



Universidade Federal do Maranhão  
Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal

**DESEMPENHO PRODUTIVO DO MILHO EM FUNÇÃO DOS  
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, TENDO EM VISTA A  
INTENSIFICAÇÃO ECOLÓGICA**

CLEMESON CARDOSO VALE

Chapadinha  
2014

CLEMESON CARDOSO VALE

**DESEMPENHO PRODUTIVO DO MILHO EM FUNÇÃO DOS  
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, TENDO EM VISTA A  
INTENSIFICAÇÃO ECOLÓGICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência Animal da Universidade Federal do Maranhão, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência Animal.

Orientadora: Dr<sup>a</sup>. Alana das Chagas Ferreira Aguiar

Chapadinha  
2014

Vale, Clemeson Cardoso

Desempenho produtivo do milho em função dos atributos químicos do solo, tendo em vista a intensificação ecológica / Clemeson Cardoso Vale. – Chapadinha, 2014.

51f.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Alana das Chagas Ferreira Aguiar

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Maranhão, Curso Pós-Graduação em Ciência Animal, 2014.

1. Semivariogramas 2. Ciclagem de nutrientes 3. Fertilidade do solo  
I.Título

CDU 631.45

CLEMESON CARDOSO VALE

**DESEMPENHO PRODUTIVO DO MILHO EM FUNÇÃO DOS  
ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, TENDO EM VISTA A  
INTENSIFICAÇÃO ECOLÓGICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Ciência Animal da Universidade Federal do Maranhão,  
como requisito para obtenção do título de Mestre em  
Ciência Animal.

Aprovada em 31 / 03 / 2014

BANCA EXAMINADORA

*Alana das Chagas Ferreira Aguiar*

Prof. Dr<sup>a</sup>. Alana das Chagas Ferreira Aguiar  
Universidade Federal do Maranhão  
(Orientadora)

*Antonio Clementino dos Santos*

Prof. Dr. Antonio Clementino dos Santos  
Universidade Federal do Tocantins

*Emanoel Gomes de Moura*

Prof. Dr. Emanoel Gomes de Moura  
Universidade Estadual do Maranhão

Aos meus pais, Cosmo Vale e Maria José Cardoso Vale e  
a todos os que acreditaram em mim.

## AGRADECIMENTOS

A Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Alana das Chagas Ferreira Aguiar, pela orientação, pelos anos de convivência e amizade.

À Banca Examinadora, por disponibilizar do seu tempo e conhecimento a fim de contribuir para melhoria desse trabalho.

Aos meus pais Cosmo Vale e Maria José Cardoso Vale que diante de todas as adversidades jamais recuaram, ensinando-me que é preciso lutar sempre com força, garra e determinação.

Aos meus irmãos Marceliano Cardoso Vale, Wilson Arlen Cardoso Vale e Deuseli Silva e Silva pelo carinho e apoio constante nas horas difíceis.

Aos meus avôs paternos Mêrces Ribamar Silva e Joaquina Moraes Silva e (*In memoriam*) de Maria Senhorinha Cardoso Cunha e Januário Sousa Cunha que com grande saudade agradeço imensamente pelos seus ensinamentos.

A minha amiga e companheira Antonia de Lima que em todos os momentos esteve ao meu lado me dando força e carinho.

A todos os membros que compõe o Grupo de Pesquisa ECONOUS meu muito obrigado, pelo apoio e pelo auxílio ao longo desses anos.

Aos amigos de pós-graduação que fizeram parte dessa caminhada, em especial a Ivan Cassimiro Lino e Vinicius Macedo pela amizade, companheirismo e dedicação para que este trabalho fosse concretizado.

Ao amigo João Reis pela amizade e pelas análises químicas. Aos amigos Jozael pela força e Dionísio pela a amizade e realização dos trabalhos de campo.

À Universidade Estadual do Maranhão pela concessão das análises laboratoriais da pesquisa.

Ao Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (UFMA), que por meio do Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, me acolheu e forneceu todo suporte científico e intelectual para realização desse trabalho

À Capes, pela concessão do recurso financeiro que possibilitou a realização do presente trabalho.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. ....</b>	<b>14</b>
2.1 Agroecossistemas. ....	14
2.2 Sistema de cultivo em aléias.....	15
2.3 Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo.....	16
2.4 Agricultura de precisão.....	18
2.5 Intensificação ecológica da agricultura. ....	19
<b>3. OBJETIVO.....</b>	<b>20</b>
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS. ....</b>	<b>21</b>
4.1 Localização da área experimental, clima e solo. ....	21
4.2 Descrição espacial do experimento.....	21
4.3 Condução do experimento. ....	22
4.4 Avaliação dos atributos químicos do solo e rendimento produtivo do milho. ....	23
4.5 Análise geoestatística.....	24
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>25</b>
5.1 Estatística descritiva. ....	25
5.2 Análise espacial dos atributos químicos do solo e rendimento produtivo do milho. ..	28
5.3 Análise de correlação entre a fertilidade e rendimento produtivo do milho.....	41
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>42</b>
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . ....	43
APÊNDICE . ....	50
Apêndice 1 . ....	51

**LISTA DE TABELAS**

- Tabela 1.** Estatística descritiva dos atributos pH ( $\text{CaCl}_2$ ), fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), potássio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), cálcio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), magnésio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), acidez potencial ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), alumínio trocável ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), soma de bases ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), capacidade de troca de cátions ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), saturação por base (%) e rendimento produtivo do milho num Latossolo Amarelo distrocoeso.....27
- Tabela 2.** Análise geoestatística dos atributos pH ( $\text{CaCl}_2$ ), fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), potássio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), cálcio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), magnésio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), acidez potencial ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), alumínio trocável ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), soma de bases ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), capacidade de troca de cátions ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), saturação por base (%) e rendimento produtivo do milho num Latossolo Amarelo distrocoeso.....29
- Tabela 3.** Matriz de correlação ( $r$ ) entre os atributos químicos do solo num Latossolo Amarelo distrocoeso e rendimento produtivo do milho.....41

**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Mapa com os pontos amostrais e disposição espacial da área experimental. ....	22
<b>Figura 2.</b> Mapas de isolinhas dos valores de pH ( $\text{CaCl}_2$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	31
<b>Figura 3.</b> Mapas de isolinhas dos valores de fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	32
<b>Figura 4.</b> Mapas de isolinhas dos valores de potássio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	33
<b>Figura 5.</b> Mapas de isolinhas dos valores de cálcio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	34
<b>Figura 6.</b> Mapas de isolinhas dos valores de magnésio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	34
<b>Figura 7.</b> Mapas de isolinhas dos valores de acidez potencial ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	35
<b>Figura 8.</b> Mapas de isolinhas dos valores de alumínio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	36
<b>Figura 9.</b> Mapas de isolinhas dos valores de soma de bases ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	37
<b>Figura 10.</b> Mapas de isolinhas dos valores de capacidade de troca catiônica ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	38
<b>Figura 11.</b> Mapas de isolinhas dos valores de saturação por bases (%) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	39
<b>Figura 12.</b> Mapas de isolinhas do rendimento produtivo do milho (a) produtividade, (b) número de espiga/planta, (c) peso de 100 grãos, (d) número de grãos/espiga num Latossolo Amarelo distrocoeso. ....	40

## RESUMO

As constantes preocupações com o uso insustentável dos recursos naturais, juntamente com o acelerado crescimento demográfico, direcionam os sistemas produtivos ao processo de maximização dos recursos a fim de proporcionar maiores incrementos nos rendimentos produtivos com minimização dos impactos ao ambiente. O objetivo da presente pesquisa foi avaliar o desempenho produtivo do milho em sistema de plantio direto na palha de leguminosas em função da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e do aporte de nutrientes num Latossolo Amarelo distrocoeso. O experimento foi conduzido numa área de 0,6 ha contendo dois ambientes (sem leguminosas e com leguminosas) e 170 pontos amostrais regularmente dispersos (7,0 x 5,0 m) para determinação da variabilidade química do solo e dos rendimentos produtivos do milho. Os dados foram inicialmente analisados por meio da estatística descritiva e posteriormente por métodos geoestatísticos. A interação entre os atributos químicos do solo e o rendimento produtivo do milho foi verificada pela correlação de Pearson a 5%. Verificou-se a elevação nos teores dos atributos químicos do solo na área com leguminosas quando comparado com a área sem leguminosas, comprovando a aplicabilidade desse sistema de manejo para a melhoria da qualidade química do solo em consequência da adição continuada de resíduos vegetais. Constatou-se a presença de variabilidade espacial para todos os atributos químicos do solo e rendimento produtivo, com grau de dependência espacial que variaram de moderado a forte, o que possibilitou revelar por meio de mapas temáticos as potencialidades e limitações do sistema de produção. O rendimento produtivo, especificamente a produtividade, apresentou correlação positiva com o cálcio, a soma de bases, o fósforo, o potássio, a saturação por bases e a capacidade de troca catiônica.

Palavras-chave: semivariogramas, ciclagem de nutrientes, fertilidade do solo.

## ABSTRACT

The constant concerns over the unsustainable use of natural resources, coupled with rapid population growth, direct them to the productive process of maximizing resources systems to provide greater increases in production to minimize impacts to the environment yields. The objective of this research was to evaluate the performance of maize in no-tillage in legume straw depending on the spatial variability of soil chemical properties and nutrient input in a Dystrophic cohesive oxisol. The experiment was conducted in a 0.6 ha area containing two environments (without legumes and pulses) and 170 sampling points regularly dispersed (7.0 x 5.0 m) for chemical soil variability and productive maize yields. Data were initially analyzed using descriptive statistics and later by geostatistical methods. The interaction between soil chemical properties and yield of corn production was assessed by Pearson correlation to 5%. There was an increase in levels of soil chemical properties in the area with legumes compared to the area without legumes, proving the applicability of this management system to improve the chemical quality of the soil due to continuous addition of plant residues. Found the presence of spatial variability for all soil chemical properties and productive yield with spatial dependence ranged from moderate to strong, allowing reveal through thematic maps the potentialities and limitations of the production system. The productive efficiency, productivity specifically, correlated positively with calcium, sum of bases, phosphorus, potassium, base saturation and cation exchange capacity.

Keywords: semivariograms, nutrient cycling, soil fertility.

## 1. INTRODUÇÃO

O modelo itinerante de uso do solo condicionado às características socioambientais representa grandes desafios à produção agrícola no trópico úmido, que em virtude do sistema corte e queima para limpeza e fertilização da área proporciona pousios cada vez mais reduzidos e insuficientes para regeneração do sistema, por conseguinte, resulta em baixos índices produtivos e redução da fertilidade do solo ao longo do tempo. Os efeitos negativos desse sistema de manejo proporcionam a eliminação das espécies mais suscetíveis ao fogo, favorecendo a dominância das espécies mais resistentes e o conseqüentemente empobrecimento da biodiversidade (Moura et al., 2009a), além da constante demanda por novas áreas.

O plantio direto na palha de leguminosas em sistema de aléias possibilita reunir no mesmo espaço e tempo, os processos de regeneração da fertilidade do solo por reduzir o uso de *inputs* externos em consequência da ciclagem de nutrientes, proporcionando a gradual estabilidade do sistema e o uso permanente da mesma área em anos posteriores (Aguiar et al., 2010). Conforme definido em diversos estudos, o sistema de cultivos em aléias é a combinação espacial de espécies arbóreas de crescimento rápido, preferencialmente leguminosas em consórcio com culturas anuais ou perenes, fazendo uso dos nutrientes contidos nos horizontes subsuperficiais e repondo-os à superfície por meio da produção de biomassa, conseqüentemente proporcionando melhoria da qualidade química do solo em razão da reciclagem de nutrientes e aumento dos rendimentos produtivos pelo aproveitamento destes (Menezes et al., 2002).

Em virtude das constantes pressões sobre o setor agrícola quanto uso insustentável dos recursos naturais, juntamente com a limitada expansão territorial para fins agrícolas e o acelerado crescimento demográfico mundial, que segundo a FAO (2013) enumera a ordem de 9,0 bilhões de pessoas em 2050, faz-se necessário a intensificação dos sistemas produtivos por meio de processos metodológicos de modo a proporcionar aumento dos rendimentos produtivos, tendo em vista a sustentabilidade e a preservação dos recursos naturais.

A eficiência do sistema produtivo pode ser obtida em parte, pela aplicação de tecnologias geoespaciais, tal como sistema de posicionamento global (GPS), sistemas de informações geográficas (SIG), sensoriamento remoto e geoestatística (GEBBERS;

ADAMCHUK, 2010), que concomitantemente ao associar metodologias específicas de manejo possibilitam intensificar as unidades produtivas.

Esse sistema de gestão ou de gerenciamento é sobretudo um elenco de procedimentos estratégicos para que os sistemas produtivos sejam otimizados, considerando como elemento fundamental a variabilidade espacial da produção e dos fatores a ela relacionados, considerando as particularidades de cada área ao ser manejada, possibilitando recomendar aplicações com taxas variadas dos insumos, meta vital para sustentabilidade por minimizar as perdas econômicas e os impactos sobre o ambiente, refletindo positivamente no aumento de produção por área.

Diante do exposto, pressupõe-se que práticas de manejo sustentáveis, como plantio direto na palha de leguminosa aliado ao conhecimento da variabilidade espacial dos atributos químico do solo, possibilite conduzir os sistemas produtivos ao processo de intensificação ecológica em virtude do aporte de nutrientes e melhor gerenciamento dos recursos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Agroecossistemas

A implantação e o manejo de sistemas agrícolas sustentáveis às condições locais do trópico úmido são os maiores desafios da maioria dos agricultores familiares, que utilizam as queimadas como manejo de preparo inicial das áreas e as cinzas para correção e fertilização do solo. As populações que se dedicam à agricultura na região, na ausência de alternativas adequadas e uso de baixa tecnologia no preparo do solo proporcionam efeitos negativos ao ambiente local e global, sem a contrapartida de benefícios sociais para as comunidades rurais (Aguiar et al., 2010).

Adoções metodológicas que enfatizem o processo construtivo de reservatórios de nutrientes minerais configuram-se como recurso mais adequado para a sustentabilidade dos agroecossistemas, sobretudo no trópico úmido, visto que os excedentes de águas pluviais aumentam as remoções dos elementos no perfil do solo (DRINKWATER; SNAPP, 2007). Considerando que os agroecossistemas apresentam maiores entradas de material orgânico ao solo por meio do processo continuado de adição dos resíduos vegetais em comparação, ao monocultivo convencional, enquadram-se assim como processo alternativo para a sustentabilidade dos solos no trópico úmido (Oelbermann et al., 2006).

Nos solos do trópico úmido a inclusão dos agroecossistemas contribui significativamente para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, por meio da ciclagem de nutrientes, além da adoção de outras práticas, como o plantio direto e a cobertura do solo, como constatado por Moura et al. (2008). Do ponto de vista da gestão produtiva e ambiental, os agroecossistemas atuam no equilíbrio do ambiente, por proporcionarem rendimentos sustentados pela fertilidade do solo e uso de tecnologia de baixos *inputs* (GLIESSMAN, 1998).

Neste contexto, aumentar a produção agrícola e conservar os recursos naturais por meio dos agroecossistemas é o paradigma preconizado para o desenvolvimento sustentável e apresenta-se como processo oportuno para o restabelecimento do equilíbrio e aumento da produtividade (Rosa et al., 2011).

## 2.2 Sistema de cultivo em aléias

O sistema de cultivo em aléias, consiste no plantio de culturas alimentares em alamedas de linhas simples ou duplas de árvores ou arbustos, de preferência leguminosas (Gillespie et al., 2000). As leguminosas são plantadas com propósito de fornecer nutrientes pelo processo de fixação do nitrogênio atmosférico, ciclar nutrientes pela decomposição dos resíduos vegetais e servir de cobertura do solo (BANNISTER; NAIR, 1990).

As potencialidades do sistema inclui diversas aplicabilidades como quebra-ventos, faixas de proteção ciliar, contornos para controle de erosão. Além dessas ações, este modelo pode ser gerenciado como sistema produtivo de baixo *inputs*, retentor de umidade pelo processo de cobertura do solo, o que impede a incidência direta dos raios solares ao solo (Grünewald et al., 2005).

A distribuição e o quantitativo da precipitação tornam-se fatores preponderantes para determinar o grau de sucesso ou fracasso da atividade produtiva, assim o sistema de cultivo em aléias proporciona a redução da evapotranspiração do solo e associa o aumento de água disponível ao solo para as culturas. Este critério é de especial relevância no contexto atual, principalmente para as regiões de baixa precipitação em que verões mais quentes e menores precipitações estão previstas a ocorrer com mais frequência em função das mudanças climáticas (Solomon et al., 2007).

O processo continuado de aplicação de resíduos vegetais na superfície do solo como cobertura, segundo Moura et al. (2009a), proporcionam reduções das perdas de umidade, o que melhora a retenção dos nutrientes na zona radicular, principalmente nas condições do trópico úmido, uma vez que as perdas de nutrientes por lixiviação são frequentes em virtude das altas taxas pluviométricas.

As condições do trópico úmido apresentam-se favoráveis à implantação de sistemas sustentáveis como o sistema de cultivos em aléias, em virtude do crescimento acelerado das leguminosas, aumentando os rendimentos de biomassa que permitirão satisfatória cobertura do solo e aumento gradual dos níveis de nutrientes no solo pela ciclagem de nutrientes (Moura et al., 2008).

Segundo Swift e Palm (1995), o suprimento das exigências nutricionais das culturas de interesse não é dependente somente dos teores quantitativos adicionados, mas também da eficiência nos processos de transferência dos nutrientes ao solo e

consequentemente às plantas, tais processos relacionam-se à qualidade da matéria orgânica adicionada, organismos presentes no sistema e eficiência de absorção dos nutrientes pela cultura. A fim de assegurar o sucesso produtivo, é necessário garantir o sincronismo entre a demanda e a liberação dos nutrientes, com base em parâmetros como: período de aplicação, localização e qualidade dos resíduos (MENDONÇA; STOTT, 2003).

O processo de liberação dos nutrientes é definido pelos níveis de carbono, nitrogênio, fósforo, lignina, polifenóis e as interações entre si. Segundo Young (1997), resíduos que apresentam quantitativos elevados de nitrogênio, baixos níveis de lignina e polifenóis denominam-se resíduos de alta qualidade, ao contrário consideram-se resíduos de baixa qualidade. Kumar e Goh (2000) descrevem que resíduos com alta relação C/N decompõem mais lentamente do que os resíduos de baixa relação C/N, assim resíduos de baixa qualidade destinam-se ao processo de cobertura do solo e liberação gradual de nutrientes.

Segundo Drinkwater e Snapp (2007), a utilização de resíduos vegetais melhor sustentam as produções no trópico úmido pelos processos de liberação gradual de nutrientes do que a saturação do solo com nutrientes solúveis. Resultados apresentados por Moura et al. (2009b) apontam interações positivas entre a aplicação de resíduos vegetais em sistema de cultivo em aléias e o volume radicular, retenção de água na camada mais superficial do solo e significativo aumento da produtividade do milho.

As produtividades das culturas no sistema de cultivo em aléias podem aumentar gradativamente devido aos incrementos de fertilidade, tendo em vista que parte dos nutrientes absorvidos retorna na forma de resíduos vegetais ao sistema do solo (AKYEAMPONG; HITIMANA, 1996). Segundo Bauhus et al. (2002), a fertilidade do solo pode decair caso haja um manejo inadequado do sistema, tal como retiradas maiores que os processos de adição no solo.

### **2.3 Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo**

O solo é o principal substrato para desenvolvimento vegetal, contudo, é o sistema de complexas interações e transformações que envolvem o intemperismo das rochas e minerais, ciclagem de nutrientes, produção e decomposição de resíduos. Neste contexto, o solo apresenta heterogeneidade tanto horizontal quanto vertical e desuniformidade em sua extensão, devido ao intemperismo não acontecer homoganeamente (Cavalcante et al., 2007).

A variabilidade dos solos de acordo com os princípios básicos da experimentação ocorre aleatoriamente, entretanto, Carvalho et al. (2002) apontam que a variabilidade dos atributos químicos do solo apresenta correlações ou dependência espacial. A caracterização da variabilidade espacial da fertilidade do solo, especialmente em áreas cultivadas, fornece informações relevantes para uso mais racional do solo e manejo, aumentando a eficiência dos insumos ao serem aplicados (Montezano et al., 2006).

A variação espacial horizontal e vertical pode aumentar em áreas com aplicação dos insumos sem posterior revolvimento, concentrando-se nas camadas superficiais do solo (Pauletti et al., 2005). Alvarez e Guarçoni (2003) constataram maior variabilidade horizontal principalmente para o fósforo (P) e potássio (K), sendo menor para o pH e matéria orgânica. Segundo Schilinwein e Anghioni (2000), a variabilidade não apresenta-se relacionada somente com os teores de nutrientes no solo, mas também com a forma de aplicação dos insumos.

Segundo Silva et al. (2010), a variabilidade espacial da fertilidade pode ser demonstrada por resultados analíticos das análises de solo, bem como pelas diferenças encontradas espacialmente nas produções. A variabilidade dos atributos químicos do solo em trabalhos realizados por Silva e Alexandre (2005), apresentaram correlações positivas entre o rendimento do milho e a capacidade de troca de cátions e os conteúdos de cálcio e potássio em solos desenvolvidos a partir de depósitos calcários e correlação negativa entre os teores H+Al com o rendimento do milho. Montezano et al. (2006) apresentaram correlações lineares positivas entre a produtividade de milho e matéria orgânica num Latossolo Vermelho distrófico sobre plantio direto.

As baixas correlações entre os rendimentos das culturas e a fertilidade do solo, segundo Rodrigues et al. (2012), podem ser justificadas pela diferença amostral dos dados, tanto para fins experimentais quanto para fins comerciais. Os mesmos autores destacam que dispositivos de monitoramento para rendimento de grãos permitem a geração de mapas altamente precisos por obter de 500-1300 pontos de dados por hectares e os dados de fertilidade geram mapas menos expressivos por serem obtidos de amostragens reduzidas, isto devido ao custo de aquisição de dados e análises.

A variabilidade espacial dos nutrientes pode diferir entre si em razão das variações quantitativas dos seus teores no solo, necessitando assim de grande número amostral para que se possa conhecer o comportamento dos elementos em determinada área

(Zanão Júnior et al., 2007). Segundo Vieira et al. (2002), a variabilidade e distribuição espacial das características inerentes a uma unidade produtiva podem ser detectadas e inferidas por meio de análise geoestatística.

Os métodos geoestatísticos, ou simplesmente geoestatística, foram desenvolvidos graças aos estudos do engenheiro de minas Georges Matheron na França, final da década de 50 e início da década de 60. Estes métodos estão fundamentados na Teoria das Variáveis Regionalizadas, que caracterizam-se por averiguar fenômenos que apresentam distribuição espacial e foi formalizada por Matheron a partir de estudos desenvolvidos por Daniel G. Krige (Lourenço et al., 2005). A ausência da dependência espacial é chamada de efeito pepita puro. O efeito pepita puro indica homogeneidade na área de estudo ou que a malha amostral não foi suficiente para detectar dependência, necessitando de distâncias amostrais mais reduzidas para ser manifestada (GUIMARÃES, 2004).

O estudo da variabilidade dos atributos químicos do solo é o importante instrumento no processo de locação de experimentos, coleta de dados, além de auxiliar na tomada de decisão sobre o gerenciamento a ser adotado nas unidades experimentais ou produtivas (SILVA; CHAVES, 2006).

## **2.4 Agricultura de precisão**

A agricultura de precisão compreende o conjunto de técnicas e metodologias que visam aprimorar o manejo dos sistemas produtivos, com a finalidade de maximizar o uso dos recursos disponíveis (Molin et al., 2007), mediante informações exatas, tomando decisões precisas na administração do sistema produtivo por pressupor que a unidade produtiva não é na sua totalidade homogênea, necessitando de manejo específico conforme sua particularidade, com o propósito de impactar positivamente a produtividade (ROZA, 2000).

A agricultura de precisão atualmente engloba o uso de recursos tecnológicos para o manejo dos sistemas ambientais e produtivos a fim de identificar a variabilidade espacial e temporal que afetam as produtividades das culturas exploradas. Segundo Balastreire et al. (1997), a agricultura de precisão baseia-se no conceito de que a variabilidade espacial dos aspectos limitantes ou favoráveis de produção podem ser identificados, quantificados e espacialmente delimitados e atua como ferramenta, com propósito de expressar as potencialidades e/ou limitações por meio de mapas temáticos, ampliando o

aspecto gerencial e garantindo uma visualização da real expressão produtiva das zonas de manejo (Santi et al., 2005).

Mediante a coleção de mapas de produtividades e das características do solo nas unidades produtivas é possível identificar como a variabilidade ocorre em termos de distribuição espacial, temporal e em termos quantitativos (Vieira et al., 2010), consequentemente por meio do processo de análise das variações espaciais, possibilitará a homogeneização dos campos de produção em virtude da materialização dos componentes gráficos computacionais de fertilidade, resultando em rendimentos produtivos mais expressivos (Amado et al., 2007). Dentro desse contexto, a geoestatística vem despontando como método de investigação da dependência espacial e temporal de atributos do solo, empregada constantemente na ciência do solo por meio da agricultura de precisão (GONTIJO, 2003).

## **2.5 Intensificação ecológica da agricultura**

Atualmente, o setor agrícola tem sofrido constantes pressões com o aumento populacional e em virtude das necessidades de garantir a segurança alimentar, que segundo Nelson et al. (2010), apontam projeções de crescimento demográfico na ordem de 7,0 a 9,0 bilhões de pessoas até 2050. Segundo FAO (2013), para suprir a necessidade alimentar de cada indivíduo em 2050 haverá somente 0,16 hectares de terras agrícolas disponíveis, assim torna imprescindível a necessidade de intensificar e aumentar a produção de alimentos, garantindo concomitantemente a sustentabilidade.

A proposta de intensificação agrícola de tempos anteriores, segundo Evenson e Gollin (2003b), caracterizou-se pelo aumento da produtividade em consequência de um pacote tecnológico derivado de genótipos altamente expressivos quando então associado ao crescente uso de insumos. Esse processo de intensificação denominado Revolução Verde, proporcionou elevados ganhos na produção agrícola mundial durante as últimas quatro décadas (Hochman et al., 2013). Todavia, este sucesso inquestionável em relação ao aumento produtivo apresentou impactos danosos ao ambiente (Tilman et al., 2002).

O processo de intensificação não é claramente definida como modelo produtivo, mas sim como conjunto de ações complementares que visam minimizar os impactos da agricultura sobre o ambiente, tais ações caracterizam-se por garantir o uso mais eficiente dos insumos e utilização das interações dos fatores biológicos e ecológicos nos

processos de produção (FAO, 2013). A intensificação ecológica agrícola segundo Cassman (1999), engloba o gerenciamento das áreas produtivas a fim de garantir que não haja excesso ou *deficit* dos recursos necessários ao desenvolvimento das culturas durante as estações de crescimento e desenvolvimento, satisfazendo o aumento dos rendimentos por unidade de área com impactos ambientais mínimos.

A capacidade em aumentar os rendimentos produtivos por meio da intensificação ecológica da agricultura, fundamenta-se em estreitar as relações entre a aplicabilidade dos recursos investidos e produtividade, seja por meio de processos científicos nas áreas da fisiologia e ecofisiologia vegetal, ciência do solo ou das relações entre estes fatores (TITTONELL; GILLER, 2013). Segundo Dixon et al. (2001), este processo tem emergido recentemente, envolvendo tecnologias e estratégias de gestão que englobam práticas integradas de manejos, agricultura de baixos *inputs*, diversificação da produção, preconizando um modelo ecoeficiente.

A ecoeficiência na agricultura, fundamenta-se em produzir mais com menos *inputs* externos, proporcionado pelos diversos serviços ecossistêmicos que priorizam a sustentabilidade, reduzindo o fosso entre o rendimento agrícola médio e o teto produtivo em potencial (Keating et al., 2010). A ecoeficiência ou intensificação ecológica da agricultura, segundo Cassman (1999) relaciona-se em três pilares: culturas de expressivo potencial produtivo, melhoria da qualidade do solo e precisão no manejo dos recursos. As interações entre os pilares proposto por Cassman (1999), potencialmente satisfazem os critérios desejáveis a intensificação ecológica da agricultura, por melhorar a eficiência dos sistemas produtivos em razão da melhor administração das áreas manejadas, possibilitando a diversificação da exploração em áreas de menores potencialidades (Hochman et al., 2013).

### **3. OBJETIVO**

O objetivo foi avaliar o desempenho produtivo do milho em sistema de plantio direto na palha de leguminosa num Latossolo Amarelo distrocoeso em função da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, tendo em vista o processo de intensificação ecológica.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização da área experimental, clima e solo

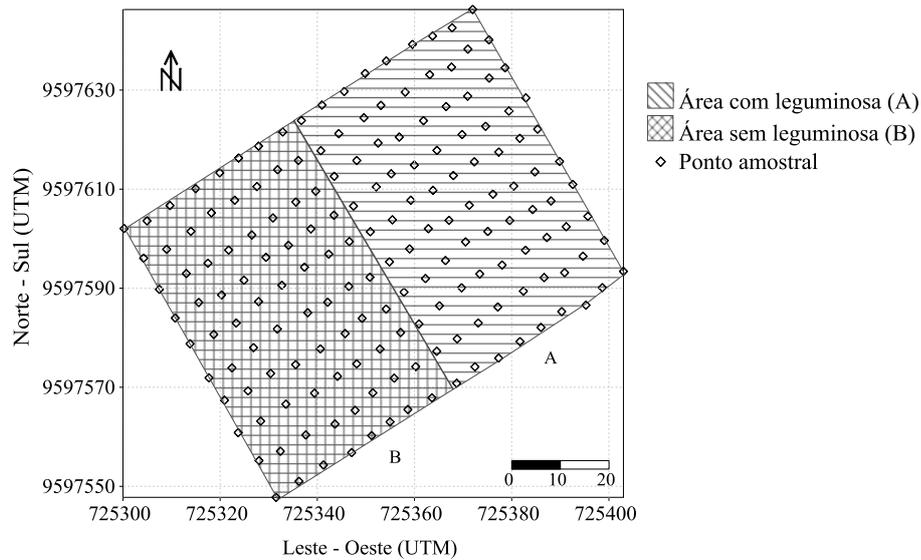
O experimento foi conduzido no povoado Acampamento, município de Brejo (MA) no início do período chuvoso, em janeiro de 2013. As coordenadas geográficas UTM compreendem 725337,92 m E e 9597574,68 m N, 23 M. O clima da região classificado segundo Köppen é do tipo Aw, Equatorial quente e úmido, com estação quente e úmida bem definida: alta pluviosidade nos meses de janeiro a junho e seca com déficit hídrico acentuado de julho a dezembro. As precipitações variam entre 1.600 a 2.000 mm anuais, das quais cerca de 80% concentram-se no primeiro semestre. A temperatura média local encontra-se na faixa de 27,5° C, com variações mínimas entre 22 e 24° C e máximas de 30 e 36° C.

A área experimental anteriormente era constituída de vegetação secundária classificada como capoeira, que em seguida foi eliminada para implantação de cultivos de arroz com sistema de preparo convencional do solo e sem correção da fertilidade. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Amarelo distrocoeso (EMBRAPA, 2013).

### 4.2 Descrição espacial do experimento

O experimento foi implantado em área de 0,6 ha contendo dois ambientes, um com leucena (*Leucaena leucocephala*) no espaçamento de 2,50 m entre linhas e 0,50 m entre plantas, totalizando 17 linhas e um ambiente sem leguminosa, ambos os ambientes continham dimensões iguais de 42,5 x 70,0 m.

A malha amostral utilizada foi composta por 170 pontos, distribuídos em 17 linhas, com espaçamento entre os pontos de coleta (na linha) de 7,0 metros e 5,0 metros entre linhas (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa com os pontos amostrais e disposição espacial da área experimental.

### 4.3 Condução do experimento

A correção da acidez do solo foi realizada em 2011, com aplicação superficial de  $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  de um corretivo com PRNT de 50%. Para correção dos baixos teores de fósforo contidos no solo foram aplicados no plantio das leguminosas  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  na forma de superfosfato triplo.

No início do período chuvoso (Janeiro/2013) e antecedendo a implantação da cultura do milho, realizou-se a poda parcial das galhadas laterais das leguminosas a fim de facilitar as atividades no interior do sistema.

A eliminação das plantas invasoras e da pastagem (*Urochloa hybrida* cv. Mulato) implantada no ano de 2012, foi realizada por meio da aplicação de herbicida (Glifosato p.a.) na dosagem de  $5,0 \text{ L ha}^{-1}$  e em seguida fez-se a supressão mecânica da pastagem.

As sementes de milho cv. AG 7088 foram semeadas (Fevereiro/2013) com a utilização de matracas manuais e espaçamento de  $0,70 \times 0,30 \text{ m}$ . Após a semeadura e emergência do milho realizou-se o segundo corte das leguminosas a  $1,0 \text{ m}$  de altura. As quantidades de biomassa das leguminosas, referente ao primeiro e segundo corte,  $247,0$  e  $727,0 \text{ kg}$  de massa fresca, respectivamente, foram igualmente distribuídas na área correspondente ao ambiente de leguminosa.

Na adubação de semeadura foram aplicados  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $04-20-20 + 7,0 \text{ kg}$  de  $\text{Zn ha}^{-1}$ . As adubações de cobertura utilizaram-se  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{N}$  e  $32 \text{ kg ha}^{-1}$   $\text{K}_2\text{O}$ , na

forma de uréia e cloreto de potássio, respectivamente. O fertilizante nitrogenado foi aplicado sem parcelamento quando a cultura do milho apresentou de quatro a cinco folhas definitivas e o potássio em dois parcelamentos, a primeira em conjunto com o fertilizante nitrogenado e a segunda aplicação com oito folhas definitivas.

A colheita foi realizada na maturação fisiológica da cultivar aos 140 dias quando os grãos apresentaram cerca de 25% umidade.

#### **4.4 Avaliação dos atributos químicos do solo e rendimento produtivo do milho**

As amostras do solo foram obtidas de três amostras simples por ponto amostral e extraídas em duas profundidades (0,0-0,10 e 0,10-0,20 m) para analisar os atributos químicos do solo.

Após a coleta das amostras do solo foram determinados os seguintes atributos: pH em  $\text{CaCl}_2$ , acidez potencial (H+Al), fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), alumínio trocável (Al), segundo metodologia do Instituto Agronômico de Campinas (2001).

Diante dos dados analíticos foram calculados: capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V%) por meio das equações:  $\text{CTC} = [\text{SB} + (\text{H}+\text{Al})]$ ,  $\text{SB} = \text{Ca}+\text{Mg}+\text{K}$  e  $\text{V}\% = (\text{SB}/\text{CTC})\times 100$ , respectivamente.

A avaliação do rendimento produtivo foi realizada inicialmente com a colheita da cultura em área de 5 m<sup>2</sup> /ponto amostral para quantificar a produtividade (Mg ha<sup>-1</sup>) e posteriormente obtido o peso de 100 grãos, o número de grãos/espiga e o número de espiga/planta. Com o propósito de correlacionar a produtividade do milho com os atributos químicos do solo, determinou-se o coeficiente de correlação pelo método de Pearson a 5% de significância por meio do software Infostat (Di Rienzo et al., 2011).

#### 4.5 Análise geoestatística

A variabilidade espacial dos atributos químicos do solo e rendimento produtivo foi determinada inicialmente por meio da análise exploratória dos dados (mínimo, máximo, média, mediana, desvio-padrão, coeficientes de curtose, assimetria e de variação). A hipótese de normalidade das variáveis foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade.

A fim de caracterizar a dependência espacial, que é entendida como a tendência que o valor de uma variável associada à determinada localização tem de se assemelhar com os valores das amostras mais próximas do que aos mais afastados de si, fez-se uso da geoestatística para análise dos resultados.

A dependência espacial entre as observações e autocorrelação entre os locais vizinhos foram calculadas por meio do semivariograma (MATHERON, 1963) gerados no software GS+ 5.1 (ROBERTSON, 1998), conforme descrito abaixo.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

em que:

$N(h)$  = é o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$  separados por um vetor  $h$  (distância);

$Z(x_i)$  = é a variável aleatória em estudo na  $i$ -ésima posição.

Diante dos semivariogramas fez-se os ajustes dos componentes estruturais: efeito pepita ( $C_0$ ), que é o valor de  $\gamma$  quando  $h=0$ ; o patamar ( $C_0+C$ ), que compreende o valor  $\gamma(h)$  a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados; o alcance ( $A_0$ ), que é a distância em que  $\gamma(h)$  permanece constante após aumentar com incrementos de  $h$  (LANDIM, 2006) a fim de estimar os melhores modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano).

Os modelos teóricos foram selecionados considerando a minimização da soma dos quadrados dos resíduos (SQR), o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o maior grau de dependência (GDE).

O grau de dependência espacial (GDE) das variáveis em estudo foi classificado como fraca ( $GDE \leq 25\%$ ), moderado ( $25\% < GDE \leq 75\%$ ), forte ( $GDE > 75\%$ ), segundo a classificação proposta por Zimback (2001) e determinados por meio da equação:

$$GDE = \left[ \frac{C}{C_0 + C} \right] 100$$

em que:

C é a variância estrutural

$C_0 + C$  é a semivariância do patamar

Os valores das áreas não amostradas foram estimados por meio de krigagem ordinária e posteriormente gerados os mapas de isolinhas no software Surfer 11 (GOLDEN SOFTWARE, 2012).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Estatística descritiva

Os valores das medidas de tendência central (média e mediana) de todos os atributos analisados foram similares por apresentarem valores próximos entre si, mesmo apresentando coeficientes de assimetria e curtose com desvios elevados em relação à distribuição normal (Tabela 1). Segundo Cambardella et al. (1994), a similaridade entre as medidas de tendência central é atribuída pela não dominância de valores atípicos.

Os atributos acidez ativa, fósforo, potássio e alumínio trocável, apresentaram assimetria positiva com variação de 0,32 a 1,96 na profundidade de 0,0-0,10 m, entretanto a acidez potencial e a capacidade de troca catiônica na profundidade de 0,10-0,20 m apresentaram assimetria negativa com valores de -0,08 e -0,04, respectivamente. Dentre as variáveis de rendimento produtivo, somente o peso de 100 grãos apresentou assimetria negativa.

Com base nos resultados obtidos por meio da análise descritiva e segundo a classificação proposta por Warrick e Nielsin (1980), observou-se que a acidez ativa

apresentou baixo coeficiente de variação (4,43 e 3,19%) nas duas profundidades, tendo os demais atributos químicos do solo apresentado médio coeficiente de variação (15,27 e 55,51%).

Verificou-se na profundidade de 0,0-0,10 m que o fósforo apresentou elevado coeficiente de variação (78,35%), que segundo Carvalho et al. (2005), evidencia heterogeneidade dos dados, consequência de regiões que exprime teores abruptos às variáveis estudadas de modo a proporcionar um tendencioso afastamento das medidas centrais. A produtividade e o número de espiga/planta apresentaram coeficientes de variação entre 15 e 22%, ao contrário do peso de 100 grãos e número de grãos/espiga que obtiveram reduzidos coeficientes de variação (8 a 10%).

A acidez ativa, saturação por bases e soma de bases nas duas profundidades, o cálcio e a acidez potencial (0,0-0,10 m), o magnésio, alumínio trocável e a capacidade de troca catiônica (0,10-0,20 m) e os parâmetros de produtividade, peso de 100 grãos, número de grãos/espiga apresentaram distribuição normal, segundo o teste Kolmogorov-Smirnov a 5% probabilidade (Tabela 1). De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, todavia tal tratamento é conveniente para identificar a presença de *outliers* que podem comprometer as estimativas de interpolação por krigagem. No entanto, melhores resultados no processo de krigagem apresentam-se quando a normalidade dos dados é satisfeita (Paz-Gonzalez et al., 2001), por possibilitar melhor ajuste dos semivariogramas (Machado et al., 2007).

A análise descritiva dos atributos químicos do solo, referente à acidez ativa, fósforo, bases trocáveis, soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases na profundidade de 0,0-0,10 m, apresentou os maiores teores (Tabela 1). Esses resultados justificam-se pela ausência de incorporação dos insumos empregados no sistema de plantio, que contribui para o aumento dos teores dos atributos químicos na camada superficial do solo. Em virtude da adição continuada de biomassa, possibilita afirmar a influente contribuição do sistema de plantio na palha de leguminosa para melhoria da qualidade química do solo, por proporcionar o aumento gradual das reservas de nutrientes e reduções no emprego de fertilizantes solúveis.

**Tabela 1.** Estatística descritiva dos atributos pH ( $\text{CaCl}_2$ ), fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), potássio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), cálcio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), magnésio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), acidez potencial ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), alumínio trocável ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), soma de bases ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), capacidade de troca de cátions ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), saturação por base (%) e rendimento produtivo do milho num Latossolo Amarelo distrocoeso.

Variáveis	Mín.	Máx.	Méd.	Med.	Dp.	Curt.	Ass.	CV	d
-----Profundidade de 0,0 – 0,10 m-----									
pH	4,20	5,00	4,51	4,50	0,20	-0,66	0,32	4,43	0,07 <sup>(n)</sup>
P	6,00	77,00	19,75	18,00	15,51	3,33	1,96	78,53	0,29
K	0,50	1,70	0,97	0,95	0,25	0,13	0,66	25,77	0,13
Ca	15,00	40,00	27,95	28,00	6,91	-1,02	-0,08	24,72	0,04 <sup>(n)</sup>
Mg	3,00	13,00	8,69	9,00	2,85	-1,01	-0,18	32,79	0,12
H+Al	18,00	88,00	59,55	59,82	16,23	-0,46	-0,29	27,25	0,06 <sup>(n)</sup>
Al	2,00	8,00	3,90	2,50	1,85	-0,58	0,76	47,43	0,16
SB	11,60	56,20	37,51	39,86	10,84	-0,65	-0,36	28,89	0,05 <sup>(n)</sup>
CTC	40,50	140,10	101,33	102,73	23,63	-0,70	-0,22	23,32	0,36
V%	15,00	50,00	36,37	38,81	7,93	-0,46	-0,36	21,80	0,05 <sup>(n)</sup>
-----Profundidade de 0,10 – 0,20 m-----									
pH	4,00	4,70	4,12	4,04	0,13	2,92	1,48	3,19	0,06 <sup>(n)</sup>
P	1,00	22,00	7,80	7,65	4,33	1,37	1,15	55,51	0,26
K	0,40	1,70	0,81	0,80	0,30	-0,69	0,50	37,50	0,13
Ca	4,00	12,00	7,60	7,40	2,42	-1,23	0,15	31,84	0,12
Mg	2,00	9,00	4,99	4,00	1,92	-0,85	0,30	38,48	0,10 <sup>(n)</sup>
H+Al	47,00	121,00	83,51	84,00	15,00	-0,14	-0,08	17,96	0,11
Al	1,00	18,00	9,61	9,50	3,81	-0,62	0,00	39,65	0,06 <sup>(n)</sup>
SB	5,00	19,60	12,60	12,40	3,77	-0,90	0,05	29,92	0,07 <sup>(n)</sup>
CTC	55,00	132,00	98,44	98,60	15,03	-0,51	-0,04	15,27	0,05 <sup>(n)</sup>
V%	5,40	24,30	13,68	13,23	4,09	-0,42	0,43	29,90	0,07 <sup>(n)</sup>
-----Rendimento Produtivo-----									
Prod.	1,92	7,56	4,61	4,48	0,98	0,45	0,41	21,26	0,08 <sup>(n)</sup>
E/P	0,70	1,90	1,19	1,10	0,19	1,21	0,87	15,88	0,20
P 100 g	18,70	33,00	26,53	26,70	2,15	1,23	-0,55	8,10	0,06 <sup>(n)</sup>
G/E	367,00	592,00	479,30	482,50	43,59	-0,12	0,09	9,10	0,08 <sup>(n)</sup>

Mín.: Valores mínimos, Máx.: Valores máximos, Méd.: Média, Med.: Mediana, Dp.: Desvio padrão, Curt.: Curtose, Ass.: Assimetria, CV.: Coeficiente de variação (%), d.: Estatística do teste Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade, Prod.: Produtividade ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), E/P.: Número de espiga/planta, P 100 g.: Peso de 100 grãos (g), G/E.: Número de grãos/espiga, <sup>(n)</sup> Variável segue distribuição normal.

## 5.2 Análise espacial dos atributos químicos do solo e rendimento produtivo do milho

Observou-se que a maioria das variáveis apresentou reduzidos valores de efeito pepita e acentuado distanciamento em relação ao patamar do semivariograma (Tabela 2). Segundo Vieira (2000), o efeito pepita expressa a variabilidade não captada pela análise, quanto maior for a diferença do efeito pepita ( $C_0$ ) em relação ao patamar ( $C+C_0$ ) do semivariograma, menor a variância estimada, conseqüentemente maior a confiabilidade das estimativas.

Os resultados da análise geoestatística destacam que, nas duas profundidades foi observada forte dependência espacial para a maioria dos atributos de fertilidade do solo e de rendimento produtivo, com ressalva para os atributos, acidez potencial e capacidade de troca catiônica na profundidade de 0,0-0,10 m e do fósforo, potássio, soma de bases e capacidade de troca de cátions na profundidade de 0,10-0,20 m, que apresentaram moderada dependência espacial (Tabela 2). A dependência espacial dos atributos químicos do solo tem sido reportada por Zanão Júnior et al. (2007) variando entre moderada e forte, em razão da menor contribuição do efeito pepita ao patamar, o que favorece um melhor ajuste dos semivariogramas, portanto melhor interpolação dos dados.

Constatou-se que a capacidade de troca catiônica nas duas profundidades apresentou os maiores valores de alcance, no entanto os menores alcances ( $A_0$ ) foram atribuídos ao magnésio na profundidade 0,0-0,10 m e ao alumínio trocável na profundidade de 0,10-0,20 m, com valores de 6,70 e 8,15 m, respectivamente. Nas duas profundidades foi observado alcance aproximado de 9,0 m para acidez ativa, cálcio, alumínio trocável e de 14,0 m para a saturação de bases. Os parâmetros de rendimento produtivo apresentaram alcances que variaram de 8,60 a 12,50 m, observando que o maior valor foi atribuído à produtividade do milho.

O alcance indica o limite máximo que uma variável apresenta correlacionada espacialmente entre si (Machado et al., 2007) e o conhecimento dos valores do alcance possibilita, por meio de mapas temáticos, o melhor planejamento do sistema produtivo (Zanão Júnior et al., 2010). Diante dessa afirmação, observou-se que além da variabilidade horizontal há também representativa variabilidade vertical da fertilidade, principalmente por apresentar alcances diferentes às variáveis e em profundidade.

Quanto aos modelos dos semivariogramas, pode-se destacar que todos se comportaram diferentemente conforme a profundidade (Tabela 2). Os atributos fósforo, magnésio, alumínio trocável e capacidade de troca catiônica na profundidade 0,0-0,10 m ajustaram-se melhor ao modelo gaussiano, o potássio, cálcio, acidez potencial, saturação por bases, soma de bases ao modelo exponencial e modelo esférico a acidez ativa. Na profundidade de 0,10-0,20 m somente o cálcio e alumínio trocável ajustaram-se ao modelo gaussiano, a acidez ativa, potássio, soma de bases e capacidade de troca catiônica ajustaram-se ao modelo esférico e os demais atributos ao modelo exponencial.

Os parâmetros produtividade e peso de 100 grãos ajustaram-se ao modelo exponencial, o número de espiga/planta e número de grãos/espiga ajustaram-se ao modelo esférico e gaussiano, respectivamente. Esses resultados corroboram com pesquisas anteriores, que apontam o modelo matemático esférico como o mais adaptado para descrever o comportamento dos atributos de plantas e solo (GREGO; VIEIRA, 2005).

**Tabela 2.** Análise geoestatística dos atributos pH ( $\text{CaCl}_2$ ), fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ), potássio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), cálcio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), magnésio ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), acidez potencial ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), alumínio trocável ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), soma de bases ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), capacidade de troca de cátions ( $\text{mmol dm}^{-3}$ ), saturação por base (%) e rendimento produtivo do milho num Latossolo Amarelo distrocoeso.

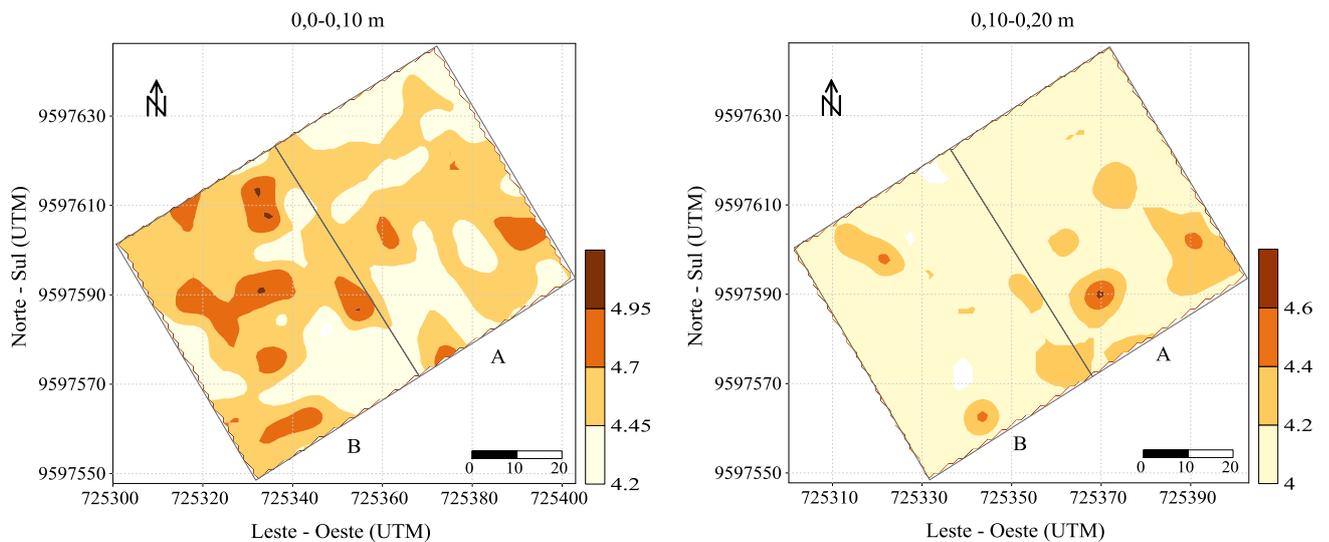
Variável	Modelo	$C_0$	$C+C_0$	$A_0$ (m)	$R^2$	GDE	Classe
-----Profundidade de 0,0 – 0,10 m-----							
pH	Esférico	0,0004	0,0410	9,00	0,47	99	Forte
P	Gaussiano	0,100	253,40	7,10	0,94	100	Forte
K	Exponencial	0,001	0,061	13,20	0,89	99	Forte
Ca	Exponencial	0,100	35,85	9,70	0,41	100	Forte
Mg	Gaussiano	0,14	7,49	6,70	0,85	98	Forte
H+Al	Exponencial	99,10	206,90	29,20	0,65	52	Moderado
Al	Gaussiano	0,001	3,16	9,20	0,75	100	Forte
SB	Exponencial	0,100	86,14	10,90	0,61	100	Forte
CTC	Gaussiano	152,00	470,10	48,30	0,97	68	Moderado
V%	Exponencial	0,60	60,68	13,70	0,89	99	Forte
-----Profundidade de 0,10 – 0,20 m-----							
pH	Esférico	0,0001	0,017	9,10	0,80	99	Forte
P	Exponencial	4,63	18,36	20,80	0,82	75	Moderado
K	Esférico	0,029	0,086	59,82	0,90	66	Moderado
Ca	Gaussiano	0,01	4,10	8,60	0,94	100	Forte
Mg	Exponencial	0,05	3,57	10,98	0,67	99	Forte

H+Al	Exponencial	38,00	198,70	16,29	0,79	81	Forte
Al	Gaussiano	0,63	14,53	8,15	0,80	96	Forte
SB	Esférico	6,15	12,51	44,60	0,96	51	Moderado
CTC	Esférico	106,30	212,70	61,00	0,91	50	Moderado
V%	Exponencial	0,54	16,48	14,88	0,74	97	Forte
-----Rendimento Produtivo-----							
Prod.	Exponencial	0,001	0,843	12,50	0,86	100	Forte
E/P	Esférico	0,0003	0,033	8,70	0,50	99	Forte
P 100 g	Exponencial	0,01	3,86	9,90	0,41	100	Forte
G/E	Gaussiano	1,00	1894,00	8,60	0,89	100	Forte

C<sub>0</sub>.: Efeito pepita, C+C<sub>0</sub>.: Patamar, A<sub>0</sub>.: Alcance, R<sup>2</sup>.: Coeficiente de determinação, GDE.: Grau de dependência espacial (%), Prod.: Produtividade (Mg ha<sup>-1</sup>), E/P.: Número de espiga/planta, P 100 g.: Peso de 100 grãos (g), G/E.: Número de grãos/espiga.

Os atributos de fertilidade do solo foram classificados conforme proposto por Alvarez et al. (1999). Os maiores valores referente à acidez ativa foram encontrados na profundidade de 0,0-0,10 m (4,20 a 5,00) determinando acidez elevada (Figura 2). A acidez ativa, na profundidade de 0,10-0,20 m, foi classificada como muito elevada com média de 4,04. Constatou-se que na maior parte da área, na profundidade de 0,10-0,20 m, foi identificada faixa predominante de pH entre 4,00-4,20 com pontos dispersos para os valores inferiores a 4,00 e superiores a 4,20.

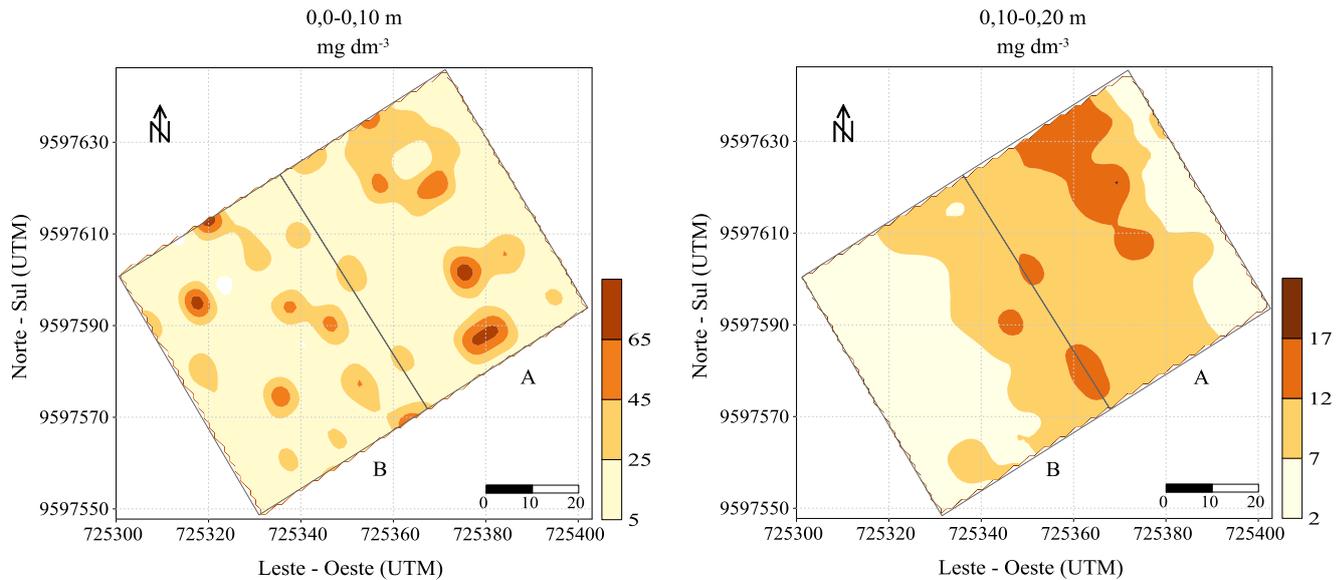
Segundo Silva et al. (2013), o processo de nitrificação e lixiviação do nitrato, a absorção de cátions pela cultura explorada, principalmente gramíneas e leguminosa proporcionam maiores liberações de íons H<sup>+</sup> à solução do solo, o que acarreta acidificação da zona radicular, que em termos gerais encontram-se de 0,0-0,20 m. Ressalta-se ainda que os baixos níveis da acidez ativa, nas duas profundidades, são atribuídos a característica natural da grande maioria dos solos brasileiros, principalmente no leste maranhense em que há dominância de solos ácidos e de baixa fertilidade natural (Azevedo et al., 2007).



**Figura 2.** Mapas de isolinhas dos valores de pH ( $\text{CaCl}_2$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

A distribuição espacial do fósforo na área apresentou teores médios, que variaram de  $19,75$  e  $7,80 \text{ mg dm}^{-3}$  (Figura 3), classificando-os como baixo e muito baixo, nas respectivas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m. Verificou-se a presença de pontos dispersos para os maiores teores de fósforo na camada de 0,0-0,10 m, fato que, segundo Cavalcante et al., (2007), revela uma heterogeneidade do solo nessa profundidade, possivelmente atribuída aos efeitos residuais das adubações anteriores ou imprecisão na amostragem. Verificou-se ainda que, a maior parte da área na profundidade de 0,0-0,10 m, encontra-se com teores predominantes entre  $5,0$  a  $25,0 \text{ mg dm}^{-3}$ .

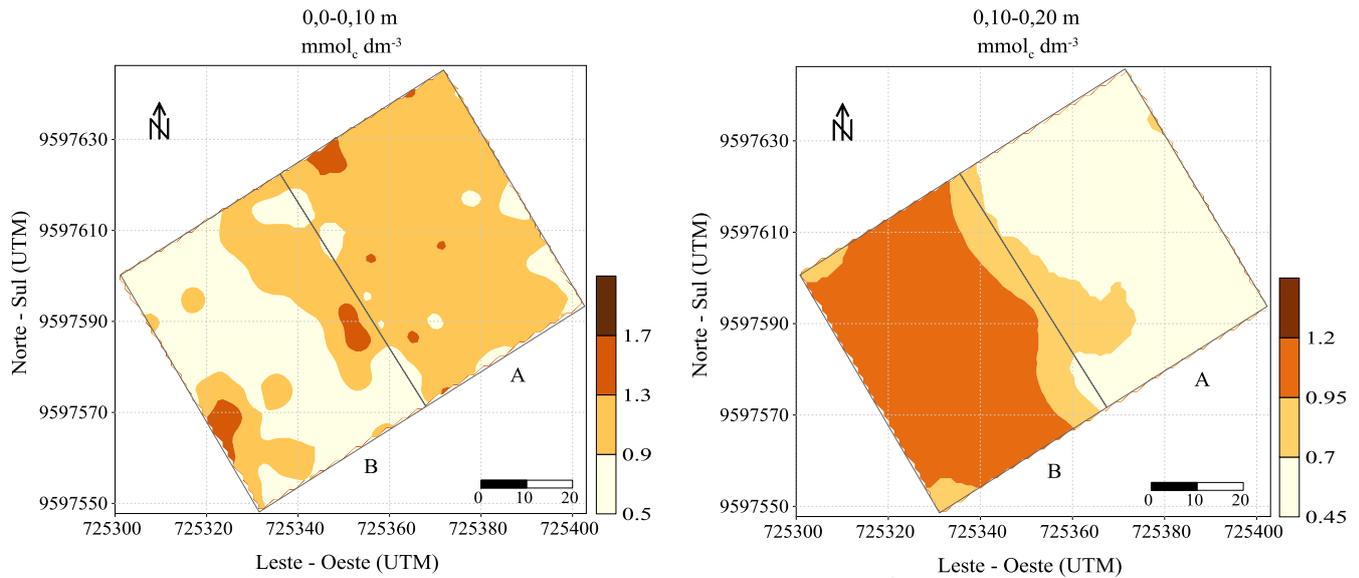
A produção agrícola limita-se principalmente em virtude da elevada acidez, característica predominante dos solos no trópico úmido, proporcionando baixos teores e baixa disponibilidade de fósforo no solo (Vance et al., 2003), concomitantemente, a grande força de adsorção e sua baixa mobilidade, proporciona em profundidade, teores reduzidos desse elemento em relação as camadas superficiais (Silva et al., 2010). Os teores de fósforo encontrados nas profundidades 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m (Figura 3) apontam a necessidade de correção dos baixos níveis contidos na área, seja pela aplicação de fertilizantes solúveis ou metodologias sustentáveis que os substituam, suprimindo as exigências desse elemento às culturas exploradas no espaço e tempo.



**Figura 3.** Mapas de isolinhas dos valores de fósforo ( $\text{mg dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo dystrocoeso.

Os teores de potássio foram considerados baixos nas duas profundidades (Figura 4), apresentando teores médios de  $0,97$  e  $0,81 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . Os teores mínimos e máximos variaram de  $0,50$  a  $1,70 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $0,40$  a  $1,70 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, respectivamente.

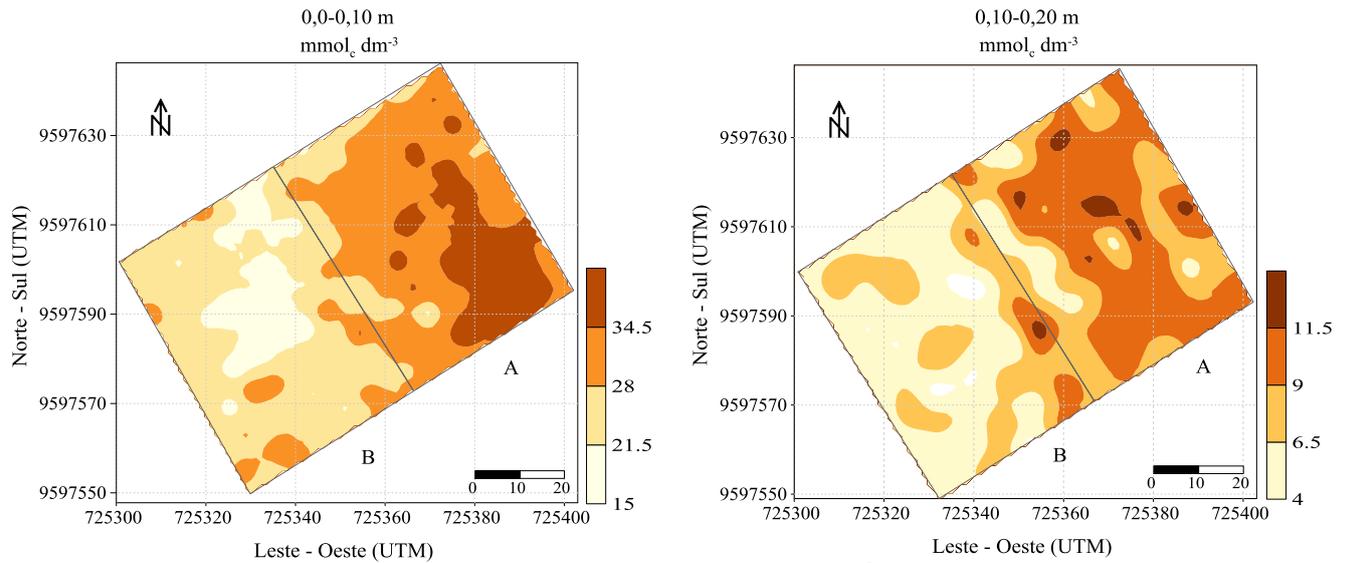
Verificou-se que o potássio na profundidade 0,0-0,10 m, região A (ambiente com leguminosa), apresentou teores mais elevados ( $0,9$  a  $1,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), possivelmente em virtude do acúmulo de resíduos na superfície do solo, que possibilita reduzir o uso de *inputs* externos sem que os rendimentos produtivos sejam afetados. Os maiores teores em profundidade foram observados na região B (ambiente sem leguminosa), provavelmente em decorrência da lixiviação do potássio contido na superfície para as camadas subsuperficiais do solo. Segundo Moura et al. (2009a), o plantio direto em sistema de aléias com leguminosas arbóreas proporciona níveis satisfatórios de cobertura do solo garantido pela expressiva produção de biomassa, aumento dos nutrientes na zona radicular disponibilizados pela ciclagem de nutrientes e reduções das perdas por lixiviação.



**Figura 4.** Mapas de isolinhas dos valores de potássio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

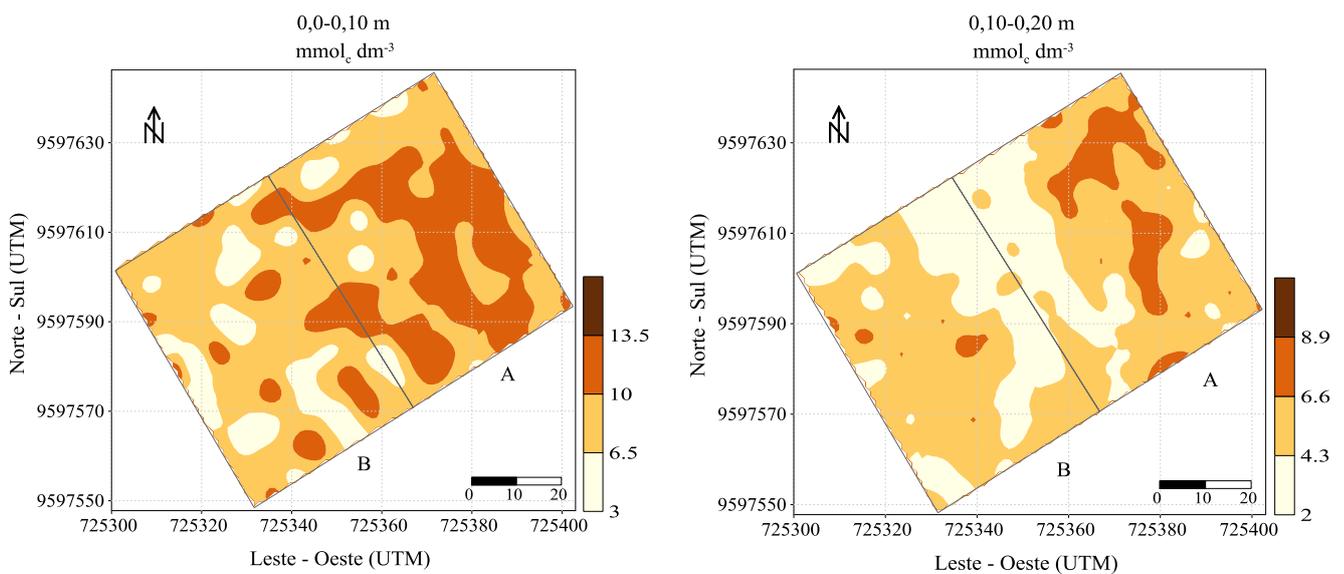
O cálcio na profundidade de 0,0-0,10 m apresentou teor médio de  $27,95 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$  e foi classificado como nível bom, caso contrário observado na profundidade de 0,10-0,20 m por apresentar baixos teores de cálcio que variaram de  $4,0$  a  $12,0 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$  (Figura 5).

Verificou-se na profundidade de 0,0-0,10 m, os maiores teores de cálcio, circunstância atribuída à aplicação superficial dos  $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  do corretivo empregado na implantação do experimento. O efeito da calagem e da reciclagem superficial de nutrientes por meio da deposição de resíduos nessa camada, possivelmente está relacionado com os valores diferenciados da dependência espacial entre as profundidades do solo, uma vez que a intensidade das reações também é distinta (DALCHIAVON, 2010).



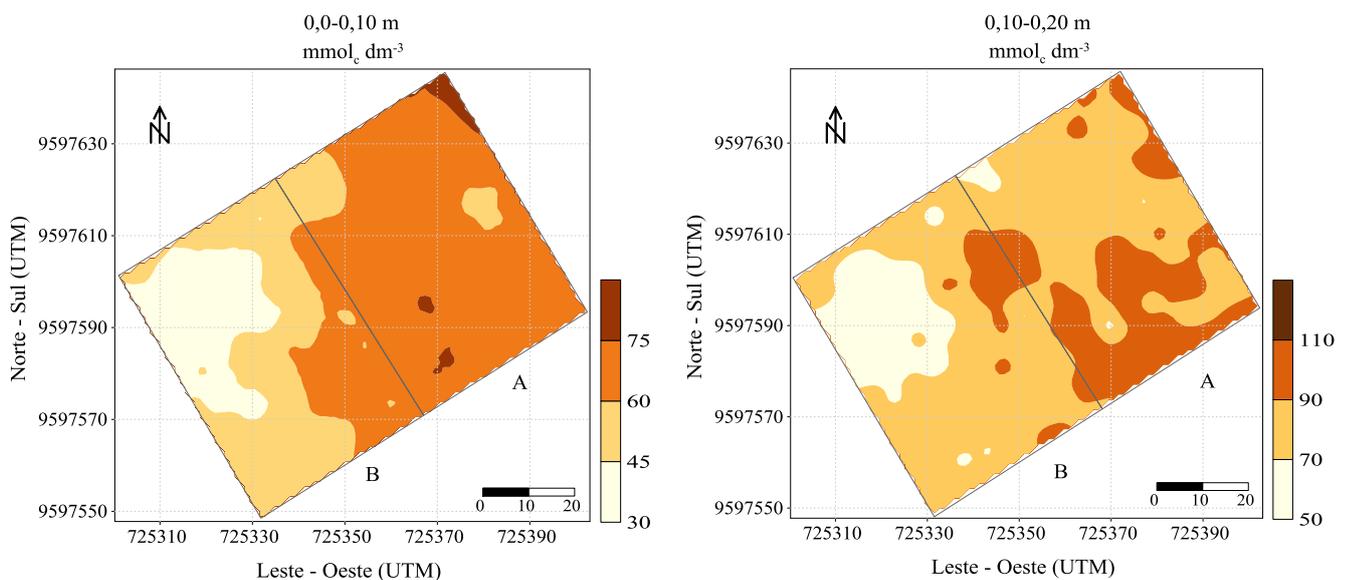
**Figura 5.** Mapas de isolinhas dos valores de cálcio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

O magnésio por apresentar teores de 8,69 e 4,99  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, foram classificados como nível médio, respectivamente. Verificou-se na profundidade de 0,10-0,20 m a predominância de valores entre 4,3 e 6,6  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , encontrando-se concentrado na zona central da área os menores teores de magnésio (2,0 a 4,3  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) (Figura 6), no entanto os teores mais elevados (10,0 a 13,5  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) podem ser notados na profundidade de 0,0-0,10 m na região A com manchas dispersas na região B e maior predominância dos teores entre 6,0 e 10  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  na área.



**Figura 6.** Mapas de isolinhas dos valores de magnésio ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

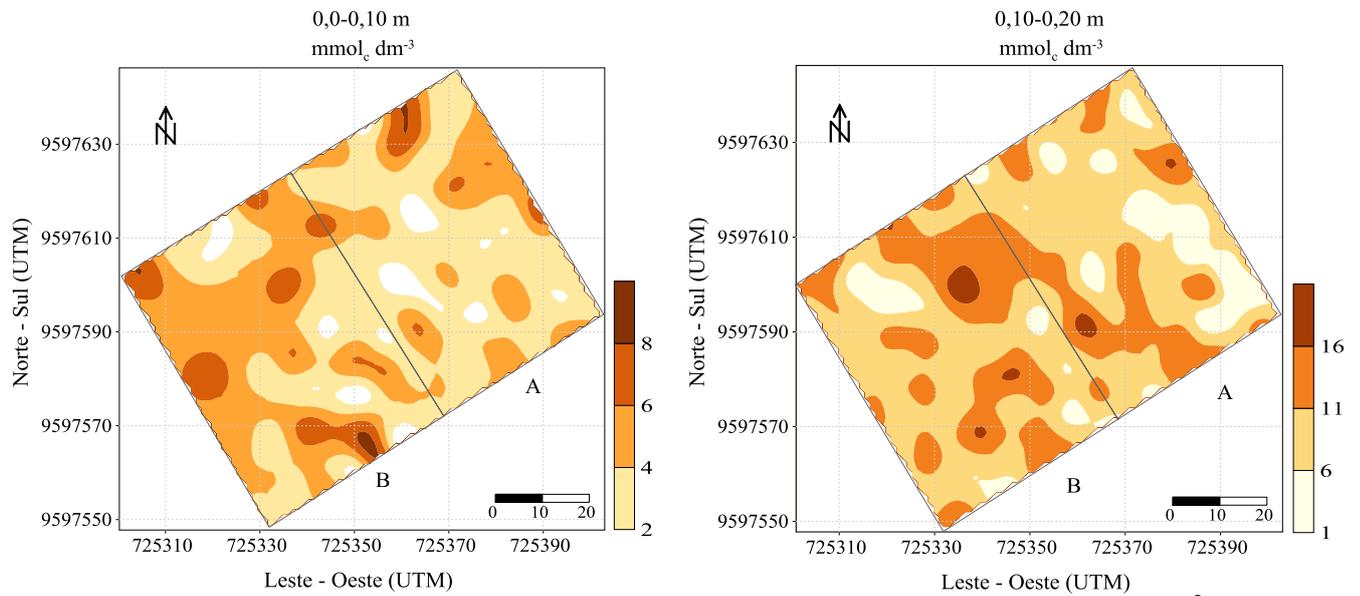
A acidez potencial por apresentar teores médios de  $59,55 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $83,51 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m (Figura 7), foi classificada como alta, segundo Alvarez et al. (1999). A acidez potencial está representada no solo pelo  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{+3}$  trocável, bem como por  $\text{H}^+$  ligado covalentemente aos colóides, que proporcionam ao pH abaixo de 5,0, uma maior atividade das formas tóxicas de alumínio e limita a disponibilidade de alguns nutrientes (Alves et al., 2004).



**Figura 7.** Mapas de isolinhas dos valores de acidez potencial ( $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

O alumínio trocável nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20m foi classificado como nível médio. Verificou-se que os teores mínimos e máximos variaram de 2,0 a  $8,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na profundidade 0,0-0,10 m e de 1,0 a  $18,00 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na profundidade de 0,10-0,20 m (Figura 8).

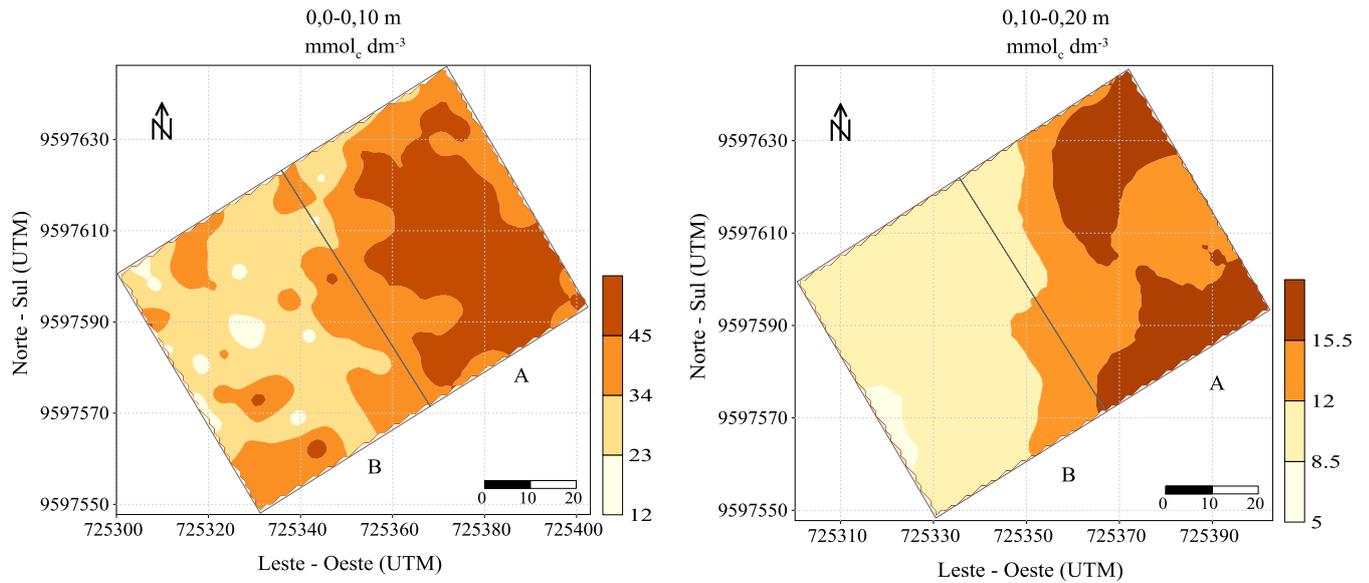
Verificou-se na zona A (Figura 8) baixa colaboração do alumínio para elevação da acidez potencial, segundo Malavolta (2006), a absorção de cátions e exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes das culturas, proporcionam à acidificação do solo em virtude da extrusão de  $\text{H}^+$  celular a solução do solo, conseqüentemente ocorrerá influência nos teores de acidez potencial. Esses resultados demonstram a necessidade de correção da acidez ativa e neutralização do alumínio trocável, proporcionando a elevação dos teores de bases no solo, que naturalmente encontram-se em baixas concentrações (Luchese et al., 2002).



**Figura 8.** Mapas de isolinhas dos valores de alumínio trocável ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

A soma de bases apresentou nas duas profundidades, uma maior concentração dos teores mais elevados na zona A (Figura 9), entretanto a profundidade de 0,0-0,10 m apresentou níveis mais elevados que variaram de 11,60 a 56,20  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  quando comparado com a profundidade de 0,10-0,20 m (5,00 a 19,60  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ). Com base nos valores médios, atribuiu-se a classificação de bom e baixo teor de soma de bases na profundidade de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, respectivamente.

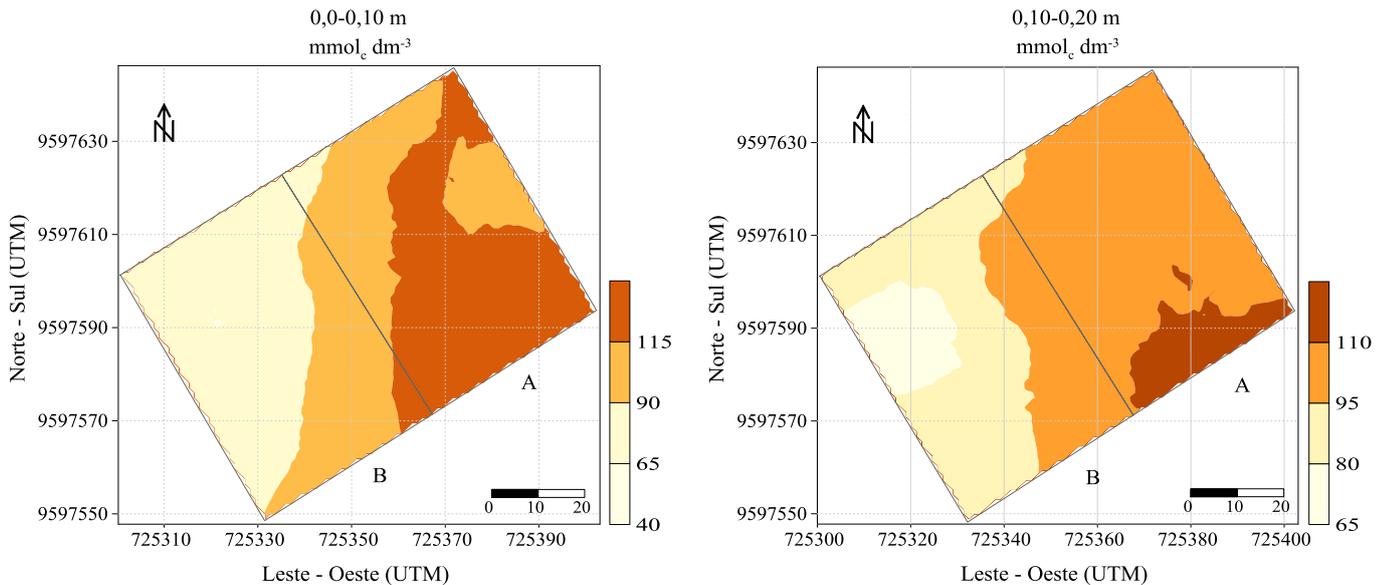
Os baixos valores da soma de bases na profundidade de 0,10-0,20 m atribuem-se principalmente a aplicação superficial dos insumos sem posterior incorporação ao solo, segundo Costa et al. (2007), teores reduzidos de bases trocáveis em profundidade é uma tendência apresentada principalmente em sistemas de plantio direto, uma vez que nessa região o efeito da calagem e ciclagem de nutrientes é menos intenso. Ao mesmo tempo, a interceptação radicular dos nutrientes ao longo do perfil do solo e a transferência desses elementos à superfície, mediante a deposição da biomassa produzida pelas leguminosas, possa ter contribuído para os teores encontrados na camada superficial do solo (0,0-0,10 m), conforme apresentado nos mapas correspondentes ao potássio, cálcio e magnésio (Figura 4,5 e 6, respectivamente).



**Figura 9.** Mapas de isolinhas dos valores de soma de bases ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

A capacidade de troca catiônica (Figura 10) nas duas profundidades foi classificada como boa, conforme a classificação proposta por Alvarez et al. (1999). Verificou-se na profundidade de 0,0-0,10 m valores mínimos e máximos de 40,50 a 140,10  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  e 55,00 a 132,00  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  na profundidade de 0,10-0,20 m.

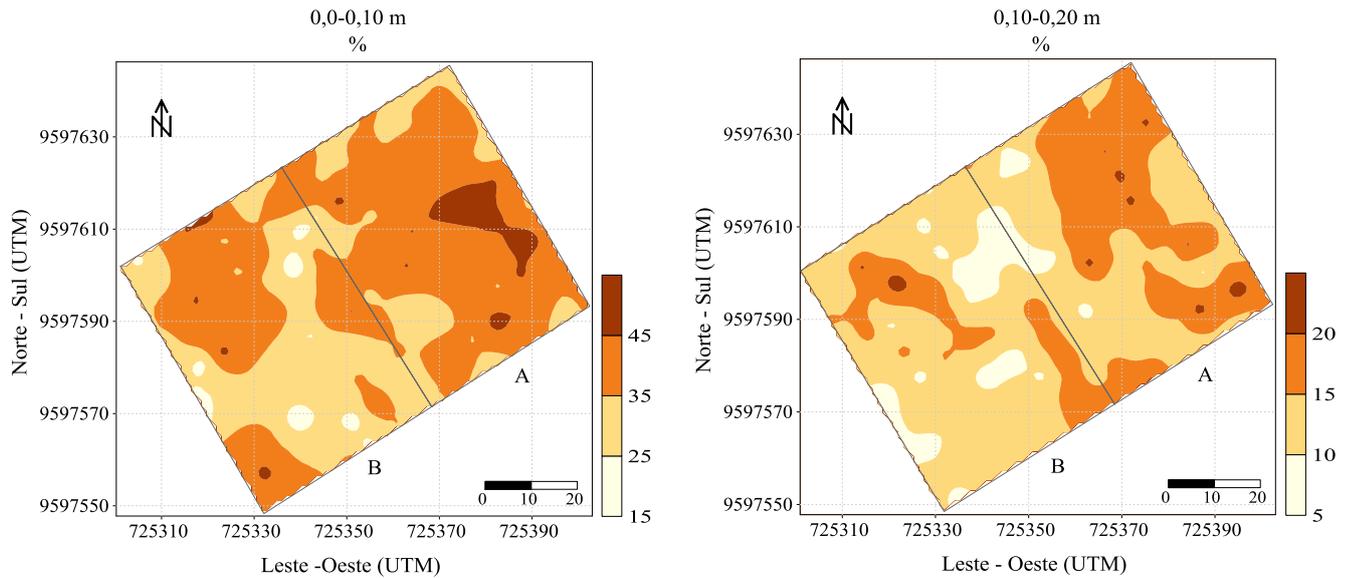
Os maiores valores da capacidade de troca catiônica apresentaram-se na região A nas duas profundidades, permitindo afirmar a forte influência do sistema de plantio direto na palha de leguminosas ao processo gradual de melhoria da fertilidade do solo, que por meio da biomassa depositada em superfície e reciclagem de nutrientes, reduz o emprego de *inputs* externos nos sistemas produtivos. No entanto, em virtude dos baixos teores de bases contidos no perfil do solo, é imprescindível a correção da acidez ativa e elevação das quantidades de cátions nas camadas subsuperficiais, uma vez que a aplicação desses elementos foi superficial e sem posterior incorporação.



**Figura 10.** Mapas de isolinhas dos valores de capacidade de troca catiônica (mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

Observou-se que na profundidade de 0,0-0,10 m (Figura 11), os teores mínimos e máximos de saturação por bases encontram-se entre 15,0 e 50,0% e na profundidade de 0,10-0,20 m teores de 5,40 a 23,40%, que por obter teores médios de 36,37% e 13,68% classificou-se, segundo Alvarez et al. (1999), como baixa e muito baixa, respectivamente. De acordo com Costa e Zocche (2009), a saturação por bases com níveis de classificação baixa a muito baixa revelam que a maior porcentagem de cargas negativas no complexo de troca está ocupada por H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup>.

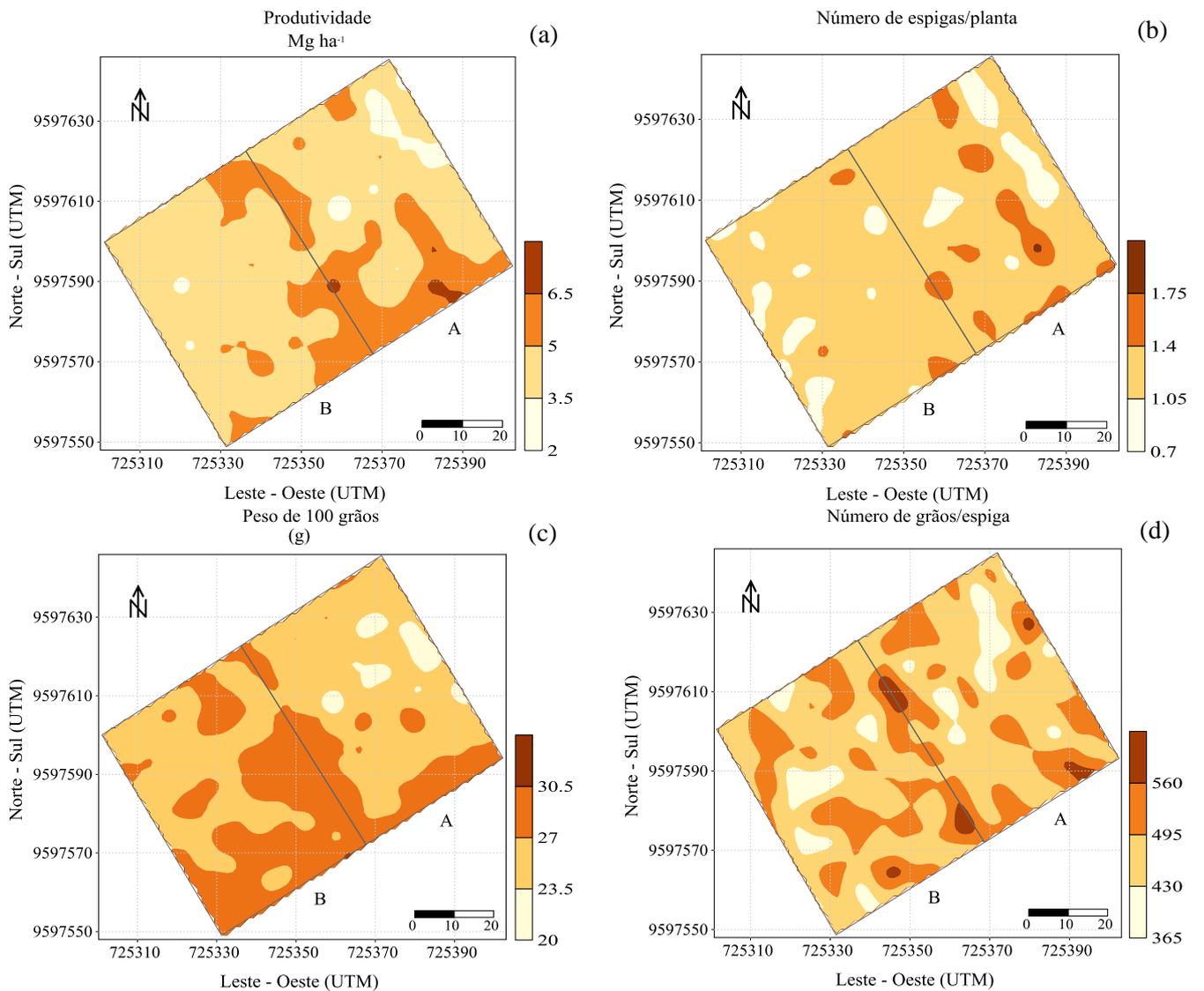
Verificou-se que a saturação por bases na profundidade de 0,0-0,10 m apresentou maior predominância dos teores entre 25 e 45%. No entanto, os teores mais predominantes na profundidade de 0,10-0,20 m foram de 10 a 15%.



**Figura 11.** Mapas de isolinhas dos valores de saturação por bases (%) nas profundidades de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, num Latossolo Amarelo distrocoeso.

A produtividade (Figura 12a) apresentou valores que variaram de 2,0 a 7,0 Mg ha<sup>-1</sup> e obteve uma produtividade média de 4,6 Mg ha<sup>-1</sup>, por sua vez a faixa mais representativa da produtividade foi observada entre os valores de 3,25 a 5,75 Mg ha<sup>-1</sup>.

Verificou-se que o número de espiga/planta (Figura 12b) e o peso de 100 grãos (Figura 12c) apresentaram variações de 1,05 a 1,4 espiga/planta e 23,5 a 27 gramas ao peso de 100 grãos, nos dois casos esses valores corresponderam à maior parte da área. Quanto ao número de grãos/espiga (Figura 12d) verificou-se uma média aproximada de 480 grãos e constatou-se que em grande parte da área valores que variaram de 430 a 495 grãos. Segundo Marques Júnior et al. (2000), a variação espacial dos rendimentos produtivos apresenta-se relacionada a variabilidade do solo, dessa forma é imprescindível identificar quais atributos exercem as maiores influências sobre as produções.



**Figura 12.** Mapas de isolinhas do rendimento produtivo do milho (a) produtividade, (b) número de espiga/planta, (c) peso de 100 grãos, (d) número de grãos/espiga num Latossolo Amarelo distrocoeso.

### 5.3 Análises de correlação entre a fertilidade e rendimento produtivo do milho

Verificaram-se correlações positivas e negativas entre o rendimento produtivo e os atributos químicos do solo, ao mesmo tempo, os coeficientes de correlação foram considerados baixos a 5% de probabilidade (Tabela 3). Apesar dos baixos coeficientes de correlação obtidos, Kitamura et al. (2007) ressaltam que, a baixa correlação entre dois atributos quaisquer não invalidam a hipótese da apreciável correlação espacial entre eles.

Constatou-se correlações positivas entre a produtividade e o fósforo ( $r = 0,11$ ), o potássio ( $r = 0,11$ ), o cálcio ( $r = 0,20$ ), a soma de bases ( $r = 0,18$ ), a capacidade de troca de cátions ( $r = 0,10$ ) e a saturação por bases ( $r = 0,13$ ). Esses resultados demonstram influente contribuição destas variáveis ao rendimento produtivo, com maior destaque ao cálcio, que em decorrência da calagem possibilita a neutralização dos íons  $H^+$  e  $Al^{+3}$ , proporcionando maior disponibilidade dos nutrientes às plantas.

Verificou-se correlação negativa entre a acidez potencial e o peso de 100 grãos ( $r = -0,11$ ). Esse resultado evidencia uma maior participação do alumínio trocável no complexo de troca do solo, principalmente em condições de baixos valores de pH, soma de bases e saturação por bases, comprometendo a disponibilidade dos nutrientes do solo, por conseguinte refletindo negativamente no rendimento produtivo.

**Tabela 3.** Matriz de correlação ( $r$ ) entre os atributos químicos do solo num Latossolo Amarelo distrocoeso e rendimento produtivo do milho.

	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC	V%
Prod.	0,02	0,11*	0,11*	0,20*	0,07	0,01	-0,01	0,18*	0,10*	0,13*
E/P	-0,11*	0,07	0,11*	0,20*	0,04	0,15	0,05	0,17*	0,21*	0,01
P100g	0,09	0,11*	0,11*	0,06	-0,05	-0,11*	-0,03	0,03	-0,08	0,10*
G/E	0,07	0,03	-0,03	0,12*	0,09	-0,05	-0,04	0,12*	0,02	0,14*

Prod.: Produtividade, P100g.: Peso de 100 grãos, E/P.: Número de espiga/planta, G/E.: Número de grãos/espiga, \* significativo a 5% de probabilidade pelo método de Pearson

.

.

## 6. CONCLUSÕES

O sistema de plantio direto na palha de leguminosa, por meio do processo cíclico e contínuo de deposição de resíduos proporcionou a elevação nos teores dos atributos químicos do solo na camada superficial em virtude da ciclagem de nutrientes, deste modo configura-se um processo alternativo e eficaz a melhoria da qualidade química do solo, possibilitando reduzir o emprego de *inputs* externos sem perdas nos rendimentos produtivos.

Os atributos químicos do solo e o rendimento produtivo apresentaram-se espacialmente correlacionados, com influente contribuição do cálcio, soma de bases, fósforo, potássio, saturação por bases e capacidade de troca catiônica ao rendimento produtivo do milho, por sua vez, com base nos teores contidos no solo, possibilita fornecer informações relevantes quanto às potencialidades e limitações do sistema produtivo.

Por fim, práticas sustentáveis de manejo associada ao entendimento do comportamento espacial da fertilidade dos solos, propicia um modelo produtivo mais eficiente, contribuindo estrategicamente para o processo de intensificação ecológica da agricultura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, A. C. F. et al. Nutrient recycling and physical indicator of an alley cropping system in a sandy loam soil in the Pre-Amazon region of Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 86, p. 189-198, 2010.

AKYEAMPONG, E.; HITIMANA, L. Agronomic and economic appraisal of alley cropping whit *Leucaena diversifolia* on an acid soil in the highlands of Burundi. **Agroforestry Systems**, v. 33, p. 1-11, 1996.

ALVAREZ, V. H. V.; GUARÇONI, M. A. Variabilidade horizontal da fertilidade do solo de uma unidade de amostragem em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 297-310, 2003.

ALVAREZ, V. V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C. et al. **Recomendações para o usos de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

ALVES, V. M. C. et al. Toxidez por alumínio e hidrogênio no crescimento de raiz de milho. **Revista Brasileira de milho e sorgo**. v. 3, p. 311-318, 2004.

AMADO, T. J. C. et al. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1101-1110, 2007.

AZEVEDO, D. M. P. et al. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Amarelo e distribuição do sistema radicular da soja sob diferentes sistemas de preparo no cerrado maranhense. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, p. 32-40, 2007.

BALASTREIRE, L. A. et al. Precision farming: Corn crop yield map. **Revista Engenharia Rural**, v. 8, p. 97-111, 1997.

BANNISTER, M. E.; NAIR, P. K. R. Alley cropping as a sustainable agricultural technology for the hillsides of Haiti: Experience of an Agroforestry outreach project. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 5, p. 51-59, 1990.

BAUHUS, J. et al. Is soil carbon a useful indicator of sustainable soil management - a case study from native Eucalypt forest of southeastern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 171, p. 59-74, 2002.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CARVALHO, D. B. et al. Fertilidade do solo em integração lavoura-pecuária na região de Guarapuava/PR. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 3, p. 57-65, 2005.

CARVALHO, J. R. P. et al. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CASSMAN, K. G. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 96, p. 5952-5959, 1999.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1329-1339, 2007.

CAVALCANTE, E. G. S. et al. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, p. 394-400, 2007.

COSTA, M. J. et al. Atributos químicos e físicos de um Latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 29, p. 701-708, 2007.

COSTA, S.; ZOCHE, J. J. Fertilidade de solos contruídos em área de mineração de carvão na região sul de Santa Catarina. **Revista Árvore**, v. 33, p. 665-674, 2009.

DALCHIAVON, F. C. **Aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com atributos químicos do solo sob plantio direto**. 2010. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

DI RIENZO, et al. **Infostat versão 2011**. Grupo Infostat, FCA, Universidade Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.

DIXON, J. A. et al. Farming Systems and poverty: Improving farmers Livelihoods in a changing world. **Food and Agriculture Organization and World Bank**, Rome and Washington, 2001.

DRINKWATER, L. E.; SNAPP, S. S. Nutrients in agroecosystems: Rethinking the management paradigm. **Advances in Agronomy**, v. 92, p. 163-186, 2007.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: 2013, 353 p.

EVENSON, R. E.; GOLLIN, D. **Crop variety improvement and Its effect on productivity: The impact of international agricultural research**. Wallingford, UK: [s.n.], 2003b. 522 p.

FAO. Sustainable Crop Production Intensification. **FAO**, 2013. Disponível em: <<http://www.fao.org/agriculture/crops/core-themes/theme/spi/scpi-home/en/>>. Acesso em: 18 Dezembro 2013.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision Agriculture and food security. **Science**, v. 327, p. 828-831, 2010.

GILLESPIE, A. R. et al. Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the mid-western USA. **Agroforestry Systems**, v. 48, p. 25-40, 2000.

GLIESSMAN, S. R. Agroecology: Ecological Processes in Sustainable Agriculture. **Lewis/CRC Press**, 1998. 357 p.

GOLDEN SOFTWARE. Surfer for Windows: Surface mapping system. Quick start guide Versão 11.0. Golden, 2012.60p.

GONTIJO, I. **Avaliação de atributos físicos em solos de cerrado sob cafeicultura em dois sistemas de manejo de plantas espontâneas, utilizando testes de hipóteses e geoestatística**. 2003. 82f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de plantas) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.169-177, 2005.

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v.2, p.19-33, 2006.

GRÜNEWALD, H. et al. Alley cropping as an alternative land use for post-mining sites. **Natur und Landschaft**, v. 80, p. 440-443, 2005.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004. 76 p.

HOCHMAN, Z. et al. Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. **European Journal of Agronomic**, v. 44, p. 109-123, 2013.

IAC. **Análises químicas para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285 p.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989. 561p.

KEATING, B. A. et al. Eco-efficient Agriculture: Concepts, Challenges, and Opportunities All rights reserved. **Crop Science**, v. 50, p. 109-119, 2010.

- KITAMURA, A. E. et al. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.361-369, 2007.
- KUMAR, K.; GOH, K. M. Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yields, and nitrogen recovery. **Advances in Agronomy**, v. 68, p. 197-319, 2000.
- LOURENÇO, R. W.; LANDIM, P. M. B. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 21, p. 150-160, 2005.
- LUCHESE, E. B. et al. **Fundamentos da química do solo: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002. 182 p.
- MACHADO, L. O. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio Convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 591-599, 2007.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 631p.
- MARQUES JÚNIOR, J. et al. Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de latossolos em áreas de cerrado sob cultivo de café, em Patrocínio, MG. In: Balastreire, L.A. (ed) **O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba: L.A. Balastreire, 2000. p.105-112.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v.58, p.1246-1266, 1963.
- MENDONÇA, E. S.; STOTT, D. E. Characteristics and decomposition rates of pruning residues from a shaded coffee system in Southeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 57, p. 117-125, 2003.
- MENEZES, R. S. C. et al. Microclimate and nutrient dynamic in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 56, p. 27-38, 2002.
- MOLIN, J. P. et al. Variação espacial na produtividade do milho safrinha devido aos macronutrientes e à população de plantas. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 6, p. 309-324, 2007.
- MONTEZANO, Z. F. et al. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 839-847, 2006.
- MOURA, E. G. et al. Growth and productivity of corn as affected by mulching and tillage in alley cropping systems. **Scientia Agricola**, v. 65, p. 204-208, 2008.

- MOURA, E. G. et al. Patents on perphety of the Amazon rainforest. **Recents Patents on Food Nutrition & Agriculture**, v. 1, p. 142-148, 2009a.
- MOURA, E. G. et al. Evaluating chemical and physical quality indicator for a structurally fragile Tropical soil. **Soil Use and Management**, v. 25, p. 368-375, 2009b.
- NELSON, G. C. et al. Food Security, Farming, and Climate Change to 2050: Scenarios, Results, Policy Options. **International Food Policy Research Institute**, Washimpton, 2010, 115 p.
- OELBERMANN, M. et al. Soil carbon and nitrogen dynamics using stable isotopes in 19- and 10-year-old tropical agroforestry systems. **Geoderma**, v. 130, p. 356-367, 2006.
- PAZ-GONZALEZ, A. et al. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. **Canadian Journal of Soil Science**, v.81, p.469-479, 2001.
- PAULETTI, V. et al. Evolução nos atributos químicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes métodos de preparo do solo. **Scientia Agraria**, v. 6, p. 9-14, 2005.
- ROBERTSON, G. P. GS+: GeoStatistics for the Environmental Sciences. GS+ User's guide. Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.
- RODRIGUES, S. M. et al. Spatial relationships between soil attributes and corn yield in no-tillage system. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 36, p. 599-609, 2012.
- ROSA, D. M. et al. Desempenho da cultura do milho implantada sobre resíduos culturais de leguminosas de verão em sistema plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, p. 1287-1296, 2011.
- ROZA, D. Novidade no Campo: Geotecnologias renovam a agricultura. **Revista InfoGEO**, n. 11, Jan/Fev, 2000. Disponível em: [http://www.infogeo.com.br/Revista/materia\\_11.htm](http://www.infogeo.com.br/Revista/materia_11.htm). Acesso em: 22 Janeiro 2014.
- SANTI, A. L. et al. Indicadores de qualidade e da expressão do potencial produtivo do solo sob sistema plantio direto - dados preliminares. **In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Recife. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2005.
- SCHILINWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem de solo no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 85-91, 2000.

SILVA, A. B. et al. Estoque de serapilheira e fertilidade do solo em pastagem degradada de *Brachiaria decumbens* após implantação de leguminosas arbustivas e arbóreas forrageiras. **Revista Brasileira Ciência do Solo**.v.37, p. 502-511, 2013.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L. H. G. Avaliação da variabilidade espacial de atributos químicos de um solo de perímetro irrigado de Petrolina, PE. **Agropecuária Técnica**, v. 27, p. 5-12, 2006.

SILVA, S. A. et al. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 1-8, 2010.

SOLOMON, S. et al. Climate Change: The Physical Science Basis. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, 2007, 996 p.

SOUZA, Z. M. et al. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para cultura da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 371-377, 2007.

SWIFT, M. J.; PALM, C. A. Evaluation of the potencial contribution of organic source of nutrients to crop growth. In: DUDAL, R.; ROY, R. N. **Integrated Plant Nutrition Systems**. [S.l.]: FAO, 1995. p. 171-180.

TILMAN, D. et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, p. 671-677, 2002.

TITTONELL, P.; GILLER, K. E. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. **Field Crops Research**, v. 143, p. 76-90, 2013.

VANCE, C. P. et al. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable. **New Phytologist**, v. 157, p. 423-447, 2003.

VIEIRA, S. R. et al. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVAREZ, V. V. H., et al. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 2, 2002. p. 1-45.

VIEIRA, S. R. et al. Variabilidade espacial dos teores foliares de nutrientes e da produtividade da soja em dois anos de cultivo em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1503-1514, 2010.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, p.1-53.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p. 319-344.

YOUNG, A. **Agroforestry for soil management**. New York, 1997. 320 p.

ZANÃO JÚNIOR, L. A. et al . Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, v. 57, p. 429-438, 2010.

ZANÃO JÚNIOR, L. A. et al. Variabilidade espacial do pH, teores de matéria orgânica e micronutrientes em profundidades de amostragem num Latossolo Vermelho sob semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 37, p. 1000-1007, 2007.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solo para fins de mapeamento de fertilidade do solo**. 2001. 114f. Tese (Livre Docência na Disciplina de Levantamentos de Solos e Fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Botucatu.

APÊNDICE



**Apêndice 1.** Ambiente de leucena após a poda lateral das galhadas, pastagem e plantas espontâneas após supressão química e mecânica (A); Ponto amostral georreferenciado e os pontos coletados para obtenção da amostra composta de solo (B).