-) antes do valor indicam uma correlação negativa.

Uma das correlações positivas observadas na folha e em toda a planta de milho, foi entre o N e S, isso é devido ao fato do S fazer parte da Ferredoxina a qual fornece energia proveniente do Fotossistema I, necessária para a transformação do nitrito (NO_2^-) em amônio (NH_4^+). Além disso, a Ferredoxina também atua na glutamato sintase (GOGAT).

A maior parte das correlações positivas principalmente do N se deve a sua influência no crescimento da planta, além de fazer parte de estruturas metabólicas como do aparato fotossintético. Por exemplo, nos fotossistemas são encontrados muitos transportadores que utilizam Fe, Cu e S como agentes de oxirredução.

Na folha também se observa uma correlação, no entanto, negativa entre o K, Ca e Mg. A velocidade de absorção de K é maior de Ca e Mg, pois o K tem uma maior facilidade para atravessar a membrana plasmática, em função disso reduz o potencial eletroquímico da célula que conseqüentemente reduz a força motora de absorção de Ca e Mg.

O K pode rapidamente ser transportado através da membrana plasmática podendo diminuir a absorção de outros cátions como o Ca e o Mg, não pela competição pelos sítios de ligação, mas através da competição por ânions nativos no citoplasma e no vacúolo se a taxa destes íons se torna limitante (MARSCHNER, 2011).

Figura 17 – Correlação entre os elementos minerais nas folhas de plantas de milho

Tabela 5 - Correlação entre os elementos minerais na folha de plantas de milho, híbrido DKB 390 VT PRO²

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
N*	1	0,82	0,85	-0,51	-0,51	0,94	0,70	-0,06	0,79	0,71	0,71
		0,0002	<0,0001	0,0509	0,0527	<0,0001	0,0036	0,8297	0,0004	0,0028	0,0028
P	0,82	1	0,74	-0,29	-0,38	0,90	0,40	-0,26	0,75	0,42	0,75
	0,0002		0,0015	0,2842	0,1661	<0,0001	0,1380	0,3459	0,0012	0,1235	0,0014
K	0,85	0,74	1	-0,77	-0,76	0,85	0,41	-0,35	0,49	0,49	0,44
	<0,0001	0,0015		0,0009	0,0010	<0,0001	0,1321	0,1963	0,0626	0,0651	0,1036
Ca	-0,51	0,29	-0,76	1	0,80	-0,48	-0,17	0,34	0,005	-0,12	-0,13
	0,0509	0,2842	0,0009		0,0003	0,0689	0,5461	0,2191	0,9843	0,6774	0,6461
Mg	-0,51	-0,38	-0,76	0,80	1	-0,55	-0,23	0,61	-0,18	-0,09	-0,17
	0,0527	0,1661	0,0010	0,0003		0,0320	0,4169	0,0151	0,5195	0,7535	0,5436
S	0,94267	0,90	0,85	-0,48	-0,55	1	0,59	-0,17	0,73	0,57	0,70
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0689	0,0320		0,0199	0,5422	0,0019	0,0259	0,0035
B	0,70128	0,40	0,41	-0,17	-0,23	0,59	1	0,13	0,67	0,68	0,72
	0,0036	0,1380	0,1321	0,5461	0,4169	0,0199		0,6367	0,0054	0,0054	0,025
Cu	-0,06	0,26	-0,35	0,34	0,61	-0,17	0,13	1	-0,06	0,21	-0,09
	0,8297	0,3459	0,1963	0,2191	0,0151	0,5422	0,6367		0,8085	0,4530	0,7380
Fe	0,79	0,75	0,49	0,005	-0,18	0,73	0,66	-0,07	1	0,71	0,73
	0,0004	0,0012	0,626	0,9843	0,5195	0,0019	0,0067	0,8085		0,0028	0,0021
Mn	0,71	0,42	0,49	-0,12	-0,09	0,57	0,68	0,21	0,71	1	0,34
	0,0028	0,1235	0,0651	0,6774	0,7535	0,0259	0,0054	0,4530	0,0028		0,2160
Zn	0,71	0,75	0,44	-0,13	-0,17	0,70	0,72	-0,09	0,73	0,34	1
	0,028	0,0014	0,1036	0,6461	0,5436	0,0035	0,0025	0,7380	0,0021	0,2160	

Coeficiente de correlação de Pearson Hipóteses - $H_0: \rho=0$ versus $H_1: \rho \neq 0$ ($\alpha = 5\%$)*Para todos os nutrientes a primeira linha representa o valor da correlação ρ e a segunda linha o Valor P

Figura 18 – Correlação entre os elementos minerais em plantas de milho

Tabela 6 - Correlação entre os elementos minerais em de plantas de milho, híbrido DKB 390 VT PRO²

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
N*	1	0,96	0,80	0,69	0,04	0,99	0,73	0,69	0,92	0,56	0,92
		<0,0001	0,0003	0,0041	0,8817	<0,0001	0,0020	0,0039	<0,0001	0,310	<0,0001
P	0,96	1	0,77	0,60	0,06	0,97	0,59	0,62	0,86	0,40	0,92
	0,0001		0,0007	0,0179	0,8327	<0,0001	0,0201	0,0136	<0,0001	0,1348	<0,0001
K	0,80	0,77	1	0,86	0,35	0,83	0,33	0,39	0,52	0,60	0,84
	0,0003	0,0007		<0,0001	0,1977	0,0001	0,2297	0,1534	0,0471	0,0172	<0,0001
Ca	0,69	0,60	0,86	1	0,34	0,68	0,44	0,35	0,51	0,84	0,71
	0,0041	0,0179	<0,0001		0,2191	0,0055	0,0986	0,2058	0,0539	<0,0001	0,0029
Mg	0,04	0,06	0,35	0,34	1	0,04	-0,31	0,03	-0,17	0,33	0,13
	0,8817	0,8327	0,1977	0,2191		0,8877	0,2635	0,9151	0,5521	0,2325	0,6521
S	0,99	0,97	0,83	0,68	0,04	1	0,67	0,69	0,87	0,49	0,93
	<0,0001	<0,0001	0,0001	0,0055	0,8877		0,0059	0,0041	<0,0001	0,0587	<0,0001
B	0,73	0,59	0,33	0,44	-0,31	0,67	1	0,79	0,82	0,52	0,64
	0,0020	0,0201	0,2297	0,0986	0,2635	0,0059		0,0004	0,0002	0,0474	0,0102
Cu	0,69	0,62	0,39	0,35	0,03	0,69	0,79	1	0,69	0,35	0,66
	0,0039	0,0136	0,1534	0,2058	0,9151	0,0041	0,0004		0,0046	0,1996	0,0072
Fe	0,92	0,86	0,52	0,51	-0,17	0,87	0,82	0,69	1	0,49	0,74
	<0,0001	<0,0001	0,471	0,0539	0,5521	<0,0001	0,0002	0,0046		0,0605	0,0015
Mn	0,56	0,40	0,60	0,84	0,33	0,49	0,82	0,35	0,59	1	0,54
	0,0310	0,1348	0,0172	<0,0001	0,2325	0,0587	0,0474	0,1996	0,0605		0,0379
Zn	0,92	0,92	0,84	0,71	0,13	0,93	0,64	0,66	0,74	0,54	1
	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0029	0,6521	<0,0001	0,0102	0,0072	0,0015	0,0379	

Coeficiente de correlação de Pearson Hipóteses - H₀: $\rho=0$ versus H₁: $\rho\neq0$ ($\alpha = 5\%$)*Para todos os nutrientes a primeira linha representa o valor da correlação ρ e a segunda linha o Valor P

4.7 Interação entre os nutrientes

Os gráficos a seguir são denominados de Biplot e os vetores coloridos saem da origem, que é a média dos teores dos nutrientes nos diferentes órgãos (Figura 19).

Com relação à folha, observa-se aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂) maiores teores de B, Fe, Mn e Zn. Aos 21 dias após a semeadura (estádio V₄) maiores teores de N, P e S e, aos 28 dias após a semeadura (estádio V₆) teores maiores de K. As observações a partir dos 84 dias após a semeadura (estádio R_{2,1}) se caracterizam por apresentarem altos teores de Ca, Mg e Cu (Figura 19a).

No colmo, os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura de milho, 14 e 21 dias após a semeadura (estádio V₂₋₄) se caracterizam por altos teores de N, P, S, B, Cu e Fe. Aos

28 dias após a semeadura (estádio V₆) observa-se maiores teores de Zn. E dos 42 aos 70 dias após a semeadura (estádio V₁₀ a R₁) os maiores teores são de K, Ca, Mg e Mn (Figura 19b).

No estágio R₁, aos 70 dias após a semeadura, se observa maiores teores de N e P no pendão e, de Ca e B no estilo-estigma. No final do ciclo, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) os maiores teores são de Mg no pendão, de N, Mg e Zn no estilo-estigma e de Fe na palha (Figura 19c, 19d e 19e).

Os teores dos elementos minerais na espiga (sabugo + grão) foram analisados dos 70 aos 91 dias após a semeadura. A partir dos 104 dias após a semeadura foi realizada a análise em separado do sabugo e do grão. Na espiga aos 70 dias após a semeadura (estádio R₁) há maior teor de S e aos 77 dias após a semeadura (estádio R₂) maiores teores de Cu (Figura 19f).

Com relação ao sabugo há uma maior concentração de nutrientes aos 104 dias após a semeadura (estádio R₄), no final do ciclo da cultura (Estádio R₆) as observações se caracterizam por não apresentar altos teores de nutriente (Figura 25g). No grão, há maiores teores de N, K, S, B, Cu e Mn aos 104 e 111 dias após a semeadura (estádio R₄), de P, Ca e Mg aos 118 dias após a semeadura (estádio R₅) e, de Zn aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) (Figura 19h).

Analisando o teor total dos nutrientes, aos 21 e 28 dias após a semeadura (estádio V₄₋₆) se observa maiores teores de Zn, aos 42 e 56 dias após a semeadura (estádio V₁₀ e V₁₅) de K, Mg, Cu e Mn e aos 70 dias após a semeadura (estádio R₁) de Mg. A partir do estágio R₂ (77 dias após a semeadura), na média os nutrientes estão na mesma concentração (Figura 19i).

Figura 19 – Interação entre os elementos minerais em plantas de milho em função dos dias após a semeadura

4.8 Teor total e absorção dos elementos minerais

4.8.1 Nitrogênio

Pela Figura 26a verifica-se que o teor (T) de nitrogênio (N) segue tipicamente o comportamento de uma curva de potência, do tipo mostrado na Equação 3, sendo maior no início do crescimento e desenvolvimento das plantas de milho, diminuindo monotonicamente

até os 139 dias após a semeadura (estádio R₆). Aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂) o teor de N nas plantas de milho foi de 0,04 kg kg⁻¹ e, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) o teor de N foi quatro vezes menor, igual a 0,01 kg kg⁻¹ (Figura 20a).

A absorção total de N ($A = Y.T$) desvia-se um pouco de uma sigmoidal por causa do produto de Y por T , que no caso é uma função de potência (Figura 20b). A absorção é crescente ao longo do desenvolvimento da cultura de milho, aos 70 dias após a semeadura (estádio R₁) a absorção de N foi de 120 kg ha⁻¹. Ao final do ciclo de cultivo, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) a absorção total de N pela cultura de milho foi de 226 kg ha⁻¹.

Com relação, a taxa de absorção ($\lambda = dA/dT$) de N, pelo motivo da absorção não ser uma sigmoidal pura, ela não se apresenta como um sino perfeito, apresentando um valor alto logo no início da curva e um valor, considerado para este estudo, como λ_{max} aos 102 dias após a semeadura (Figura 20c). Aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂), observa-se que a absorção de N pela cultura de milho, foi de 2,66 kg ha⁻¹ dia⁻¹. A absorção do nutriente diminuiu a partir dessa data, provavelmente devido ao período de estiagem, com o início das chuvas a absorção diária de N aumenta, sendo que a maior taxa de absorção de N ocorreu aos 102 dias após a semeadura, nesse dia a taxa de absorção de N pela cultura de milho foi de 2,24 kg ha⁻¹ dia⁻¹. A taxa de absorção de N decresce a partir dos 102 dias após a semeadura (estádio R₅) até o final do ciclo da cultura.

Figura 20 – Teor (T , kg kg⁻¹), absorção (A , kg ha⁻¹) e taxa de absorção (λ , kg ha⁻¹ dia⁻¹) de N (Nitrogênio) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.2 Fósforo

O fósforo (P) teve um comportamento semelhante ao nitrogênio. Seu teor (T) é maior no início do crescimento e desenvolvimento das plantas de milho (Figura 21a). Aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂) o teor de P nas plantas de milho foi de 0,003 kg kg⁻¹ e, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) o teor de P foi de 0,0006 kg kg⁻¹.

A absorção total (A) de P é crescente ao longo do desenvolvimento da cultura de milho, no início da fase reprodutiva, aos 70 dias após a semeadura (estádio R₁) a absorção de P foi de 8,09 kg ha⁻¹ e ao final do ciclo da cultura, aos 127 dias após a semeadura (estádio R₆) a absorção total de P pela cultura de milho foi de 20 kg ha⁻¹ (Figura 21b).

Aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂), a taxa de absorção (λ) de P é alta, no entanto a partir dessa data a mesma decresce continuamente até os 59 dias após a semeadura (Figura 21c). A partir desse período, observam-se valores crescentes, sendo que a maior (considerada para este estudo) taxa de absorção (λ_{max}) de P ocorreu aos 103 dias após a semeadura (estádio R₄), nesse dia a absorção de P pela cultura de milho foi de 0,18 kg ha⁻¹

dia⁻¹. Em seguida, a taxa de absorção de P decresce novamente até os 139 dias após a semeadura.

Figura 21 – Teor (T , kg kg^{-1}), absorção (A , kg ha^{-1}) e taxa de absorção (λ , $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de P (Fósforo) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.3 Potássio

O Potássio (P) também teve um comportamento semelhante ao do nitrogênio, porém com um ajuste pouco pior. Mesmo assim, optamos pelo modelo de potência para o teor (T) de Potássio (K), da mesma forma que para os teores de N e P, o teor de K é maior no início do crescimento e desenvolvimento da cultura de milho, no período entre 14 e 28 dias após a semeadura (estádio V_{4-6}), o teor médio de K nas plantas de milho foi de $0,04 \text{ kg kg}^{-1}$ (Figura 22a). Em seguida, decresce continuamente até os 139 dias após a semeadura, quando foi de $0,01 \text{ kg kg}^{-1}$.

A absorção total (A) de K também aumenta com o crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (Figura 22b). Aos 14 dias após a semeadura a absorção de K foi de $0,98 \text{ kg ha}^{-1}$, no final do estágio vegetativo, aos 56 dias após a semeadura (estádio V_{15}), a absorção foi

de 235 kg ha⁻¹ e, ao final do ciclo, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) a cultura de milho absorveu 278 kg ha⁻¹ de K.

Com relação à taxa de absorção (λ) de K, assim como para N e P, ela é elevada aos 14 dias após a semeadura, decresce até aos 38 dias após a semeadura (estádio V₈) e, em seguida aumenta sucessivamente, atingindo o pico de absorção aos 105 dias após a semeadura (estádio R₄), quando foi de 4,06 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (Figura 22c). A taxa de absorção de K diminuiu continuamente a partir dos 105 dias após a semeadura, mas, mantém-se, até o final do ciclo da cultura.

Figura 22 – Teor (T, kg kg⁻¹), absorção (A, kg ha⁻¹) e taxa de absorção (λ , kg ha⁻¹ dia⁻¹) de K (Potássio) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.4 Cálcio

O teor de Cálcio (Ca) é maior no início do crescimento e desenvolvimento da cultura de milho, aos 14 dias após a semeadura (estádio V₄), o teor de Ca nas plantas de milho foi de 0,0028 kg kg⁻¹. Em seguida, decresce continuamente até os 91 dias após a semeadura (estádio R₃), quando foi de 0,0018 kg kg⁻¹ (Figura 23a).

A absorção total de Ca aumenta com o crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (Figura 23b). Aos 14 dias após a semeadura a absorção de Ca foi de $0,07 \text{ kg ha}^{-1}$ e, ao final do ciclo, aos 139 dias após a semeadura, a cultura de milho absorveu 45 kg ha^{-1} de Ca (Figura 29b).

A taxa de absorção de Ca é crescente ao longo do desenvolvimento da cultura de milho, a taxa de absorção nos primeiros 21 dias após a semeadura (estádio V_4) foi em média de $0,19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, atingindo o pico de taxa de absorção aos 110 dias após a semeadura (estádio R_4), nesse dia a absorção de Ca pela cultura de milho foi de $0,56 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 29c). A taxa de absorção de Ca diminui consecutivamente a partir dos 110 dias após a semeadura, mas, mantém-se, até o final do ciclo da cultura (Figura 23c).

Figura 23 – Teor (T, kg kg^{-1}), absorção (A, kg ha^{-1}) e taxa de absorção (λ , $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de Ca (Cálcio) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.5 Magnésio

O teor de Magnésio (Mg) nas plantas de milho é constante ao longo de seu desenvolvimento, sendo em média de $0,0022 \text{ kg kg}^{-1}$ (Figura 24a). Por esse motivo, escolhemos o modelo $T = k$ para o Mg.

A absorção total de Mg aumenta com o crescimento e desenvolvimento da cultura de milho. Aos 14 dias após a semeadura a absorção de Mg foi de $0,05 \text{ kg ha}^{-1}$ e, ao final do ciclo, aos 139 dias após a semeadura, a cultura de milho absorveu 51 kg ha^{-1} de Mg (Figura 24b).

A taxa de absorção de Mg foi calculada utilizando-se os valores médios do teor do elemento mineral na planta, pois os valores foram constantes. A taxa de absorção é menor no início do ciclo, aos 14 dias após a semeadura (estádio V_2) a absorção de Mg foi de $0,15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, o pico de absorção foi observado aos 112 dias após a semeadura (estádio $R_{4,1}$), a taxa de absorção de Mg pela cultura de milho nesse dia foi de $0,64 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A taxa de absorção de Mg diminui consecutivamente a partir dos 112 dias após a semeadura, mas, mantém-se, até o final do ciclo da cultura (Figura 24c).

Figura 24 – Teor (T, kg kg^{-1}), absorção (A, kg ha^{-1}) e taxa de absorção (λ , $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de Mg (Magnésio) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.6 Enxofre

O teor de Enxofre (S), de forma semelhante ao N, P e K é maior no início do crescimento e desenvolvimento das plantas de milho, diminuindo em forma de potência negativa até o final do ciclo (Figura 25a). Aos 14 dias após a semeadura (estádio V_2) o teor de

S nas plantas de milho foi de $0,0024 \text{ kg kg}^{-1}$ e, aos 139 dias após a semeadura (estádio R_6) o teor de S foi de $0,0007 \text{ kg kg}^{-1}$.

A absorção total de S é crescente ao longo do desenvolvimento da cultura de milho, no início do ciclo de cultivo, aos 14 dias após a semeadura (estádio V_2) a absorção de S foi de $0,06 \text{ kg ha}^{-1}$. Aos 70 dias após a semeadura (estádio R_1) a absorção de N foi de $7,9 \text{ kg ha}^{-1}$. E ao final do ciclo, aos 139 dias após a semeadura (estádio R_6) a absorção total de S pela cultura de milho foi de 16 kg ha^{-1} (Figura 25b).

Com relação, à taxa de absorção de S, inicialmente foi alta, aos 14 dias após a semeadura (estádio V_2), observa-se que a taxa de absorção de S pela cultura de milho foi de $0,16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A taxa de absorção do nutriente diminuiu a partir desse período, mas valores crescentes são observados a partir dos 50 dias após a semeadura (estádio V_{12}), a maior taxa de absorção de S ocorreu aos 104 dias após a semeadura (estádio R_4), sendo de $0,17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A taxa de absorção de S decresce a partir dos 104 dias após a semeadura, mas permanece mesmo em taxas menores, até o final do ciclo da cultura (Figura 25c).

Figura 25 – Teor (T , kg kg^{-1}), absorção (A , kg ha^{-1}) e taxa de absorção (λ , $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de S (Enxofre) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.7 Boro

O teor de Boro (B) aos 14 dias após a semeadura (estádio V_2) apresentou-se muito elevado, destoando das medidas subsequentes. Por isso foi considerado um *out layer* e retirado do processo de ajuste do modelo. Aos 21 dias após a semeadura (estádio V_4) seu teor ainda foi alto, mas admitiu-se, nesse caso, que o procedimento de determinação do B foi coerente para todos os órgãos. A partir dos 27 dias após a semeadura (estádio V_{10}) o teor de B diminui até o final do ciclo da cultura, aos 139 dias após a semeadura (estádio R_6) (Figura 36a).

A absorção total de B aumenta com o crescimento e desenvolvimento da cultura de milho. Ao final do ciclo, aos 139 dias após a semeadura, a cultura de milho absorveu $0,28 \text{ kg ha}^{-1}$ de B (Figura 26b).

A taxa de absorção de B foi calculada utilizando-se os valores médios do teor do elemento mineral na planta, pois o modelo utilizado nesse estudo não se ajustou aos valores de B. A absorção diária de B inicialmente é menor, o pico de absorção foi observado aos 112 dias após a semeadura (estádio $R_{4,1}$), a absorção de B pela cultura de milho nesse dia foi de $0,006 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A taxa de absorção de B diminui a partir dos 112 dias após a semeadura, mas, mantém-se, até o final do ciclo da cultura (Figura 26c).

Figura 26 – Teor (T, kg kg⁻¹), absorçã (A, kg ha⁻¹) e taxa de absorçã (λ, kg ha⁻¹ dia⁻¹) de B (Boro) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.8 Cobre

O teor de Cobre (Cu), da mesma forma que o teor de B, é maior no início do desenvolvimento das plantas de milho. A partir dos 27 dias após a semeadura (estádio V₁₀) o teor de Cu diminui até o final do ciclo da cultura, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) (Figura 27a).

A absorçã total de Cu aumenta com o crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (Figura 27b). Ao final do ciclo, aos 139 dias após a semeadura, a cultura de milho absorveu 0,21 kg ha⁻¹ de Cu.

Com relação à taxa de absorçã de Cu, inicialmente ela é menor, aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂) a taxa de absorçã de Cu foi de 0,0009 kg ha⁻¹ dia⁻¹, o pico de taxa de absorçã foi observado aos 109 dias após a semeadura (estádio R₄), sendo de 0,002 kg ha⁻¹ dia⁻¹. A taxa de absorçã de Cu diminui a partir dos 109 dias após a semeadura, mas, mantém-se, até o final do ciclo da cultura (Figura 27c).

Figura 27 – Teor (T, kg kg⁻¹), absorçã (A, kg ha⁻¹) e taxa de absorçã (λ, kg ha⁻¹ dia⁻¹) de Cu (Cobre) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.9 Ferro

O teor de Ferro (Fe) também é alto no início do desenvolvimento das plantas de milho, posteriormente decresce (Figura 28a). Aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂) o teor de Fe nas plantas de milho foi de 0,0016 kg kg⁻¹ e, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) o teor de Fe foi de 0,00008 kg kg⁻¹, isso é, aproximadamente 20 vezes menor.

A absorçã total de Fe aumenta com o crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (Figura 28b). Aos 118 dias após a semeadura, observa-se a maior taxa de absorçã de Fe pela cultura de milho, 4,25 kg ha⁻¹ dia⁻¹.

A taxa de absorçã de Fe, da mesma forma que para o B, foi calculada utilizando-se os valores médios do teor do elemento mineral na planta, pois o modelo utilizado nesse estudo não se ajustou aos valores de Fe. A taxa de absorçã de Fe inicialmente é menor, o pico de taxa de absorçã foi observado aos 112 dias após a semeadura (estádio R_{4,1}), sendo de 0,09 kg ha⁻¹ dia⁻¹. A taxa de absorçã de Fe diminui a partir dos 112 dias após a semeadura, mas, mantém-se, até o final do ciclo da cultura (Figura 28c).

Figura 28 – Teor (T, kg kg⁻¹), absorçã (A, kg ha⁻¹) e taxa de absorçã (λ, kg ha⁻¹ dia⁻¹) de Fe (Ferro) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.10 Manganês

O teor de Manganês (Mn) nas plantas de milho é constante ao longo de seu desenvolvimento, sendo em média de 0,00004 kg kg⁻¹ (Figura 29a). Por esse motivo, escolhemos o modelo $T = k$ para o Mn.

A absorçã total de Mn aumenta com o crescimento e desenvolvimento da cultura de milho (Figura 29b). Ao final do ciclo, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆), a cultura de milho absorveu 0,94 kg ha⁻¹ de Mg.

A taxa de absorçã de Mn foi calculada utilizando-se os valores médios do teor do elemento mineral na planta, pois os valores de teor foram constantes. A taxa de absorçã é menor no início do ciclo, aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂) igual a 0,0028 kg ha⁻¹ dia⁻¹, o pico de taxa de absorçã foi observado aos 112 dias após a semeadura (estádio R_{4,1}), correspondente a 0,012 kg ha⁻¹ dia⁻¹. A partir dos 112 dias após a semeadura, a taxa de absorçã de Mn diminui, mas mantém-se, até o final do ciclo da cultura (Figura 29c).

Figura 29 – Teor (T, kg kg⁻¹), absorçã (A, kg ha⁻¹) e taxa de absorçã (λ, kg ha⁻¹ dia⁻¹) de Mn (Manganês) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

4.8.11 Zinco

O teor de Zinco (Zn) é maior no início do crescimento e desenvolvimento das plantas de milho, de forma semelhante aos demais nutrientes diminui até o final do ciclo da cultura, aos 139 dias após a semeadura (estádio R₆) (Figura 30a).

A absorçã total de Zn é crescente ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho, aos 127 dias após a semeadura (estádio R_{5,1}) observa-se a maior absorçã de Zn pela cultura, que foi de 0,5 kg ha⁻¹ (Figura 30b).

Com relação, a taxa de absorçã de Zn, inicialmente a mesma é menor, aos 14 dias após a semeadura (estádio V₂), observa-se que a absorçã de Zn pela cultura de milho foi de 0,003 kg ha⁻¹ dia⁻¹. A maior taxa de absorçã do nutriente ocorreu aos 107 dias após a semeadura (estádio R₄), igual a 0,005 kg ha⁻¹ dia⁻¹. A taxa de absorçã de Zn decresce a partir dos 107 dias após a semeadura, mas permanece mesmo em taxas menores, até o final do ciclo da cultura (Figura 30c).

Figura 30 – Teor (T , kg kg^{-1}), absorção (A , kg ha^{-1}) e taxa de absorção (λ , $\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de Zn (Zinco) em plantas de milho (média ponderada de todos os órgãos) em relação aos dias após a semeadura (DAS)

Os valores referentes ao teor dos nutrientes, a absorção total de nutrientes e a taxa de absorção de cada nutriente, cálculos por meio dos modelos estão dispostos nas Tabelas 7 a 9. A produtividade da cultura de milho foi em média de 8000 kg ha^{-1} .

Tabela 7 – Valores médios ponderados pela massa de matéria seca dos órgãos, referentes ao teor total de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg), Enxofre (S), B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) em plantas de milho em relação aos dias após a semeadura (DAS)

DAS	Fenologia	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Teor (T, kg kg ⁻¹)												
14	V ₂	0,0457	0,0034	0,0510	0,0029	0,0023	0,0026	-	0,000013	0,001693	0,000052	0,000042
21	V ₄	0,0348	0,0027	0,0418	0,0028	0,0022	0,0021	0,000065	0,000012	0,000888	0,000049	0,000036
28	V ₆	0,0288	0,0022	0,0363	0,0026	0,0022	0,0018	0,000043	0,000011	0,000562	0,000048	0,000033
42	V ₁₀	0,0219	0,0017	0,0298	0,0025	0,0022	0,0014	0,000024	0,000010	0,000295	0,000045	0,000028
50	V ₁₂	0,0195	0,0015	0,0274	0,0024	0,0022	0,0013	0,000019	0,000010	0,000224	0,000044	0,000026
56	V ₁₅	0,0181	0,0014	0,0259	0,0024	0,0022	0,0012	0,000016	0,000010	0,000187	0,000044	0,000025
70	R ₁	0,0156	0,0012	0,0232	0,0023	0,0022	0,0011	0,000012	0,000009	0,000131	0,000043	0,000023
77	R ₂	0,0146	0,0011	0,0222	0,0022	0,0022	0,0010	0,000010	0,000009	0,000113	0,000042	0,000022
84	R _{2,1}	0,0138	0,0011	0,0213	0,0022	0,0022	0,0010	0,000009	0,000009	0,000098	0,000042	0,000022
91	R ₃	0,0131	0,0010	0,0204	0,0022	0,0022	0,0009	0,000008	0,000009	0,000086	0,000041	0,000021
104	R ₄	0,0120	0,0009	0,0191	0,0021	0,0022	0,0009	0,000007	0,000008	0,000070	0,000041	0,000020
111	R _{4,1}	0,0115	0,0009	0,0185	0,0021	0,0022	0,0008	0,000006	0,000008	0,000063	0,000040	0,000020
118	R ₅	0,0110	0,0009	0,0180	0,0021	0,0022	0,0008	0,000006	0,000008	0,000057	0,000040	0,000019
127	R _{5,1}	0,0105	0,0008	0,0174	0,0021	0,0022	0,0008	0,000005	0,000008	0,000051	0,000040	0,000019
139	R ₆	0,0099	0,0008	0,0166	0,0020	0,0022	0,0007	0,000004	0,000008	0,000044	0,000039	0,000018

Tabela 8 – Valores médios ponderados pela massa de matéria seca dos órgãos, referentes a absorção total de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg), Enxofre (S), B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Mangânês) e Zinco (Zn) em plantas de milho em relação aos dias após a semeadura (DAS)

DAS	Fenologia	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Absorção (A, kg ha ⁻¹)												
14	V ₂	11,48	0,87	12,82	0,74	0,57	0,65	-	0,003	0,43	0,01	0,01
21	V ₄	26,88	2,05	32,28	2,13	1,73	1,60	0,05	0,01	0,69	0,04	0,03
28	V ₆	38,97	2,99	49,26	3,57	3,03	2,40	0,06	0,02	0,76	0,06	0,04
42	V ₁₀	60,31	4,67	81,97	6,79	6,11	3,88	0,07	0,03	0,81	0,12	0,08
50	V ₁₂	72,43	5,63	101,56	8,90	8,22	4,75	0,07	0,04	0,83	0,17	0,10
56	V ₁₅	81,85	6,38	117,12	10,66	10,00	5,44	0,07	0,04	0,84	0,20	0,11
70	R ₁	105,67	8,28	157,35	15,41	14,94	7,19	0,08	0,06	0,89	0,29	0,16
77	R ₂	118,77	9,32	179,89	18,18	17,87	8,17	0,08	0,07	0,91	0,34	0,18
84	R _{2,1}	132,72	10,44	204,18	21,23	21,14	9,22	0,09	0,08	0,94	0,40	0,21
91	R ₃	147,47	11,62	230,14	24,57	24,75	10,33	0,09	0,10	0,97	0,47	0,24
104	R ₄	176,27	13,93	281,74	31,43	32,29	12,53	0,10	0,12	1,03	0,60	0,30
111	R _{4,1}	191,74	15,18	310,06	35,34	36,65	13,73	0,10	0,14	1,05	0,68	0,33
118	R ₅	206,28	16,35	337,23	39,22	41,04	14,87	0,11	0,15	1,07	0,75	0,36
127	R _{5,1}	221,98	17,63	367,70	43,81	46,33	16,13	0,11	0,17	1,08	0,84	0,40
139	R ₆	233,73	18,60	393,46	48,29	51,75	17,15	0,11	0,18	1,04	0,93	0,43

Tabela 9 – Valores médios ponderados pela massa de matéria seca dos órgãos, referentes a taxa de absorção de N (Nitrogênio), P (Fósforo), K (Potássio), Ca (Cálcio), Magnésio (Mg), Enxofre (S), B (Boro), Cu (Cobre), Fe (Ferro), Mn (Manganês) e Zinco (Zn) em plantas de milho em relação aos dias após a semeadura (DAS)

DAS	Fenologia	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Taxa de absorção (λ , kg ha ⁻¹ dia ⁻¹)												
14	V ₂	2,66	0,20	3,13	0,20	0,15	0,16	0,001	0,0009	0,02	0,003	0,003
21	V ₄	1,89	0,15	2,54	0,20	0,17	0,12	0,002	0,0008	0,02	0,003	0,002
28	V ₆	1,61	0,13	2,35	0,21	0,19	0,11	0,002	0,0009	0,03	0,004	0,002
42	V ₁₀	1,50	0,12	2,38	0,25	0,25	0,11	0,002	0,0010	0,03	0,004	0,002
50	V ₁₂	1,54	0,12	2,52	0,28	0,28	0,11	0,003	0,0011	0,04	0,005	0,003
56	V ₁₅	1,60	0,13	2,67	0,31	0,31	0,12	0,003	0,0012	0,04	0,006	0,003
70	R ₁	1,81	0,14	3,10	0,38	0,40	0,13	0,004	0,0014	0,05	0,007	0,003
77	R ₂	1,93	0,15	3,34	0,42	0,44	0,14	0,004	0,0016	0,06	0,008	0,004
84	R _{2,1}	2,05	0,16	3,59	0,46	0,49	0,15	0,004	0,0017	0,07	0,009	0,004
91	R ₃	2,16	0,17	3,82	0,50	0,54	0,16	0,005	0,0019	0,07	0,010	0,004
104	R ₄	2,24	0,18	4,06	0,55	0,62	0,17	0,006	0,0020	0,08	0,011	0,005
111	R _{4,1}	2,16	0,17	4,00	0,56	0,62	0,17	0,006	0,0021	0,09	0,012	0,005
118	R ₅	1,97	0,16	3,72	0,54	0,64	0,16	0,006	0,0020	0,09	0,011	0,004
127	R _{5,1}	1,48	0,12	2,96	0,47	0,63	0,12	0,005	0,0017	0,08	0,010	0,004
139	R ₆	0,41	0,04	1,20	0,26	0,55	0,04	0,003	0,0009	0,05	0,006	0,002

A concentração crítica (Cc) de cada nutriente na seiva elaborada (assumida como equivalente a solução do solo) foi calculada por meio da Equação 6 proposta nessa pesquisa e, os valores referentes a Cc de cada nutrientes estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 – Cálculo (Equação 6) da concentração crítica (Cc) de cada nutriente na seiva bruta da planta no dia da máxima absorção ($\lambda_{\max}$)

Nutriente	DAS	Fenologia	T	A	$\lambda_{\max}$	ETr*	M	Cc
			kg kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	mm dia ⁻¹	g mol ⁻¹	g L ⁻¹
N	102	R ₃	0,0121	171,79	2,24	1,8	14	0,1244
P	103	R ₃	0,0010	13,75	0,18	1,7	31	0,0106
K	105	R ₄	0,0191	285,80	4,06	1,7	39	0,2388
Ca	110	R ₄	0,0021	34,78	0,56	1,4	40	0,0400
Mg	112	R ₄	0,0022	37,28	0,64	1,2	24	0,0533
S	104	R ₄	0,0009	12,53	0,17	1,7	32	0,0100
B	112	R ₄	0,000006	0,10	0,006	1,2	11	0,0005
Cu	109	R ₄	0,000008	0,13	0,002	1,5	64	0,0001
Fe	112	R ₄	0,000062	1,05	0,087	1,2	56	0,0073
Mn	112	R ₄	0,000040	0,69	0,012	1,2	55	0,0010
Zn	107	R ₄	0,000020	0,31	0,005	1,5	65	0,0003

*ETr - média de cinco dias: do DAS correspondente a $\lambda_{\max}$ e de dois antes e dois depois do DAS.

As absorções máximas dos nutrientes estudados ocorrem entre 102 e 112 dias após a semeadura (Tabela 10), isto é, durante os estádios R₃ (cultura com 50% das plantas apresentando grãos pastosos) e R₄ (cultura está com 50% das plantas apresentando grãos farináceos). Esses estágios são, portanto os mais importantes com respeito às necessidades nutricionais da cultura de milho. Nesses estádios o acúmulo de amido nos grãos de milho aumenta caracterizando um período destinado ao enchimento de grãos, resultado em maior massa de matéria seca do grão (ABENDROTH et al., 2011; EDWARDS, 2009).

Experimentos conduzidos em campo com o objetivo de avaliar a absorção de nutrientes pela cultura de milho, também relatam que a maior absorção dos nutrientes N, P, K e S foram no estágio R₃, momento em que a cultura está com 50% das plantas apresentando grãos pastosos (CIAMPITTI et al., 2013; CIAMPITTI, 2012).

Os valores de ETr nos dias correspondentes a $\lambda_{\max}$ são relativamente pequenos pelo fato de se tratar de época de inverno em Piracicaba, SP e também devido à nebulosidade. As

estimativas da concentração crítica na seiva bruta da planta foram máximas para o potássio, seguida pelo nitrogênio (Tabela 10).

5 CONCLUSÕES

Em função da metodologia proposta, conclui-se que:

I. A curva de acúmulo de massa de matéria seca total pode ser caracterizada através da seguinte equação:

$$Y = \left[a + \frac{b}{1 + \left[\frac{(t-c)}{d} \right]^2} \right]$$

em que Y é a variável dependente, que é a massa de matéria seca da planta (kg ha^{-1}) e, t (dias - dias após a semeadura, DAS) é a variável independente. Nesse caso, t é o tempo que abrange todo o ciclo da cultura a partir da semeadura. E a , b , c , e d são parâmetros empíricos de ajuste, calculados com os dados experimentais minimizando a soma do quadrado dos desvios.

II. Inicialmente, a maior porcentagem de massa de matéria seca é atribuída às folhas, aos 70 dias após a semeadura (estádio R_1) a maior porcentagem de massa de matéria seca é do colmo, que nessa fase é o principal órgão de reserva da planta de milho. A partir do estágio reprodutivo, a maior massa de matéria seca é conferida as estruturas reprodutivas, pois após o florescimento há intensa demanda de carboidratos e nutrientes para o enchimento de grãos.

III. Correlações positivas entre N e S são observadas na folha e em toda a planta de milho, e ao contrário correlações negativas são observadas na folha entre os nutrientes K, Ca e Mg.

IV. O teor T de todos os nutrientes seguiu um modelo de potência, com valores maiores para os estádios iniciais de desenvolvimento, tendo os nutrientes Mg e Mn valores constantes.

V. A taxa máxima de absorção dos nutrientes ocorreu nos estádio fenológicos R_3 e, principalmente R_4 , isto é, de 102 a 112 dias após a semeadura. A taxa máxima de crescimento foi observada aos 112 dias após a semeadura (estádio R_4).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na análise dos resultados obtidos nessa pesquisa, sugere-se que os próximos estudos sejam conduzidos em mais de uma estação de cultivo, com repetições de vários anos ou mesmo em épocas diferentes. Os experimentos seguintes poderão abranger genótipos diferentes, bem como regiões distintas, variar a população de plantas na área experimental, além de simular cultivos de alta, média e baixa tecnologia. Sugere-se também, outros experimentos que comparem as metodologias de cálculos de adubação discutidas nessa pesquisa.

Recomenda-se ainda, utilizar o desenvolvimento relativo como uma variável independente ao invés de dias após a semeadura ou estágio fenológico.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVAREZ V., V.H. Correlação e calibração de métodos de análises de solo. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F.; FONTES, M.P.F. (Ed.). **O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência d Solo, 1996. p. 615-646.
- ARNOLD, C.Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 74, n. 1, p. 430-445, 1959.
- BENDER, R.R.; HAEGELE, J.W.; RUFFO, M.L.; BELOW, F.E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 1, p. 161-170, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio: Brasil 2013/14 a 2023/24**. Brasília, 2014. 122 p.
- BRAY, R.H. Correlation of soil tests whit crop response to added fertilizers and with fertilizer requirement. In: KITCHEN, H.B. (Ed.). **Diagnostic techniques for soils and crops**. Washington: The American Potash Institute, 1948. p. 53-86.
- CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F.; MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F. Avaliação da fertilidade do solo e recomendação de fertilizantes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 13, p. 769-850.
- CARLONE, M.R.; RUSSELL, W.A. Response to plant densities and nitrogen levels for four maize cultivars from different eras of breeding. **Crop Science**, Madison, v. 27, p. 465-470, 1987.
- CASTLEBERRY, R.M.; CRUM, C.W.; CRULL, C.F. Genetic yield improvement of U.S. maize cultivars under varying fertility and climatic environments. **Crop Science**, Madison, v. 24, n. 1, p. 33-36, 1984.
- CATE, R.B.; NELSON, L.A. **A rapid method for correlation of soil test analysis with plant response data**. Raleigh: North Carolina State University, 1965. 24 p. (Technical Bulletin, 1).
- CIAMPITTI, I.A.; VYN, T.J. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 121, p. 2-18, 2011.
- _____. Grain nitrogen source changes over time in maize: a review. **Crop Science**, Madison, v. 53, p. 366-377, 2013.

CIAMPITTI, I.A.; CAMBERATO, J.J.; MURRELL, S.T.; VYN, T.J. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. Macronutrients. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, n. 3, p. 783-795, 2013.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**. Brasília, 2013. 27 p. (7º levantamento).

_____. **Séries históricas**: de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 1976/77 a 2014/15 de grãos, 2001 a 2014 de café, 2005/06 a 2014/15 de cana-de-açúcar. 2015a. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&>>. Acesso em: 25 out. 2015.

_____. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**. Brasília, 2015b. 134 p. (12º levantamento).

COREY, R.B. Soil test procedures: correlation. In: BROWN, J.R. (Ed.). **Soil testing: Sampling, correlation, calibration, and interpretation**. Madison: Soil Science Society of America, 1987. p. 15-22. (SSSA. Special Publication, 21).

DING, L.; WANG, K.J.; JIANG, G.M.; BISWAS, D.K.; XU, H.; LI, L.F. Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. **Annals of Botany**, London, v. 96, p. 925–930, 2005.

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D.A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; FRIZZONE, J.A.; BACCHI, O.O.S. Principles of crop modeling and simulation: I. uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 46-50, 1998.

DUVICK, D.N.; CASSMAN, K.G. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the north-central United States. **Crop Science**, Madison, v. 39, p. 1622-1630, 1999.

DWYER, L.; TOLLENAAR, M.; STEWART, D.W. Changes in plant density dependence of leaf photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) hybrids, 1959 to 1988. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 71, n. 1, p. 1-11, 1991.

ECHARTE, L.; ROTHSTEIN, S.; TOLLENAAR, M. The response of leaf photosynthesis and dry matter accumulation to nitrogen supply in an older and a newer maize hybrid. **Crop Science**, Madison, v. 48, p. 656-665, 2008.

ECHARTE, L.; LUQUE, S.; ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.O.; CIRILO, A.; OTEGUI, M.E.; VEGA, C.R.C. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 68, p. 1-8, 2000.

EDWARDS, J. **Maize growth and development**. Orange: NSW Department of Primary Industries, 2009. 60 p.

EMBRAPA. **Nutrição e adubação do milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2006. (Circular Técnica, 78)

_____. **Cultivo do Milho**. Sete Lagoas: EMBRAPA Milho e Sorgo, 2012. (Sistemas de Produção, 1).

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360 p.

FASOULA, D.A.; FASOULA, V.A. Competitive ability and plant breeding. **Plant Breeding Reviews**, Westport, v. 14, p. 89-138, 1997.

HAEGELE, J.W.; COOK, K.A.; NICHOLS, D.M.; BELOW, F.E. Changes in nitrogen use traits associated with genetic improvement for grain yield of maize hybrids released in different decades. **Crop Science**, Madison, v. 53, p. 1256-1268, 2013.

HEIFFIG, L.C. **Plasticidade da cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill) em diferentes arranjos espaciais**. 2002. 85 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

HAMMER, G.L.; DONG, Z.S.; MCLEAN, G.; DOHERTY, A.; MESSINA, C.; SCHUSSLER, J. ZINSELMEIER, C.; PASZKIEWICZ, S.; COOPER, M. Can changes in canopy and/or root system architecture explain historical maize yield trends in the U.S. Corn Belt? **Crop Science**, Madison, v. 49, p. 299-312, 2009.

KAMPRATH, E.J.; MOLL, R.H.; RODRIGUEZ, N. Effects of nitrogen fertilization and recurrent selection on performance of hybrids populations of corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 6, p. 955-958, 1982.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. Fertilidade do solo e produtividade agrícola. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. cap. 1, p. 1-64.

LUQUE, S.F.; CIRILO, A.G.; OTEGUI, M.E. Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 95, p. 383-397, 2006.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3rd ed. New York: Academic Press, 2011. 672 p.

OLIVEIRA, E.L. **Sugestões de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 2003. 31 p. (Circular, 128).

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B. Desenvolvimento de um sistema para recomendação de adubação para a cultura da bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 131-143, 2005.

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, Instituto Agrônomo; Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1996. 20 p. (Special Report, 48).

SANGOI, L.; ENDER, M.; GUIDOLIN, A.F.; ALMEIDA, M.L.; KONFLANZ, V.A. Nitrogen fertilization impact agronomic traits of maize hybrids released at different decades. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 5, p. 757-764, 2001.

SANTOS, F.C.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SEDIYAMA, C.S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1661-1674, 2008.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT: statistical analysis system user's guide; version 9.1**. Carry, 2003.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R. A maior estiagem do século? **Notícias Piracema**, Piracicaba, v. 6, n. 50, p. 1, 2000.

SILVA, F.C. **Manual de análise química de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Núcleo regional sul. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. ed. Porto Alegre, 2004. 400 p.

SYSTAT SOFTWARE. **Table curve 2D: automated curve fitting and equation discovery**. Chicago: SPSS Science, 2000.

STEWART, W.M.; DIBB, D.W.; JOHNSTON, A.E.; SMYTH, T.J. The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1-6, 2005.

THOMAS, H.; HOWARTH, C.J. Five ways to stay green. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 51, p. 329-337, 2000.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p. (Publications in Climatology).

TOKATLIDIS, I.S.; KOUTROUBAS, S.D. A review study of the maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications on crop yield stability. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 88, p. 103-114, 2004.

TOLLENAAR, M. Physiological basis of genetic improvement of maize hybrids in Ontario from 1959 to 1988. **Crop Science**, Madison, v. 31, p. 119-124, 1991.

VON PINHO, R.G.; BORGES, I.D.; PEREIRA, J.L.A.R.; REIS, M.C. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 8, n. 2, p. 157-173, 2009.