



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ANTÔNIO ANIZIO LEAL MACEDO NETO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO
EM CULTIVO DE TECA NO NORDESTE PARAENSE**

BELÉM

2019

ANTÔNIO ANIZIO LEAL MACEDO NETO

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO
EM CULTIVO DE TECA NO NORDESTE PARAENSE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do curso de mestrado em Agronomia para a obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias.

Co-orientador: Prof. Dr. Gilson Sergio Bastos de Matos.

BELÉM

2019

ANTÔNIO ANIZIO LEAL MACEDO NETO

VARIABILIDADE ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO EM
CULTIVO DE TECA NO NORDESTE PARAENSE

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do curso de mestrado em Agronomia para a obtenção do título de mestre

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias
Coorientador: Gilson Sergio Bastos de Matos

Data de aprovação

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias - Presidente
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Prof^a. Dra. Suzana Romeiro Araújo – 1º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Dr. Antonio Vinicius Correa Barbosa – 2º Examinador
Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA

Dr. Javier Dias Pita – 3º Examinador
Instituto Federal do Pará - IFPA

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela graça da vida,

À toda minha família que sempre me ajudou e apoiou nas minhas decisões, sem eles nada seria. Em especial a minha sobrinha e filha Beatriz Macedo de Melo

À empresa Tietê Agrícola Ltda pelo financiamento da pesquisa

Ao meu orientador Professor Dr. Paulo Roberto Silva Farias e ao meu co-orientador e amigo Professor Dr. Gilson Sergio Bastos de Matos pela orientação e contribuição à minha formação profissional,

À Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e a todos os professores do programa, pelo apoio institucional, e pelos valiosos conhecimentos adquiridos,

E a todos os meus amigos de infância, de graduação, e que o mestrado me deu, por acreditarem e incentivarem na conclusão deste trabalho. Em especial Bruno Anhê, Grazielle Ribeiro, Jeane Leal, Artur Vinicius, Paulo Rezende Monteiro, Thiago Melo Souza, Raphael Assis e Emanuel Neto.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1. CONTEXTUALIZAÇÃO	11
REFERÊNCIAS.....	12
2. REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1. A Cultura da Teca	14
2.2. Manejo da teca.....	15
2.3. Silvicultura de precisão	16
2.4. Geoestatística.....	18
3. VARIABILIDADE ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO EM CULTIVO DE TECA NO NORDESTE PARAENSE	23
3.1. INTRODUÇÃO	23
4. METODOLOGIA	24
4.1. Local de estudo	24
4.2. Características e Manejo da área.....	24
4.3. Amostragem de solo	25
4.4. Análises Laboratoriais de Solo.....	28
4.5. Amostragem das variáveis dendrométricas	29
4.6. Potencial de produção	32
4.7. Estatística descritiva.....	32
4.8. Geoestatística.....	32
4.9. Softwares utilizados.....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1. Potencial de produção	34
5.2. Estatística Descritiva dos Atributos Químicos do Solo e da Produção de teca	34
5.3. Correlação entre as variáveis de solo e de produção.	36
5.4. Geoestatística.....	39
5.5. Variabilidade dos atributos químicos do solo e do volume	41
5.6. Variabilidade espacial das variáveis de produção	51

6. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS	54
ANEXO	64
APÊNDICE	65

Lista de ilustrações

Figura 1- Etapas de manejo para a implantação de uma floresta plantada de teca.	15
Figura 2- Semivariograma experimental.	20
Figura 3 - Modelos de semivariogramas experimentais.	21
Figura 4 - Mapa de localização da fazenda São Luiz, que produz teca no município de Capitão Poço – Pa, Brasil.	24
Figura 5 - Distribuição dos pontos de amostragem do talhão 07 (Fazenda São Luiz), município de Capitão Poço – Pa, Brasil.	26
Figura 6 - Raio de referência do erro do GPS para a coleta de amostras de solos.	27
Figura 7 - Amostragem e homogeneização de amostras de solo.	27
Figura 8 - Determinação do raio para inventário florestal.	29
Figura 9 - Medição do DAP a 1,5 m de altura da base da árvore no talhão 7 da fazenda são luiz, Nordeste Paraense.	29
Figura 10 - Suta mecânica – equipamento utilizado para a medição do DAP em plantio de teca no Nordeste Paraense.	30
Figura 11- Medição da altura total no talhão 7 da fazenda são luiz, no Nordeste Paraense.	30
Figura 12 - Clinômetro - Equipamento utilizado para a medição da altura total em um talhão de teca, no Nordeste Paraense.	31
Figura 13 – Distribuição do potencial de produção da teca, no talhão 07.	34
Figura 14 - Variabilidade espacial do Volume, pH, Ca e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no Município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	42
Figura 15 - Variabilidade espacial do Volume, Mg, K e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no Município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	43
Figura 16 - Variabilidade espacial do Volume, SB, V% e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	44
Figura 17 - Variabilidade espacial do Volume, P, MO e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	45
Figura 18 - Variabilidade espacial do Volume, Al, m% e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	46
Figura 19 - Variabilidade espacial do Volume, Al, m% e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	47
Figura 20 - Variabilidade espacial do Volume, T, t e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	48
Figura 21 - Variabilidade espacial do DAP, Altura Total e do Volume, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	52

Lista de tabelas

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo e das variáveis de produção, de uma área de plantação de teca de 10 anos no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	35
Tabela 2 – Correlação de Spearman dos atributos químicos do solo e das variáveis de produção em uma área de plantação de teca de 10 anos no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.....	38
Tabela 3 - Parâmetros geoestatísticos das variáveis do solo e de produção em uma área de plantação de teca de 10 anos no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.	40

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
ha	Hectare
%	Porcentagem
$y(h)$	Valor do semivariograma experimental em um intervalo de distância h
$n(h)$	Valores de pares de amostras em um intervalo de distância h
$Z(x_i), Z(x_i + h)$	Valores de amostras em dois pontos separados por uma distância h
$C1$	Variância Espacial
$C0$	Efeito Pepita
C	Patamar
h	Distância
d	Distância máxima
a	Alcance
a	Coefficiente Linear
b	Coefficiente angular
$Z(x_i)$	Valores observados
$Z^*(x_i)$	Valores estimados
ha	Hectare
Kg	Quilograma
P_2O_5	Pentóxido de fósforo
N	Nitrogênio
P	Fósforo
K	Potássio
KCL	Cloreto de Potássio
m	metros
pH	Potencial Hidrogeônico
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
K	Potássio
SB	Soma de Bases
Al	Alumínio
H+Al	Hidrogênio + Alumínio
Presina	Fósforo Resina
B	Boro
MO	Matéria orgânica
t	CTC efetiva
T	CTC a pH 07
m%	Saturação por alumínio
V%	Saturação por bases
NaOH	Hidróxido de Sódio

mol L^{-1}	Mol por litro
DAP	Diâmetro da Altura do Peito
Vtotal	Volume total
m^3	Metros cúbicos
π	Pi
Ht	Altura total
f	Fator de forma
Vreal	Volume real
Vcilindro	Volume do cilindro
PEpi	valor do percentil desejado
i	variável que se deseja obter o percentil a qual a mesma pertence
n	quantidade de elementos observados, ou número de amostras
N	Número de vizinhos medidos
λ_i	ponderadores aplicados a cada $Z(x_i)$
R^2	Coeficiente de determinação
K	Coeficiente K
CV	Coeficiente de variação
CaCl_2	Cloreto de Cálcio
$\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$	Centimol de carga por decímetro cubico
mg dm^{-3}	Miligrama por decimetro cúbico
g/kg	Gramas por quilograma

RESUMO

A *Tectona grandis* L.f é a espécie de maior importância econômica do gênero *Tectona*. Devido à redução de sua disponibilidade de forma natural, houve aumento na sua produção de forma plantada. Uma alternativa ao manejo homogêneo é o manejo variado, que pode ser implementado através da silvicultura de precisão. Uma ferramenta de precisão muito utilizada é a geoestatística. Na área de silvicultura de precisão a geoestatística é utilizada para determinar a variabilidade espacial de variáveis de interesse para o setor agrícola ou florestal. O conhecimento da variabilidade espacial tem por objetivo otimizar a utilização de insumos, de modo que esses possam ser aplicados mais adequadamente, sem que ocorra desperdícios. Objetivou-se com o trabalho gerar mapas de variabilidade espacial da fertilidade do solo e de produção da teca através da ferramenta geoestatística de modo a comprovar a aplicabilidade dessa ferramenta em suas práticas de manejo. O trabalho foi realizado na fazenda São Luiz, localizada no município de Capitão Poço – Pa, Brasil. A fazenda cultiva teca (*Tectona grandis*) há 20 anos. Para a coleta das amostras de solo e de produção foi tomada como referência uma grade de amostragem sistemática de 155 pontos georreferenciados. As 155 amostras coletadas foram enviadas para o laboratório, para a determinação de pH, Ca, Mg, K, Al, H+Al, P resina, B, e para o cálculo das variáveis; MO, t, T, m%, v% e SB, foi também determinada a granulometria das amostras. Para a produção as variáveis coletadas, através de inventário florestal, foram DAP e Altura total, que permitiram o cálculo do volume. As variáveis foram submetidas a teste de normalidade e transformação box-cox. Em seguida foram aplicadas técnicas geoestatística para a elaboração de mapas de variabilidade espacial. O volume das árvores variou de 0,21 a 0,59 m³. Os atributos químicos do solo; pH, K, H+Al, T, t, B, MO, V%, e as variáveis de produção DAP e a altura total apresentaram um CV menor que 30%. O restante das variáveis apresentaram CV acima de 30%. O K, P, MO, Al e m% não apresentaram distribuição normal. O pH se correlacionou positivamente com o Ca, Mg e K. As variáveis de produção se correlacionaram com P, MO e K. Foi possível adequar todas as variáveis do estudo em um dos três modelos de semivariograma. Após o ajuste dos semivariogramas foram feitos os mapas de krigagem das variáveis isoladas. Não foi encontrada uma relação entre as maiores observações de pH, Ca, Mg, K SB, V% e MO e os maiores valores da produção, nos mapas de variabilidade espacial. É possível observar uma tendência entre os maiores valores de P e os maiores valores da produção. A falta de relação entre a produção e algumas variáveis de fertilidade, pode estar relacionado a granulometria do solo. Além da relação entre valores de fertilidade e produção, foi possível relacionar espacialmente as variáveis de produção o que mostra que a geoestatística pode ser aplicada em outras áreas de manejo florestal. A geoestatística se mostrou adequada para ser usada em uma área florestal.

Palavras-chave: *Tectona grandis* L.f, Silvicultura de precisão, geoestatística.

ABSTRACT

Tectona grandis L.f is the most important economic species of the genus *Tectona*. Due to the reduction of its availability in a natural way, there was an increase in its production in a planted way. An alternative to homogeneous management is the varied management, which can be implemented through precision forestry. A widely used precision tool is geostatistics. In the area of precision forestry, geostatistics is used to determine the spatial variability of variables of interest to the agricultural or forestry sector. The knowledge of spatial variability aims to optimize the use of inputs, so that they can be applied more properly, without waste. The objective of this work was to generate maps of spatial variability of soil fertility and teak production through the geostatistical tool in order to prove the applicability of this tool in its management practices. The work was carried out at the São Luiz farm, located in the municipality of Capitão Poço - Pa, Brazil. The farm has grown teak (*Tectona grandis*) for 20 years. For the collection of soil and production samples, a systematic sampling grid of 155 geo-referenced points was taken as reference. The collected samples were sent to the laboratory for determination of pH, Ca, Mg, K, Al, H + Al, P, B, and for the calculation of the variables; OM, t, T, m%, v% and SB, the particle size of the samples was also determined. For the production the variables collected, through forest inventory, were DBH and total height, which allowed the calculation of the volume. The variables were submitted to normality test and box-cox transformation. Next, geostatistical techniques were applied for the elaboration of maps of spatial variability. The volume of trees varied from 0.21 to 0.59m³. The chemical attributes of the soil; pH, K, H + Al, T, t, B, OM, V%, and the DBH production variables and total height presented a CV lower than 30%. The rest of the variables presented CV above 30%. The K, P, OM, Al and m% had no normal distribution. The pH correlated positively with Ca, Mg and K. The production variables correlated with P, MO and K. It was possible to fit all variables of the study into one of the three semivariogram models. After the semivariograms were adjusted, the kriging maps of the isolated variables were made. No relationship was found between the highest pH, Ca, Mg, K SB, V% and OM and the highest production values in the spatial variability maps. It is possible to observe a trend between the highest P values and the highest production values. The lack of relationship between production and some fertility variables may be related to soil granulometry. In addition to the relationship between fertility values and production, it was possible to spatially relate production variables, which shows that geostatistics can be applied in other areas of forest management. Geostatistics proved to be suitable for use in a forested area.

Keywords: *Tectona grandis* L.f, Precision forestry, geostatistics.

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A teca (*Tectona grandis* L.f) possui uma área plantada no Brasil de cerca de 67.329 ha, o que representa 0,93% da produção florestal no País. Desse total 32,6% é cultivado na Região Norte e 67,4% na Região Centro-Oeste (ABRAF, 2013).

Mesmo representando uma pequena porcentagem da produção florestal Brasileira, pesquisas voltadas a essa espécie florestal são de grande importância, seja por questões ambientais ou devido o seu potencial produtivo na região.

Em relação às questões ambientais, a produção florestal está ligada ao sequestro de carbono, por meio do reflorestamento de áreas antropizadas (ALMEIDA; CAMPELO JÚNIOR; FINGER, 2010). Outro fator ambiental é a questão do uso comercial da floresta plantada como alternativa às florestas naturais de teca. Segundo a literatura a exploração de áreas naturais de teca, em suas regiões de origem, tem diminuído a sua disponibilidade e o seu cultivo de forma plantada tem aumentado (PANDEY; BROWN, 2000; KEOGH, 2013).

Além dos fatores ambientais, a plantação de teca tem, também, atrativos comerciais, sua madeira possui uma grande qualidade de durabilidade, resistência a pragas e é muito utilizada para a fabricação de pontes e embarcações (KEOGH, 2013).

A redução do ciclo produtivo da teca de 80 anos para 25 anos em outras regiões, em comparação a sua região de origem, é outro atrativo para a sua produção em continentes que não o Asiático (sua região de origem) (COSTA, 2011).

Para garantir a sustentabilidade de florestas plantadas, é necessária a utilização de modernas técnicas de manejo, seja para o uso de insumos ou para a administração dos produtos gerados pelo seu cultivo (GIL et al., 2018; LIMA et al., 2017).

Uma dessas técnicas é a silvicultura de precisão que, segundo Taylor et al. (2006) tem como definição “planejamento e condução de manejo florestal de atividades e operações locais para a melhora de qualidade e utilização de produtos da madeira, redução de desperdício, aumento dos lucros e manutenção da qualidade do ambiente”.

Como pode ser observado, a silvicultura de precisão segue alguns preceitos da agricultura de precisão, que para a Comissão Brasileira de Agricultura de precisão o termo “Agricultura de Precisão” tem como definição “um sistema de gerenciamento agrícola baseada na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente” (BRASIL, 2014).

Uma ferramenta de precisão muito utilizada é a geoestatística. Através dela é possível fazer inferências espaciais de valores não observados, através de valores observados, de atributos de importância para a produção florestal e, dessa forma, produzir mapas de variabilidade espacial que permitem a facilidade no manejo de florestas plantadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013; VASU et al., 2017; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Baseado no exposto tem-se como hipóteses:

Ocorre variabilidade espacial nos parâmetros de fertilidade do solo e produção no cultivo da teca;

A geoestatística é uma ferramenta que pode ser aplicada em áreas de produção florestal.

Objetivos;

Geral:

Gerar mapas de variabilidade espacial da fertilidade do solo e da produção de floresta plantada de teca através da ferramenta geoestatística de modo a comprovar a aplicabilidade dessa ferramenta em suas práticas de manejo.

Específicos:

- Produzir mapas de variabilidade espacial da fertilidade do solo e de produção;
- Relacionar as variáveis de solo com as de produção.

REFERÊNCIAS

ABRAF (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas). **Anuário estatístico da ABRAF 2013**. Brasília. 2013. 142 p.

ALMEIDA, E. M.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; FINGER, Z. DETERMINAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO EM TECA (*Tectona grandis* L. F.) EM DIFERENTES IDADES. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, p. 559-568, out.-dez., 2010.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de Precisão 2014/ 2030**. Desenvolvimento Brasília: Mapa/ACS, 2014. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologiaagropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/agenda-estrategica-do-setor-deagricultura-de-precisao.pdf>. Acesso em: 22 março 2019.

COSTA, K. L. **CRESCIMENTO DE TECTONA GRANDIS (TECA) EM SISTEMA SILVICULTURAL DE TALHADIA COMPOSTA EM MINAS GERAIS**. 2011. 77 F. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

Gil, R.L.; Lansanova, L.R.; Chig, L.A.; Almeida Garrett, A.T.; Oliveira, R. V, Oliveira Filho, P. C.; Ferreira, K.R. MODELLING SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES IN *TECTONA GRANDIS* STANDS IN CENTRAL-WEST

BRAZIL. **Journal of Tropical Forest Science**, Malásia, V. 30, p 376 – 383, Nov. 2018.

KEOGH, R. M. La teca y su importância económica a nivel mundial. In: CAMINO, R.; MORALES, J. P. **Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades**. Turrialba: CATIE, 2013. p. 8 – 28.

LIMA, E. S.; MONTANARI, R.; LOVERA, L. R.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GONZÁLEZ, A. P. Variabilidade espacial das propriedades dendrométricas do eucalipto e atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 4, n. 1, p. 1-11, jan./mar. 2017.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F.; **AGRICULTURA DE PRECISÃO**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos; 2015. 238 p.

PANDEY, D.; BROWN, C. Teak: a global overview. **Unasyuva**, Fao, v. 51, n. 201, p.3-13, 2000.

TAYLOR, S. E.; MCDONALD, T. P.; FULTON, J. P.; SHAW, J. N.; CORLEY, F. W.; BRODBECK, C. J. **Precision forestry in the southeast U.S.** In: INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY SYMPOSIUM, 3., 2006, South Africa Proceedings. 2006. p. 397-414.

VASU, D.; SINGH S. K.; SAHU, N.; TIWARY, P.; CHANDRAN, P.; DURAISAMI, V. P.; RAMAMURTHY, V.; LALITHA, M.; KALAISELVI, B. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. **Soil & Tillage Research**, v. 169, p. 25 – 34, Jun. 2017.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **GEOESTATÍSTICA: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 216. p.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1.A Cultura da Teca

O gênero *Tectona*, é formado por 4 espécies florestais: *T. grandis* L. f., *T. hamiltoniana* Wall, *T. philipinensis* e *T. abludens*. Dessas a *Tectona grandis* L.f é a espécie de maior valor econômica (UGALDE ARIAS, 2013 apud BASSO, 2016). Pertencente a família Lamiaceae, a teca possui grande importância econômica devido a variabilidade de uso e grande qualidade da sua madeira, que possui propriedades físico-mecânicas desejáveis. Além disso, essa árvore apresenta robustez e desenvolvimento vigoroso. A madeira de teca está ligada na produção de móveis, elementos estruturais e uso marinho. Ela é muito utilizada na fabricação de pontes e embarcações. Sua madeira possui, também, resistência natural a pragas (KEOGH, 2013; CALDEIRA; OLIVEIRA, 2008).

A teca ocorre de forma natural em apenas 4 países da Ásia: Índia, Laos, Myanmar e Tailândia. Em 2010, o total de floresta natural de teca foi estimado em 29 milhões de hectares (KOLLERT; CHERUBINI, 2012). Apesar de grande reserva de floresta natural, as áreas de teca diminuíram, em seus países de origem, ao longo dos anos. Vários podem ser os motivos atribuídos à diminuição dessas florestas naturais como a exploração madeireira (legal e ilegal), expansão da agricultura, pressão do crescimento populacional e aumento das áreas de pastagens (KHAINING et al., 2017).

Uma alternativa a exploração das florestas naturais de teca, é a utilização da floresta plantada. O interesse no cultivo de *Tectona grandis*, tem aumentado em relação a sua exploração natural, o que levou, inclusive, ao seu cultivo em outros continentes, como Oceania, África e América. Hoje as plantações de teca são responsáveis por mais de 80% do fornecimento de sua madeira (PANDEY; BROWN, 2000; KEOGH, 2013).

No Brasil, a teca é plantada em três estados, Mato Grosso, Pará e Roraima. A espécie foi introduzida no País na década de 60, no município de Cárceres-MT. No ano de 2012 o total de área plantada de teca foi de 67.329 ha, sendo a região Norte responsável por 32,6% e a região Centro-Oeste por 67,4% da produção de teca (ABRAF, 2013; TSUKAMOTO FILHO et al., 2003).

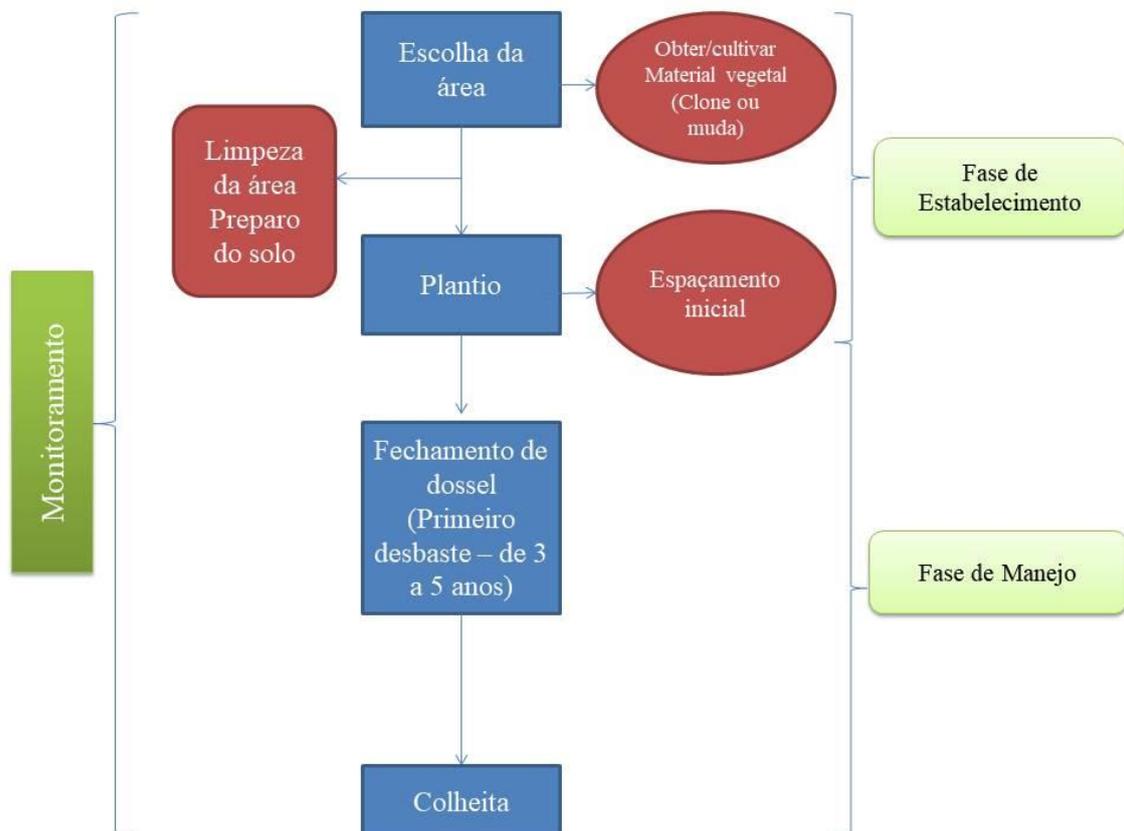
A vantagem de se produzir teca na América Latina é a redução no seu ciclo de produção, que nas suas áreas de origem leva, em média, 80 anos, enquanto que, no continente latino esse ciclo cai para 25 anos (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003; COSTA, 2011).

2.2. Manejo da teca

O manejo da teca plantada possui duas fases principais, a fase de estabelecimento e a fase de manejo (JEREZ –RICO; COUTINHO, 2017).

A fase de estabelecimento engloba os estágios de escolha da área, escolha de material vegetal, preparo e limpeza do solo, espaçamento, plantio e termina após o fechamento de dossel das árvores e da realização do primeiro desbaste, que pode ser feito a partir do terceiro ano (Figura 1) (MONTENEGRO; KOTMAN; CAMINO, 2013).

Figura 1- Etapas de manejo para a implantação de uma floresta plantada de teca.



Fonte: JEREZ –RICO & COUTINHO, 2017.

Na fase de manejo estão inseridos os estágios de poda, desbaste, além do controle de pragas e prevenção de incêndios, até a época de colheita (FIGUEIREDO, 2015).

Em relação às práticas de adubação, essa deve ser levada em conta desde a fase de viveiro, uma vez que as mudas de teca apresentam bom desenvolvimento quando fertilizadas desde jovens. Após ter as mudas transplantadas para campo, a floresta plantada de teca também deve ser fertilizada (ALVARADO, 2012).

Essas adubações são feitas de forma homogênea, onde se aplica a mesma quantidade de adubo em todo o talhão. Esse tipo de prática pode acarretar em desperdícios uma vez que, pode-se estar aplicando o fertilizante em uma área que não necessita desse insumo, já que a heterogeneidade da área não é levada em conta (ALVARADO, 2012; ALVARADO et al., 2014).

Uma alternativa para o manejo de forma homogênea são as aplicações em taxa variável, onde é feita a aplicação do insumo de acordo com demandas locais evidenciadas por mapas, que são gerados a partir de técnicas de agricultura de precisão, que estão sendo cada vez mais usadas no Brasil (COLAÇO; MOLIN, 2015).

2.3.Silvicultura de precisão

A Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão definiu o termo “Agricultura de Precisão” como “um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente” (BRASIL, 2014).

Desde o início do século XX existem relatos do manejo de lavouras de maneira regionalizada, mas foi nos anos 80 que um grupo de pesquisadores americanos começou a analisar a variabilidade espacial presente em lavouras. Esse movimento deu origem ao que hoje é chamada de Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

No Brasil, as primeiras atividades relacionadas à agricultura de precisão tiveram início na década de 90, através da importação de máquinas agrícolas que estavam relacionadas com a produção de mapas de produtividade e a aplicação em taxa variável. A silvicultura e a zootecnia de precisão foram inseridas, no país, no início dos anos 2000, seguindo preceitos parecidos aos da agricultura de precisão, porém com características próprias (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015; PITA, 2012).

Taylor et al. (2006) afirmam que, como há diferenças entre os produtos gerados na indústria florestal e na agricultura, nem todos os conceitos de agricultura de precisão se aplicam a área florestal. Em função disso os autores definem silvicultura de precisão como “planejamento e condução de manejo florestal de atividades e operações locais para a melhora de qualidade e utilização de produtos da madeira, redução de desperdício, aumento dos lucros e manutenção da qualidade do ambiente”.

Na área de silvicultura as técnicas de precisão podem ser aplicadas em diversas áreas, como a amostragem em grades, onde esta deve estar localizada espacialmente,

para a aplicação de fertilizantes em taxa variável, ou para o manejo de outra variável de interesse para o plantio florestal, como por exemplo, variáveis de produtividade, infestação de ervas daninhas, doenças ou pragas e, desse modo, buscar a melhor utilização de seus insumos para o aumento de sua produtividade (SANTOS et al., 2017; MAEDA et al., 2014; COLAÇO; MOLIN, 2015; MAPA, 2013).

Koch e Koshla (2003) afirmam que o monitoramento de produção e a aplicação em taxa variável correlacionada à variabilidade espacial de nutrientes do solo têm sido os componentes de práticas precisão mais utilizados.

O primeiro passo a ser tomado para a aplicação de técnicas de precisão deve ser o levantamento de dados (INAMASU; BERNARDI, 2014). A amostragem, em agricultura de precisão, ocorre de três formas. Amostragem em grade por ponto, amostragem em grade por célula e amostragem direcionada Colaço e Molin (2015).

Na amostragem em grade é gerada uma grade de espaçamento regular, que é o mais difundido no Brasil para coleta de dados de fertilidade e produção, divide-se a área em polígonos e, no centro ou em algum ponto aleatório desse polígono é coletado um ponto de amostragem (GIMENEZ; ZACANARO, 2012).

Yamamoto e Landim (2013) afirmam que a amostragem regular, onde o ponto é coletado no centro da célula, é mais precisa que a aleatória. Lundgren; Silva e Ferreira (2016) obtiveram uma melhor estimativa de variabilidade espacial em áreas de Eucalipto através da amostragem aleatória.

Caon e Genú (2013) mostraram que a aplicação da amostragem variada oferece vantagens sobre a amostragem convencional, uma vez que ela evidencia as diferenças locais de determinada variável.

Outro método de amostragem é o que se divide o talhão em células e nessas divisões, são coletadas as amostras de solo em zig-zag. Nesse tipo de coleta, a média de amostragem em cada célula é considerado o valor encontrado, para a variável em estudo, como a representativa daquela subdivisão. Nesse tipo de amostragem não é aplicada nenhuma interpolação, como é feito na amostragem em pontos (MOLIN; AMARAL; COLAÇO 2015).

Na amostragem direcionada, esta é realizada de acordo com mapas pré-determinados de uma área de estudo, onde se busca estudar as áreas de melhor produtividade. Nesse tipo de amostragem utiliza-se registro de dados já existentes na área (RESENDE; COELHO, 2017).

Após a coleta de dados, é possível fazer a interpretação dos mesmos, para que seja possível realizar a tomada de decisão de como proceder na intervenção através da silvicultura de precisão (INAMASU; BERNARDI, 2014).

A intervenção, por meio da silvicultura de precisão, é possível devido o fato dessas informações estarem geograficamente localizadas, o que permite o uso de tecnologias SIG (Sistemas de informação Geográfica) no auxílio da interpretação e intervenção de dados coletados, através de hardwares e softwares existentes nesse sistema (TREVISAN; MOLIN, 2015). Esse tipo de prática é possível graças ao sistema GPS (Sistema de Posicionamento Global) que permite a obtenção da localização de um objeto através do uso de satélites (MAPA, 2013; FITZ, 2008).

2.4. Geoestatística

Uma ferramenta de precisão muito utilizada é a geoestatística. Essa ferramenta é usada para inferir propriedades de um fenômeno espacial em estudo, ela caracteriza espacialmente uma variável através de sua distribuição no espaço. O fenômeno espacial é o conjunto de todos os valores possíveis da variável de interesse, que define a distribuição de sua variabilidade dentro de um domínio 2D ou 3D. Ou seja, a geoestatística tem como objetivo, representar áreas não amostradas a partir de áreas amostradas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

O conhecimento da variabilidade espacial tem por objetivo otimizar a utilização de insumos, de modo que esses possam ser aplicados mais adequadamente, sem que ocorra desperdícios. O produto gerado por essa técnica é através de mapas, que permitem a visualização do comportamento de variáveis de interesse, de modo que seja possível maneja-las de forma localizada (VASU et al., 2017; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

O estudo da variabilidade espacial começou na década de 50, através do trabalho de Daniel G. Krige, que determinou, ao trabalhar com concentrações de ouro, que sua relação espacial deveria ser levada em conta, para que fosse possível observar relações em suas variâncias (FARIAS et al., 2002).

Na década de 60, foi quando a geoestatística começou a ser assim chamada, quando o engenheiro francês, Georges Matheron incorporou os princípios da estatística clássica aos de Krige e criou o conceito de variável regionalizada, que determina que a aleatoriedade na variação das medições de um atributo esta relacionada a sua localização no espaço (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

O primeiro passo a para a aplicação da geoestatística é a amostragem. No caso da geoestatística as amostragens utilizadas são, em grade regular ou em grade aleatória. O objetivo da amostragem é o de representar ao máximo possível o comportamento de uma variável em estudo (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Segundo Colaço e Molin (2015) o número recomendado de amostras é o de 1 por hectare, para que se possa ter uma boa representatividade da área. Hoje utiliza-se, em média, de 0,3 a 0,5 amostras por hectare o que não é recomendado devido a baixa representatividade da área.

Quanto maior o N amostral, melhor a representatividade que irá se obter de uma determinada área de estudo. Souza et al. (2014) recomendam que o número de amostragens seja superior a 100 pontos, para a produção de mapas de variabilidade do solo, através da geoestatística.

Após a realização da amostragem é possível realizar o ajuste de semivariograma, que são os modelos matemáticos que permitem a elaboração da variabilidade espacial de uma dada variável. O semivariograma se baseia em três elementos; na variância espacial (C_1) efeito pepita (C_0) e alcance (a). Os modelos de semivariogramas mais utilizados nas ciências de terra são; esférico, gaussiano e exponencial e servem de base para a geração de mapas de variabilidade espacial (GREGO; OLIVEIRA, 2015). A variância entre os pontos é determinada de acordo com uma distância (h). Em pontos próximos a distância é pequena e a variância alta. A medida que a distância entre pontos aumenta a variância tende a diminuir (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

O semivariograma é calculado de acordo com a seguinte equação matemática (FARIAS et al., 2002):

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

Onde:

y(h): Valor do semivariograma experimental em um intervalo de distância h ;

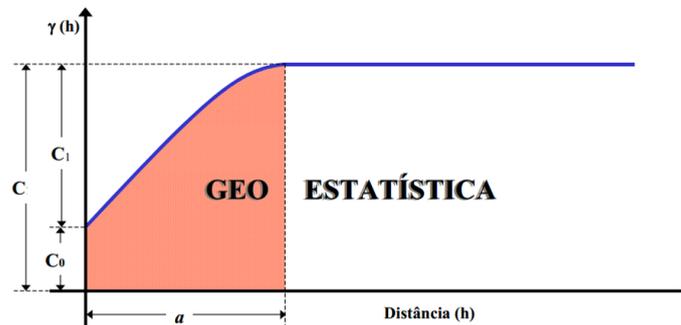
n(h): Valores de pares de amostras em um intervalo de distância h ;

Z(xi), Z(xi + h): Valores de amostras em dois pontos separados por uma distância h .

A etapa mais importante da geoestatística é o ajuste de semivariograma, pois ele mostra como uma variável se comporta (Figura 2). À medida que a semivariância ($C_1 + C_0 = C$) aumenta o alcance também cresce até atingir um valor máximo. Esse valor

máximo é o patamar e, a partir dele o gráfico se estabiliza, não podendo mais ser explicado pela geoestatística (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Figura 2- Semivariograma experimental.



Fonte: Guerra (1988).

Esquemáticamente a figura 2 pode ser explicada da seguinte forma (SANTOS; OLIVEIRA, 2016):

Alcance (a): Com o aumento da distância entre os pares, sua variabilidade aumenta até determinado nível. A distância onde esse variograma atinge esse nível é denominado alcance, ou “range”.

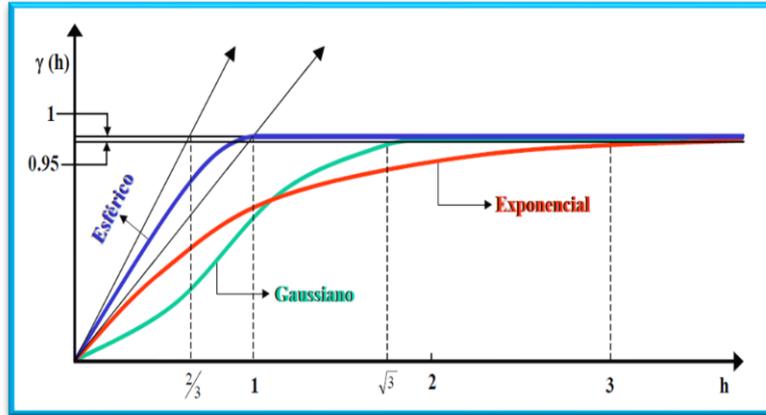
Patamar (C): Representa o nível de variabilidade onde o variograma se estabiliza. Também é denominado “Sill”.

Variância espacial (C1): É a diferença espacial entre os valores de uma variável, tomada em dois pontos separados por distâncias cada vez maiores.

Efeito pepita (C0): Em distâncias iguais a zero ($h=0$), o variograma deveria apresentar variabilidade nula. Entretanto, devido vários fatores, como o erro amostral, erro de medidas, ou a microrregionalização da variável em análise, causa descontinuidade na origem do variograma, que é denominado efeito pepita ou “nugget effect”.

De acordo com o comportamento do semivariograma, um dos três modelos mais utilizados nas ciências da terra deve ser escolhido (GREGO; OLIVEIRA, 2015). Esses modelos são; exponencial, esférico e gaussiano (Figura 3):

Figura 3 - Modelos de semivariogramas experimentais.



(Fonte: RENDU, 1978).

Segundo Vieira et al. (1983) os três modelos são obtidos da seguinte forma:

Exponencial:

$$y(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a_0}\right) \right] \quad 0 \leq h \leq d$$

Onde d é a distância máxima sobre a qual o semivariograma é definido. O parâmetro a_0 é obtido pela tangente aos pontos próximos à origem, interceptando o eixo y na C_0 . À distância, a_0 à qual a linha tangente alcança o patamar é aproximadamente $a_0 = a/3$, onde a é o alcance. Ao contrário dos modelos esféricos e lineares, o exponencial atinge o alcance apenas assintoticamente.

Esférico:

$$y(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \frac{h}{a} - \frac{1}{2} \frac{h}{a}^3 \right] \quad 0 \leq h \leq a$$

$$y(h) = C_0 + C_1 \quad h \geq a$$

O modelo esférico é obtido primeiro pela seleção dos valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, $C_0 + C_1$. Em seguida, uma linha que intercepta o eixo y em C_0 e tangente aos pontos próximos da origem alcançará o patamar a uma distância $a' = \frac{2}{3} a$. Portanto o alcance será $a = \frac{3a'}{2}$. O modelo esférico se comporta de forma linear a aproximadamente $\frac{1}{3} a$.

Gaussiano:

$$y(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-h^2/a_0^2)]$$

O parâmetro a_0 está relacionado ao alcance por $a_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} a$, onde o alcance, a , obtido visualmente como a distância após a qual o variograma experimental se torna estável.

Os modelos de semivariogramas selecionados podem ser validados através de diversas técnicas. Duas dessas técnicas são o Coeficiente de determinação (R^2) e a validação cruzada (GREGO; OLIVEIRA, 2015; BHUNIA; SHIT; CATHOPADHYAY, 2018).

A validação cruzada tem por objetivo estimar o valor de cada amostra observada através do semivariograma que foi ajustado e, desse modo calcular uma regressão linear entre os valores estimados e observados (VIEIRA; CARVALHO; GONZÁLEZ, 2010; PELISSARI, 2012). Isso é possível através da seguinte equação:

$$Z^*(x_i) = a + bZ(x_i)$$

Onde a é o intercepto, b é a inclinação, $Z(x_i)$ os valores observados e $Z^*(x_i)$ os valores estimados. Para um ajuste ideal o coeficiente linear (a) deve ser igual a 0 e o coeficiente angular (b) igual a 1 (PELISSARI et al., 2012).

De posse do modelo de semivariograma que melhor se adequa ao estudo é possível fazer a krigagem, que consiste na estimação de valores não observados, a partir de valores observados e, desse modo, realizar a variabilidade espacial (GREGO; OLIVEIRA, 2015).

Na área de agricultura de precisão, ou silvicultura de precisão, a geoestatística é utilizada para determinar a variabilidade espacial de variáveis de interesse para o setor agrícola ou florestal. Essas variáveis podem ser de fertilidade, nutrição foliar, produtividade, ou de qualquer outra que seja de interesse dos dois setores (SILVA et al., 2010; SILVA; LIMA, 2012; LIMA et al., 2016; VASU et al., 2017).

A aplicação de insumos em dose variada permite que se aplique o mesmo de acordo com a necessidade da cultura, além de permitir que ocorra a redução de desperdícios o que torna a prática ambientalmente vantajosa (PITA, 2012; COLAÇO, 2012; PIRES et al., 2014).

3. VARIABILIDADE ESPACIAL DA FERTILIDADE DO SOLO E PRODUÇÃO EM CULTIVO DE TECA NO NORDESTE PARAENSE

3.1.INTRODUÇÃO

A implantação de florestas plantadas tem se mostrado uma alternativa para o mercado florestal, devido à redução da disponibilidade de produtos florestais de forma natural, em função de sua grande exploração. A teca (*Tectona grandis* L. f.) é uma espécie que se encontra nesse contexto. Além do aumento do seu cultivo de forma plantada, ela também passou a ser implantada em outras regiões, como os continentes da Oceania, África e América (PANDEY; BROWN, 2000; KEOGH, 2013).

Os trabalhos a respeito dos métodos de adubação em floresta de teca mostram que as práticas de manejo de suas florestas são sempre realizados de forma homogênea, aplicando-se a mesma quantidade de insumo para toda uma área, ou a mesma quantidade ao pé da planta (ALVARADO, 2012).

Visando o manejo dessas florestas de forma sustentável, deve-se levar em conta a variabilidade de suas áreas de produção. Uma ferramenta utilizada nas práticas de manejo variado é a silvicultura de precisão, que tem por definição “planejamento e condução de manejo florestal de atividades e operações locais para a melhora de qualidade e utilização de produtos da madeira, redução de desperdício, aumento dos lucros e manutenção da qualidade do ambiente” (TAYLOR et al., 2006).

Várias são as ferramentas que podem ser utilizadas na área de precisão que podem ser implantadas na área florestal como a geoestatística. Através dessa ferramenta é possível produzir mapas de variabilidade espacial de diversos recursos que podem ser manejados para a melhoria do manejo florestal, como por exemplo, mapas geoestatísticos de solos, que permitem o seu manejo de forma localizada de modo a se buscar a eficiência do uso de insumos (YAMAMOTO; LANDIM, 2013; COLAÇO; MOLIN, 2017).

Além disso a geoestatística permite a produção de mapas de variabilidade espacial de indicadores de desenvolvimento do cultivo florestal, como o Diâmetro da Altura do Peito (DAP), Altura Total e Volume, permitindo, assim, analisar a variabilidade do crescimento de uma floresta plantada (SANTOS et al., 2017; PELISSARI et al., 2012).

Objetivou-se, com esse trabalho, produzir mapas de variabilidade espacial da fertilidade do solo, bem como de variáveis de produção de teca através da ferramenta

geoestatística de modo a comprovar a aplicabilidade dessa ferramenta em suas práticas de manejo.

4. METODOLOGIA

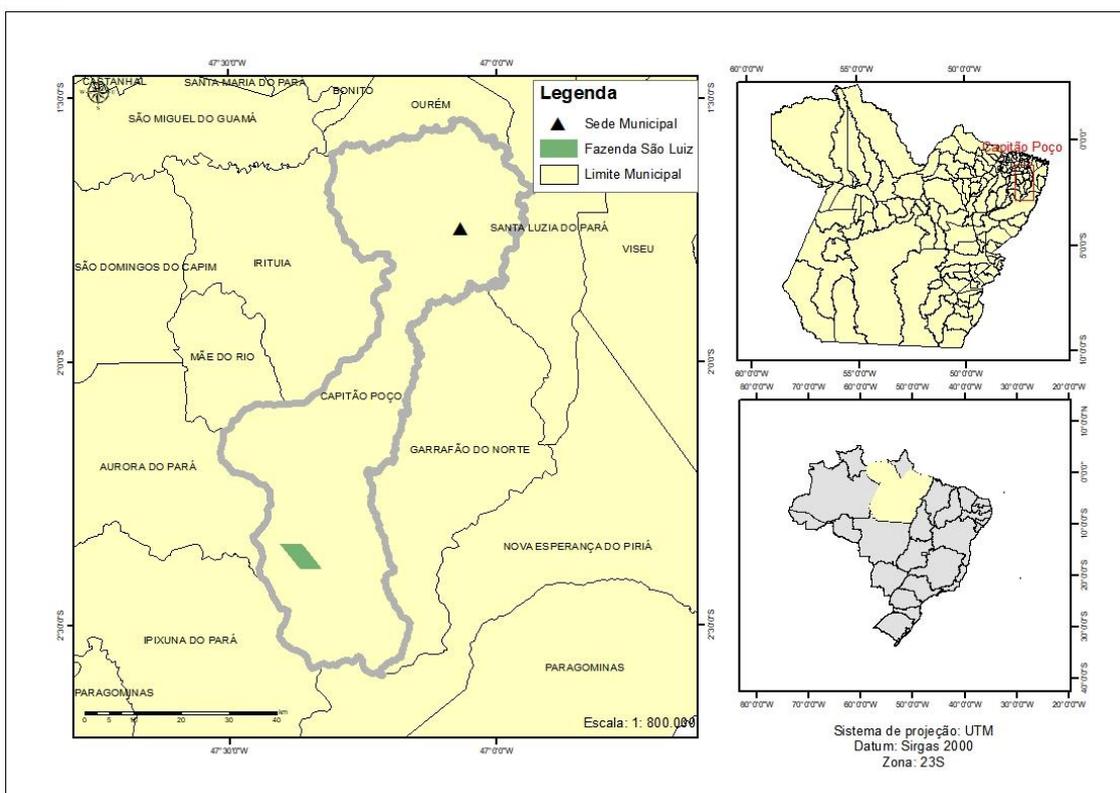
4.1. Local de estudo

O trabalho foi realizado na fazenda São Luiz, que compreende as coordenadas geográficas 2°21'8.93" de latitude Sul e 47°22'6.46" de longitude Oeste. A propriedade está localizada no município de Capitão Poço – Pa, Brasil e fica a aproximadamente 75 km da sede do município.

O clima do município é do tipo Ami, segundo a classificação de Köppen, com os maiores índices de pluviosidade de janeiro a maio e os menores de agosto a novembro.

A fazenda cultiva teca (*Tectona grandis*) há 20 anos. Hoje a propriedade possui uma área total de 2399,7 ha onde, destes, 915,9 ha (38%) é a área voltada para a produção de madeira. A coleta de amostras foi feita no talhão 07 da fazenda, com área de 50 ha (Figura 4).

Figura 4 - Mapa de localização da fazenda São Luiz, que produz teca no município de Capitão Poço – Pa, Brasil.



Fonte: O autor.

4.2. Características e Manejo da área

O solo da área é um Argissolo distrófico de textura média conforme a classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SIBCS (SANTOS et al.,

2018), em sua grande maioria, possuindo, também, duas manchas de plintossolo. Antes da implantação das árvores de teca, a área era cultivada com pimenta do reino (12 ha) e, em sua grande maioria, por pastagens 40 (ha).

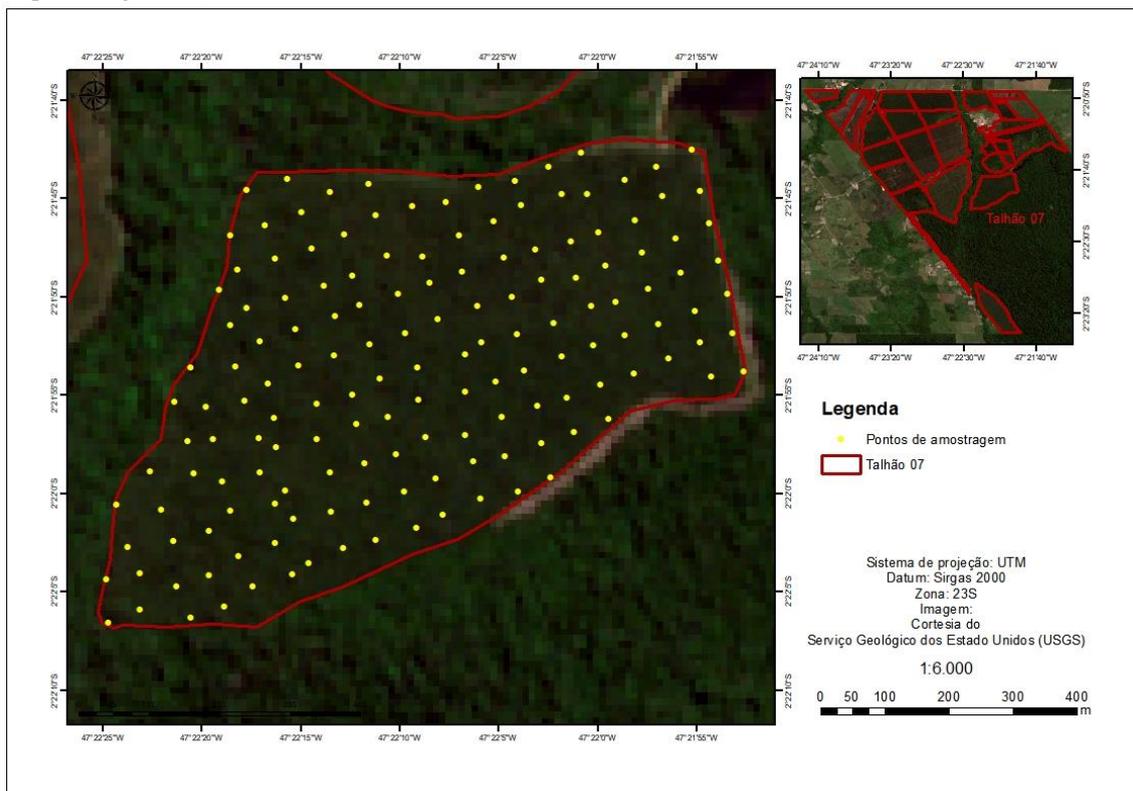
Em seu ano de implantação (2010), o plantio de teca possuía um espaçamento, em linha simples, de 4X4 o que representa uma população de 31.250 árvores. Em seu quarto ano foi realizado um desbaste de 45% da sua população total, resultando em uma população de 17.187, 5 árvores de teca.

Em relação ao manejo da área, na implantação primeiro foi aplicado o herbicida glifosato, para a dessecação da vegetação espontânea e do pasto, em seguida foram feitas duas gradagens pesadas seguidas de uma subsolagem e uma gradagem leve. O solo foi corrigido pela aplicação de calcário dolomítico na taxa de 4000 kg/ha em área total. Posteriormente foi aplicado 3000 kg/ha de fosfato natural de Arad (32% P₂O₅ total) na área total do talhão. Na adubação de plantio foram aplicados 300 kg/ha de N-P-K, de formulação 08-28-16 uma única vez e 100 kg/ha de KCl nos primeiros dois anos. Após o desbaste, em seu quarto ano, foi feita uma aplicação de 500 g de adubo fosfatado (fosfato monoamônico) por árvore.

4.3.Amostragem de solo

Para a coleta das amostras de solo primeiro foi determinado um grid sistemático de amostragem de 155 pontos, com espaçamento de 58m entre pontos, o que dá uma média de 3 pontos do ha. Todos os pontos foram georreferenciados com o auxílio GPS Garmin 62 SC (Figura 5).

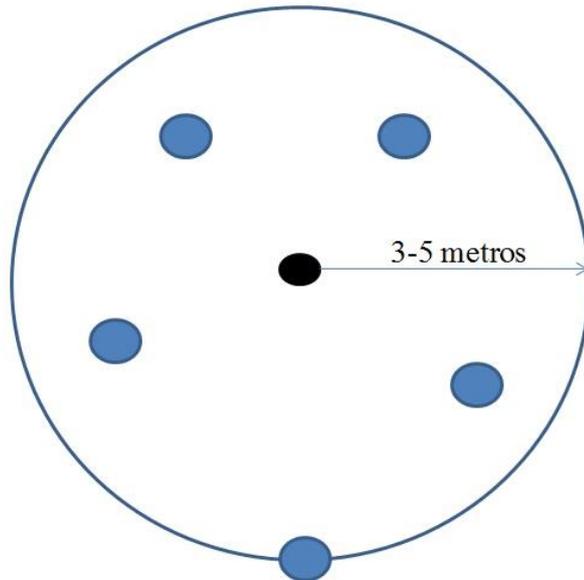
Figura 5 - Distribuição dos pontos de amostragem do talhão 07 (Fazenda São Luiz), município de Capitão Poço – Pa, Brasil.



Fonte: O autor

Para cada amostra de solo coletada, foi tomada a coordenada do ponto e, levando-se em conta o raio do erro do GPS (geralmente entre 3 e 5 m) foram coletadas 5 sub-amostras dentro desse raio, de modo a formar a amostra composta (Figuras 6 e 7). Todas as amostras foram coletadas na profundidade de 0-20 cm.

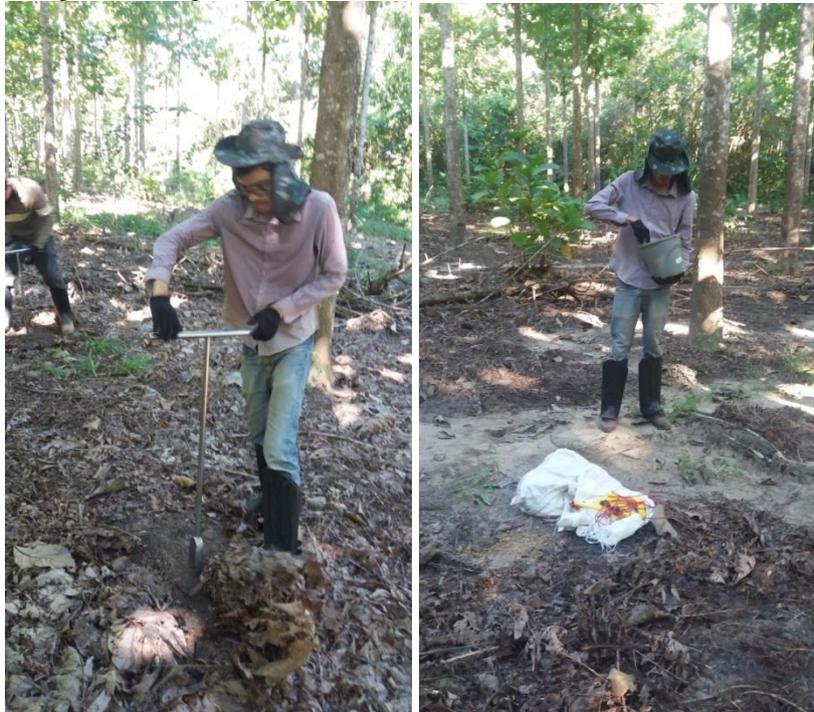
Figura 6 - Raio de referência do erro do GPS para a coleta de amostras de solos.



Fonte: O autor

As 155 amostras coletadas foram colocadas em sacos plásticos, identificadas e enviadas para o laboratório, para a determinação no solo de pH, Ca, Mg, K, SB, Al, H+Al, P Resina, B, e para o cálculo das variáveis; M.O, t, T, m%, V% (EMBRAPA, 2017).

Figura 7 - Amostragem e homogeneização de amostras de solo.



Fonte: O autor

4.4. Análises Laboratoriais de Solo

Todas as análises as variáveis químicas do solo foram avaliadas de acordo com Embrapa (2017), onde:

O pH foi determinado através da medição do potencial hidrogênico por meio de eletrodo imerso em suspensão de solo em líquido de CaCl_2 na proporção de 1:25. Ca, Mg e Al, foram determinados utilizando-se uma solução extratora KCl 1 mol L^{-1} . O Al foi determinado com solução diluída NaOH , já no Ca e Mg foi feita a determinação complexométrica em presença dos indicadores negro de eriocromo e murexida ou calcon.

O K foi determinado com solução extratora Melich – 1 e determinado com espectrofotometria de chama. A acidez potencial (H+Al) foi extraída com solução de acetato de cálcio etampinado a pH 07 e a determinação volumétrica foi realizada com solução de NaOH na presença de fenoftaleína com seu indicador. A matéria orgânica foi determinada pela via seca em mufla, por incineração. O p foi determinado com solução extratora Resina trocadora de íons.

O B foi determinado pelo método espectrofotométrico, da Azometina H, com extração em água quente.

O complexo sortivo do solo (que é o seu complexo de partículas trocadoras de íons) foram obtidos através das seguintes equações:

Soma de Bases:

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{2+}$$

CTC efetiva (t):

$$t = SB + Al^{3+}$$

CTC total (T):

$$T = SB + (H + Al^{3+})$$

Saturação por Bases:

$$V\% = \frac{100 * SB}{T}$$

Em relação a Saturação por alumínio (m%), ela foi obtida através da seguinte equação:

$$V\% = \frac{100 * Al^{3+}}{(SB + Al^{3+})}$$

Para a análise granulométrica foi feita a dispersão mecânica das amostras, por meio de agitador em uma solução dispersante (hidróxido de sódio 1 mol L^{-1}), em

seguida as frações do solo foram separadas por peneiramento e sedimentação. Em seguida. As frações separadas foram medidas por pesagem, após secadas em estufa.

4.5. Amostragem das variáveis dendrométricas

Para medição dos parâmetros de produção, foi realizado um inventário florestal, onde, no entorno do ponto central georreferenciado para coleta de solo, foi determinado um raio de 6 metros e coletados dados de diâmetro de altura do peito (DAP) e altura total de todas as árvores localizadas dentro do raio (em média quatro árvores por ponto) (Figura 8) (PITA, 2012).

Figura 8 - Determinação do raio para inventário florestal.



Fonte: O autor

Para a medição do DAP, foi utilizado o equipamento denominado suta, da marca Haglof. A medição dessa variável é feita a 1,5m de altura da base da árvore e o equipamento já fornece o valor de DAP, em cm, de maneira direta (Figuras 9 e 10).

Figura 9 - Medição do DAP a 1,5 m de altura da base da árvore no talhão 7 da fazenda são luiz, Nordeste Paraense.



Fonte: O Autor.

Figura 10 - Suta mecânica – equipamento utilizado para a medição do DAP em plantio de teca no Nordeste Paraense.



Fonte: encurtador.com.br/huHPU

Em relação a altura total, essa variável é obtida com o auxílio do equipamento chamado clinômetro da marca Haglof. Para se realizar a medição dessa variável deve-se distanciar da árvore a qual se deseja determinar a altura total, até que seja possível observar o seu topo, em seguida, o leitor da variável deve apontar o equipamento para a árvore e olhar no visor do equipamento, dessa forma será possível fazer a leitura da variável, em metros (Figuras 11 e 12).

Figura 11- Medição da altura total no talhão 7 da fazenda são luiz, no Nordeste Paraense.



Fonte: O autor.

Figura 12 - Clinômetro - Equipamento utilizado para a medição da altura total em um talhão de teca, no Nordeste Paraense.



Fonte: encurtador.com.br/jmvz9

As variáveis utilizadas para a sua determinação do volume foram o DAP, altura total e o fator de forma, que já havia sido estimado na fazenda correspondendo a 0,5.

Para o cálculo de volume foi utilizada a equação proposto por Figueiredo, Oliveira e Barbosa, (2005):

$$V_{total} = \frac{[DAP^2 * \pi]}{4} * Ht * f$$

Onde:

Vtotal: Volume total (m^3)

DAP = diâmetro à altura do peito em metros

Ht= altura total da árvore em metros;

f = fator de forma médio que é de 0,5.

O fator de forma (*f*) é um fator de correção para o formato do tronco de árvores. O fuste de uma árvore não apresenta o formato de um cone perfeito, a base é sempre maior que o topo. Portanto, árvores de mesmo DAP e altura podem ter volumes diferentes, devido a sua conicidade. De modo a corrigir essa diferença, é feita a comparação entre o volume real da árvore e de um cone de mesmo DAP e volume, de modo a encontrar um fator que corrija essa diferença de afilamento, através da seguinte equação (FRANCEZ et al., 2010):

$$f = \frac{V_{real}}{V_{cilindro}}$$

O valor de fator de forma aqui utilizado foi o de 0,5, que foi determinado pela própria empresa. Esse valor é coerente com o encontrado por Figueiredo; Scolforo e

Oliveira (2005) que determinaram fator de forma de 0,52 para árvores de teca de 6 a 7 anos de idade.

4.6.Potencial de produção

Com o auxílio do Excel, por meio da função “percentil” foi possível determinar o potencial de produção no talhão 07, onde, através de um gráfico de dispersão os valores de volume observados na área de estudo foram relacionados com a sua representação percentual, de modo a mostrar a sua variabilidade.

4.7.Estatística descritiva

Todos os dados obtidos foram submetidos a uma análise de estatística descritiva, para obtenção da média, mediana, mínimo, máximo, assimetria, curtose e coeficiente de variação. Também foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk. As variáveis que não apresentaram distribuição normal foram submetidas a transformação box-cox.

Antes da realização das análises estatísticas valores considerados discrepantes (outliers) foram eliminados, para não comprometer a distribuição dos dados. Ao todo 12 amostras foram eliminadas do banco de dados, o que não afetou a aplicação da geoestatística, devido a grande densidade amostral de pontos.

Uma matriz correlação também foi feita entre as variáveis em estudo. Como parte dos dados não apresentou distribuição normal, foi escolhida a correlação de spearman, que é para dados não-paramétricos (PONTES et al., 2018).

4.8.Geoestatística

Através da ferramenta geoestatística foram feitos os mapas de variabilidade espacial das variáveis de solo e das variáveis de produção, Diâmetro da altura do peito (DAP), altura total e volume.

O primeiro passo, para a análise geoestatística foi o cálculo do semivariograma, onde buscou-se adequar os dados a algum dos modelos, que são os mais utilizados nas ciências da terra (GREGO; OLIVEIRA, 2015). Esses modelos são exponencial, o gaussiano e o esférico. Todas as variáveis estudadas se encaixaram em algum desses modelos, permitindo que fosse realizada a variabilidade espacial da mesma.

Após a adequação das variáveis aos modelos, foi realizada a krigagem, que é a técnica que permite a realização da variabilidade espacial das variáveis de fertilidade, das componentes e dos dados de produtividade. A krigagem é realizada através da seguinte equação matemática (FARIAS et al., 2003):

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z[x_i]$$

Onde:

N = número de vizinhos medidos,

$Z(x_i)$ = número utilizado na estimativa da propriedade

λ_i = ponderadores aplicados a cada $Z(x_i)$

Para a validação dos modelos de semivariograma encontrados foram usados os valores do coeficiente de determinação (R^2) além da validação-cruzada. Em relação ao R^2 , quanto mais ele estiver próximo de 1 mais adequado está o modelo encontrado. Em relação a validação-cruzada, além de validar o modelo, ela mostra a eficácia da krigagem, seus resultados são satisfatórios quando seu coeficiente angular estiver próximo de 1 e seu coeficiente linear próximo de 0 (FREDDI et al., 2017; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Além dos dois testes, acima citados, foi avaliado o índice de dependência espacial nas variáveis, que é a porção da variabilidade decorrente da dependência espacial. O Índice de dependência espacial, aqui usado, foi segundo Cambardella (1994), aqui representado pelo coeficiente K , através da seguinte equação:

$$K = \frac{C_0}{(C_0 + C_1)}$$

Onde:

C_1 = variância espacial;

C_0 = efeito pepita.

Segundo esse teste, quando o $K \leq 0,25$ o índice é considerado forte, quando K está entre 0,26 – 0,75 ele é considerado moderado e quando $K \geq 0,75$ ele é considerado fraco.

4.9. Softwares utilizados

O excel foi utilizado para tabulação de dados e o ArcGis para elaboração dos mapas de localização de fazenda São Luiz e para a criação da grade de amostragem.

A estatística descritiva e o as transformações box-cox foram realizadas com o auxílio dos programas Statistica 8 e R 3.5.1.

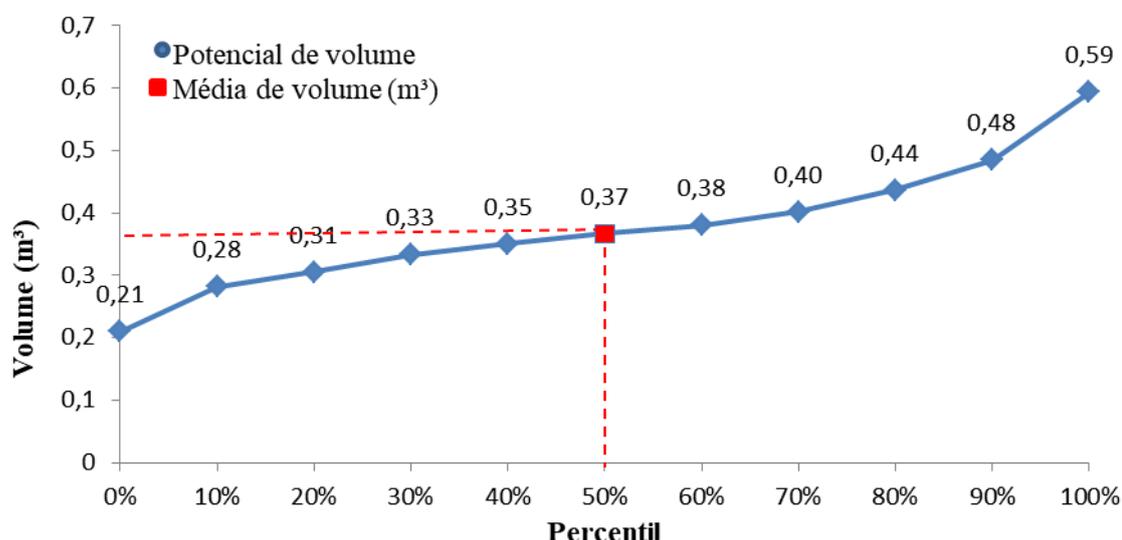
A geoestatística foi toda realizada no GS+, e os mapas gerados nesse programa foram editados no Surfer 11.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Potencial de produção

O volume da teca variou de 0,21 a 0,59 m³ sendo que 50% dos pontos amostrais avaliados apresentaram valor médio de até 0,37 m³ (Figura 13). A diferença entre os valores mínimo e máximo do potencial de produção mostram que existe grande variação desse atributo no talhão 07. Farias et al. (2003) e Oliveira (2007) evidenciaram a variabilidade do potencial de produtividade em um pomar de citros e através do uso da geoestatística conseguiram produzir mapas localizados espacialmente, que podem ser usados como ferramentas no tratamento da desigualdade de uma determinada área de produção. Essa prática permite evitar o desperdício de insumos, seja através do caráter financeiro ou ambiental.

Figura 13 – Distribuição do potencial de produção da teca, no talhão 07.



Fonte: O autor.

5.2. Estatística Descritiva dos Atributos Químicos do Solo e da Produção de teca

Os atributos químicos do solo pH, K, H+Al, T, t, B, MO, V% e as variáveis de produção DAP, altura total e volume apresentaram um coeficiente de variação (CV) menor que 30%. O restante das variáveis, Ca, Mg, SB, Al, P e m%, apresentaram CV acima de 30%. De acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002) coeficientes acima de 30% promovem uma alta dispersão dos dados. O elevado CV denota variação nos dados o que é favorável para os estudos de geoestatística, uma vez que essa ferramenta pode evidenciar a variabilidade no comportamento de determinada variável em estudo.

As variáveis K, P, MO, Al e m% mesmo não apresentando distribuição normal após a transformação box-cox foram utilizados na análise com seus dados

transformados, uma vez que, após realizada a transformação eles apresentaram valores menores de assimetria, que segundo Hair et al. (2009), junto com a curtose é a medida que mostra o quanto a distribuição se distanciou da normal e, portanto, sua redução aproxima a distribuição dos dados da normal e, segundo Webster e Oliver (2007) é a principal medida de distanciamento à normal para dados ambientais. Segundo Vieira (1983) a geoestatística é uma ferramenta que leva em consideração a “Teoria da Variável Regionalizada” que é uma função numérica espacial que leva em consideração também a distância entre as amostras, sendo assim distribuição normal não é uma premissa para a aplicação desse tipo de estudo.

O Mg e o B não apresentaram distribuição normal, mas esses não foram submetidos a transformação box-cox, uma vez que, tiveram seus valores de assimetria reduzidos após a retirada de valores considerados discrepantes (outliers).

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos químicos do solo e das variáveis de produção, de uma área de plantação de teca de 10 anos no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.

Variável	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV	Assimetria	Curtose
pH (CaCl ₂) ⁽¹⁾	5,0	5,0	4,2	5,9	0,3	6,8	0,3	0,1
Ca (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾⁽²⁾	0,9	0,9	0,8	7,8	0,5	51,4	0,2	0,3
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,0	0,9	0,2	1,8	0,4	44,7	0,3	-1,2
K (mg dm ⁻³) ⁽²⁾	1,7	1,7	8,0	60,0	0,1	5,9	0,6	1,0
SB (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾⁽²⁾	1,34	1,33	1,14	9,30	0,50	37,74	0,16	-0,23
Al (cmol _c dm ⁻³) ⁽²⁾	0,05	0,08	0,00	0,30	0,05	100,32	0,29	-1,40
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	2,8	2,7	1,6	6,5	0,7	25,1	1,3	4,6
T (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾⁽²⁾	1,4	1,4	3,4	14,6	0,1	9,5	0,0	0,6
t (cmol _c dm ⁻³) ⁽¹⁾⁽²⁾	1,1	1,2	1,3	9,3	0,3	29,2	0,0	-0,2
P (Resina) (mg dm ⁻³) ⁽²⁾	1,4	1,3	1,0	14,0	0,6	44,0	0,2	-0,2
B (mg dm ⁻³)	0,3	0,3	0,2	0,4	0,1	20,9	0,1	-0,6
MO (g/kg) ⁽²⁾	1,1	1,1	10,0	31,0	0,0	2,9	0,0	-1,0
m% (%) ⁽²⁾	0,63	0,87	0,00	4,00	0,60	96,31	0,05	-1,77
V% (%) ⁽¹⁾	54,7	54,0	27,0	81,0	12,5	22,8	0,0	-0,8
DAP (cm) ⁽¹⁾	23,89	23,85	19,06	28,96	1,83	7,64	0,01	0,12
Altura (m) ⁽¹⁾	16,32	16,23	14,17	19,80	1,04	6,35	0,38	0,02
Volume (m ³) ⁽¹⁾	0,37	0,37	0,21	0,59	0,07	20,13	0,38	0,06

CV- Coeficiente de Variação; ⁽¹⁾Distribuição normal pelo teste Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade; ⁽²⁾Dados transformados por Box-cox.

Resultados semelhantes aos desse trabalho, para a estatística univariada e aplicação da variabilidade espacial, foram encontrados por outros autores. No que se refere a normalidade de dados para análise geoestatística da produção e/ou fertilidade do solo, tal critério não foi limitante para estudo em área de cultivo com coqueiro de 11 anos (Santos et al., 2017) e outra com floresta de teca de 20 anos de plantio (Gil et al.,

2018). Já em relação a transformação de dados e retirada de valores considerados discrepantes, melhor modelagem espacial foi alcançada aplicando-se a remoção de outliers do que em relação a transformação box-cox, em dados de análise de fósforo em um solo Glei localizado na Irlanda (FU et al., 2015).

5.3. Correlação entre as variáveis de solo e de produção.

O pH mostrou correlação positiva e significativa com o Ca, Mg e K, o que mostra que ele contribuiu com a disponibilidade desses nutrientes (Tabela 2). Segundo Alvarado (2006), uma das reações físico-químicas para a produção de teca é a reação do solo (pH), que está intimamente ligada com a saturação por bases (m%), que é a porcentagem de bases disponíveis no solo.

A MO também mostrou correlação positiva com o as variáveis de CTC, o que mostra que ela contribuiu para as cargas negativas do solo e, por consequência, com a disponibilidade do Ca, Mg e K. De modo geral, os nutrientes que podem ser disponibilizados pelos resíduos de teca são N, Ca, Mg e K (ALVARADO, 2012; ALVARADO, 2006). Mesmo a MO tendo contribuído com disponibilidade de importantes nutrientes, Ca e Mg não contribuíram com a produção da área, uma vez que eles não mostraram correlação com a produção.

Em relação às variáveis de produção, essas mostraram correlação significativa e positiva com MO, P e K.

Além da sua contribuição para as propriedades químicas do solo, a MO exerce grande influência em seus atributos físicos. A disponibilidade de MO no meio leva a uma melhor agregação de partículas do solo, o que aumenta sua porosidade, levando a uma melhor taxa de infiltração da água e aumento da disponibilidade de oxigênio. Melhores características físicas do solo contribuem para o desenvolvimento da teca, pois, uma melhor aeração favorece o desenvolvimento radicular e, portanto, o desenvolvimento da árvore (WEHR; SMITH; MENZIES, 2017). Basso (2016) encontrou correlação positiva da MO com o DAP e a altura total em uma plantação de teca de 2,3 anos no município de Alta Floresta, Mato Grosso.

O P pode ter contribuído com a produção da teca através do seu desenvolvimento radicular e da sua eficiência fotossintética. O P tem grande contribuição na absorção de outros nutrientes e na produção de energia. Dias et al. (2017) ao avaliarem a disponibilização de fontes fosfatadas, em plantio de Eucalipto, notaram que houve contribuição da disponibilização desse nutriente para o desenvolvimento radicular. Behling et al. (2014) ao avaliarem a eficiência de nutriente

em desenvolvimento radicular em plantio de teca observaram que o P é o nutriente com maior eficiência para o desenvolvimento de raízes finas e médias na teca. Cunha et al. (2016), ao avaliarem o crescimento e a fotossíntese em plantas jovens de pau de balsa, percebeu melhores respostas de fotossíntese a irradiância em plantas adubadas com fósforo.

As principais funções do K nas plantas estão ligadas a translocação de açúcares fechamento estomático e regulação osmótica (MALAVOLTA, 2006). Nas plantações de teca, ele está entre os nutrientes de maior exigência. Segundo Behling (2009) ao analisar as concentrações de nutrientes em partes de teca, em uma plantação de 7,5 anos, encontrou o K como o segundo maior nutriente concentrado, principalmente na folha e na casca.

Fernández – Moya et al. (2017), também encontraram relação positiva entre o K e o P com plantio de teca, ao avaliar a aplicação de NPK em povoamento de teca de 6 anos de idade, observaram o incremento de variáveis de produção (DAP, Altura e volume) após a adubação.

Tabela 2 – Correlação de Spearman dos atributos químicos do solo e das variáveis de produção em uma área de plantação de teca de 10 anos no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.

Variável	pH	Ca	Mg	K	SB	Al	H+Al	T	t	P (Resina)	B	MO	m%	V%	DAP	Altura	Volume
pH	1,00	0,86*	0,78*	0,17*	0,84*	-0,88*	-0,67*	0,56*	0,82*	-0,16 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,30*	-0,70*	0,96*	-0,03 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,08 ^{ns}
Ca		1,00	0,90*	0,22*	0,98*	-0,76*	-0,31*	0,87*	0,99*	-0,26*	-0,11 ^{ns}	0,33*	-0,63*	0,90*	-0,06 ^{ns}	-0,16*	-0,11 ^{ns}
Mg			1,00	0,20*	0,93*	-0,68*	-0,26*	0,86*	0,95*	-0,31*	-0,10 ^{ns}	0,20*	-0,60*	0,84*	-0,10 ^{ns}	-0,18*	-0,14 ^{ns}
K				1,00	0,26*	-0,14 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,29*	0,25*	0,00 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,47*	-0,19*	0,14 ^{ns}	0,25*	0,19*	0,23*
SB					1,00	-0,75*	-0,29*	0,88*	0,99*	-0,27*	-0,11 ^{ns}	0,31*	-0,63*	0,88*	-0,05 ^{ns}	-0,15 ^{ns}	-0,10 ^{ns}
Al						1,00	0,60*	-0,47*	-0,71*	0,16*	0,12 ^{ns}	-0,21*	0,75*	-0,86*	0,00 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,07 ^{ns}
H+Al							1,00	0,13 ^{ns}	-0,25*	-0,11 ^{ns}	0,09 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	0,45*	-0,67*	-0,09 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,06 ^{ns}
T								1,00	0,91*	-0,32*	-0,09 ^{ns}	0,30*	-0,45*	0,60*	-0,11 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,14 ^{ns}
t									1,00	-0,29*	-0,12 ^{ns}	0,32*	-0,61*	0,87*	-0,07 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,12 ^{ns}
P (Resina)										1,00	0,13 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,18*	-0,17*	0,29*	0,31*	0,33*
B											1,00	-0,06 ^{ns}	0,13 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,04 ^{ns}
MO												1,00	-0,24*	0,29*	0,28*	0,20*	0,26*
m%													1,00	-0,68*	0,03 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,07 ^{ns}
DAP														1,00	-0,01 ^{ns}	-0,14 ^{ns}	-0,06 ^{ns}
V%															1,00	0,69*	0,97*
Altura																1,00	0,84*
Volume																	1,00

* significativo a 5%

^{ns} não significativo

5.4. Geoestatística

Foi possível adequar todas as variáveis em um dos três modelos de semivariogramas mais utilizados, o que confirma a dependência espacial das mesmas (Tabela 3). Segundo Zonta et al. (2014) a dependência espacial mostra que o padrão das variáveis regionalizadas não foi aleatório e que a malha amostral utilizada no estudo foi o suficiente para o estudo da variabilidade na área.

Para as variáveis de solo o modelo mais encontrado foi o exponencial. Resultados semelhantes foram encontrados por Zanão Junior et al. (2010), que ao avaliarem a variabilidade espacial de macronutrientes do solo, em duas áreas de plantio direto, no estado de Minas Gerais, obteve melhor ajuste de semivariograma para o modelo exponencial na maioria dos nutrientes avaliados. Silva et al. (2008) ao avaliar a variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade na cultura do café, encontraram o modelo esférico para todos os atributos químicos de solo avaliados, resultados que se diferem aos encontrados nesse trabalho. Os resultados também se diferem aos encontrados por Pelissari et al. (2012) que encontraram o modelo esférico para a maioria dos atributos químicos de solo em uma área de teca. Segundo Bottega et al. (2013) os modelos exponencial e esférico, para atributos de solo, apresentam média e baixa continuidade em sua variabilidade espacial, respectivamente. O ajuste a esses modelos em atributos químicos de solo podem ser explicados devido às intervenções que podem ser realizadas no solo.

Para as três variáveis de produção (DAP, altura total e volume) o modelo que melhor se ajustou foi o exponencial, resultados que se diferiram dos encontrados por Pelissari et al. (2012) que encontrou ajuste de modelo para DAP e altura total, na sua maioria, gaussiano para plantações de teca de 2 a 9 anos de idade. Gil (2017) encontrou ajuste de modelo, em sua maioria, esférico, ao avaliar a variabilidade de plantações de teca de 18 e 19 anos no estado do Mato Grosso.

Os índices de dependência espacial, em sua maioria, apresentaram valores classificados como fortes. A maioria das variáveis que mostraram forte dependência espacial foram descritas pelo modelo exponencial. Diferentes resultados foram encontrados por Pelissari et al. (2012) que encontraram IDE para os seus modelos mais observados (gaussiano) classificados como moderados. Gil et al. (2018) também encontraram valores de IDE para o seu modelos mais observado (esférico) classificados como moderados.

Em relação ao alcance, que é a área máxima de influência de uma variável, o maior valor foi encontrado para o DAP (456 m) e o menor valor para o K (72,8m).

Tabela 3- Parâmetros geoestatísticos das variáveis do solo e de produção em uma área de plantação de teca de 10 anos no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.

Variável	Modelo	C ₀	C ₁	a(m) ⁽¹⁾	K ⁽²⁾	Classe	R ²	a	b
pH (CaCl ₂)	Exponencial	0,001	0,127	297	0,01	Forte	0,91	1,46	0,7
Ca (cmol _c dm ⁻³)	Exponencial	0,061	0,175	399	0,25	Forte	0,97	0,08	0,916
Mg (cmol _c dm ⁻³)	Gaussiano	0,102	0,103	278	0,49	Moderado	0,96	-0,01	1,01
K (mg dm ⁻³)	Esférico	0,000	0,007	72,8	0,00	Forte	0,98	0,08	0,95
SB (cmol _c dm ⁻³)	Gaussiano	0,139	0,140	299	0,49	Moderado	0,92	-0,02	1,01
Al (cmol _c dm ⁻³)	Exponencial	0,001	0,002	387	0,39	Moderado	0,80	0,00	0,92
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	Exponencial	0,003	0,464	208	0,01	Forte	0,85	0,02	0,76
T (cmol _c dm ⁻³)	Gaussiano	0,009	0,010	336	0,49	Moderado	0,84	-0,08	1,057
t (cmol _c dm ⁻³)	Gaussiano	0,061	0,062	303	0,49	Moderado	0,96	-0,02	1,018
P (Resina) (mg dm ⁻³)	Exponencial	0,000	0,310	160	0,00	Forte	0,93	0,18	0,87
B (mg dm ⁻³)	Esférico	0,000	0,003	82,1	0,00	Forte	0,87	0,2	0,26
MO (g/kg)	Exponencial	0,000	0,001	125,4	0,00	Forte	0,85	0,05	0,95
m% (%)	Exponencial	0,001	0,392	255	0,00	Forte	0,88	0,14	0,77
V% (%)	Esférico	82,6	85,3	302	0,49	Moderado	0,91	2,34	0,95
DAP (cm)	Exponencial	0,907	2,690	456	0,25	Forte	0,9	1,09	0,95
Altura (m)	Exponencial	0,028	0,981	175	0,02	Forte	0,84	1,55	0,9
Volume (m ³)	Exponencial	0,002	0,004	388	0,30	Moderado	0,9	0,01	0,96

a¹ = alcance; GDE= Grau de Dependência Espacial; R²= coeficiente de determinação; a= coeficiente linear; b= coeficiente angular. K⁽²⁾= Coeficiente K para o índice de dependência espacial.

Para os parâmetros de validação do modelo, como o coeficiente de determinação (R²) e as variáveis da validação cruzada, que são o coeficiente linear (*a*) e coeficiente angular (*b*), a maioria apresentou valores favoráveis. Todas as variáveis apresentaram R² próximos a um, sendo o menor valor o do 0,8 para o Al. Em relação ao coeficiente linear (*a*) quase todas as variáveis apresentaram valores próximos a zero, com exceção do pH, V%, DAP e altura total, já em relação ao coeficiente angular (*b*), exceto o B, todas as variáveis mostraram valores próximos a um. O Mg, SB, T e t apresentaram valores negativos de coeficiente linear. Segundo Vieira, Carvalho, González (2010) quando são obtidos valores positivos de coeficiente angular, estão sendo superestimados os valores pequenos e os valores altos estão sendo subestimados, quando os valores de *a* são negativos o inverso acontece. Valores positivos de *a* também foram encontrados por Gil RL et al. (2018) e Pelissari et al.(2012). Freddi et al.(2017) ao aplicar a geoestatística em componentes principais de dados de solos em um latossolo no cerrado amazônico obtiveram valores negativos de coeficiente linear.

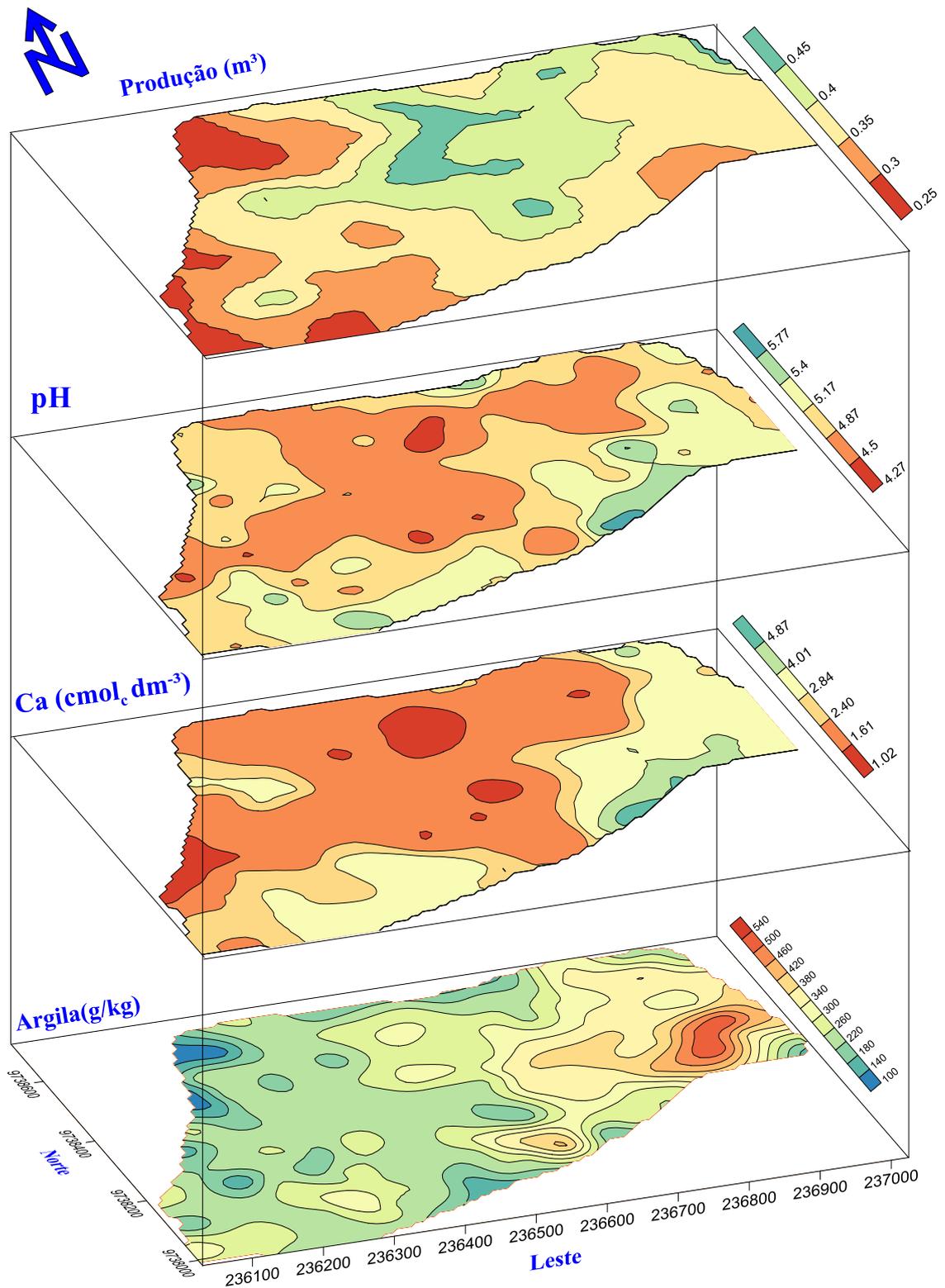
5.5. Variabilidade dos atributos químicos do solo e do volume

Após os ajustes de semivariogramas, dos atributos químicos do solo e de produção foi possível realizar a krigagem das variáveis de modo a se observar a sua variabilidade espacial na área de estudo. Para os atributos químicos do solo foi possível classificar suas concentrações em “Muito baixo”, “Baixo”, “Médio”, “Bom” e “Muito bom” de acordo com a 5ª aproximação do Estado de Minas Gerais (ALVAREZ V et al., 1999).

Em relação ao pH, esse variou entre 4,27 a 5,88 (Figura 14), esse valores são considerados de baixo a bom para a fertilidade do solo (ALVAREZ V et al., 1999). A teca apresenta um desenvolvimento marginal em áreas com pH abaixo de 5,5 (MATRICARDI, 1989 apud JEREZ-RICO; COUTINHO, 2017). Segundo Zech e Drechsel (1991) a teca se desenvolve de maneira saudável em área com pH (CaCl_2) acima de 4,7.

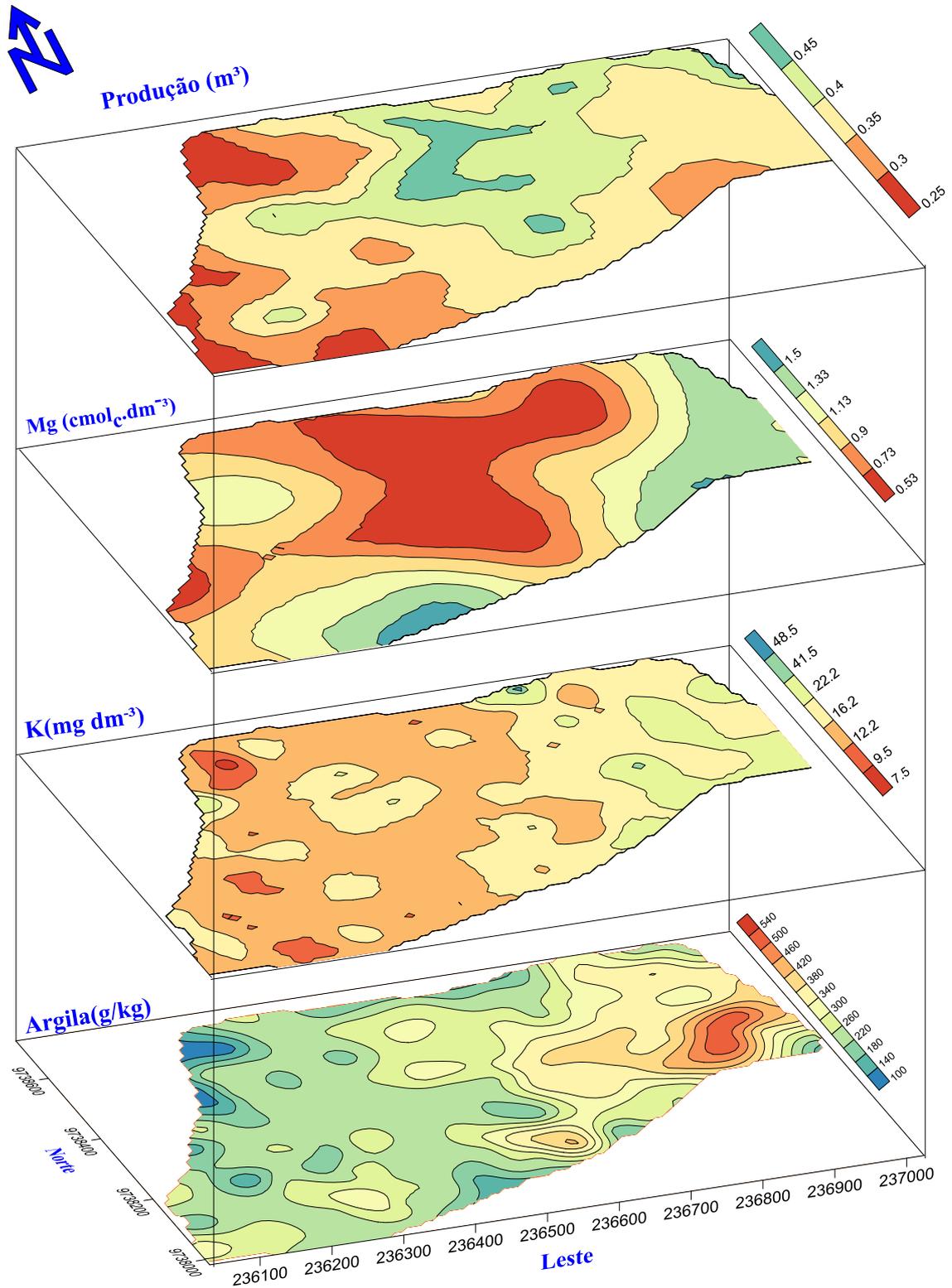
O Ca variou de 1,02 a 5,7 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), essa variação pode ser classificada na faixa que vai de baixo a muito bom, sendo que a partir de 2,4 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) o nível desse nutriente pode ser considerado bom (Figura 14) (ALVAREZ V et al., 1999). Esses valores são inferiores àqueles encontrados por Kumar (2009) em uma área de teca, localizada na Índia, de 7,5 anos, cujo valor médio de Ca foi de 7,43 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). Fernández-Moya et al., (2013) também encontraram valores superiores aos desse estudo ao analisar a fertilidade de 23 diferentes áreas de teca na América Central (Costa Rica), onde se obteve uma média de Ca de 13,22 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$). Já em comparação ao trabalho de Rosa; Scaramuzza e Silva (2015) que encontraram valores médios de Ca de 0,5 ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$) em uma área de teca no Mato Grosso, as concentrações de Ca no talhão sete da fazenda são luz foram superiores.

Figura 14 - Variabilidade espacial do Volume, pH, Ca e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no Município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.



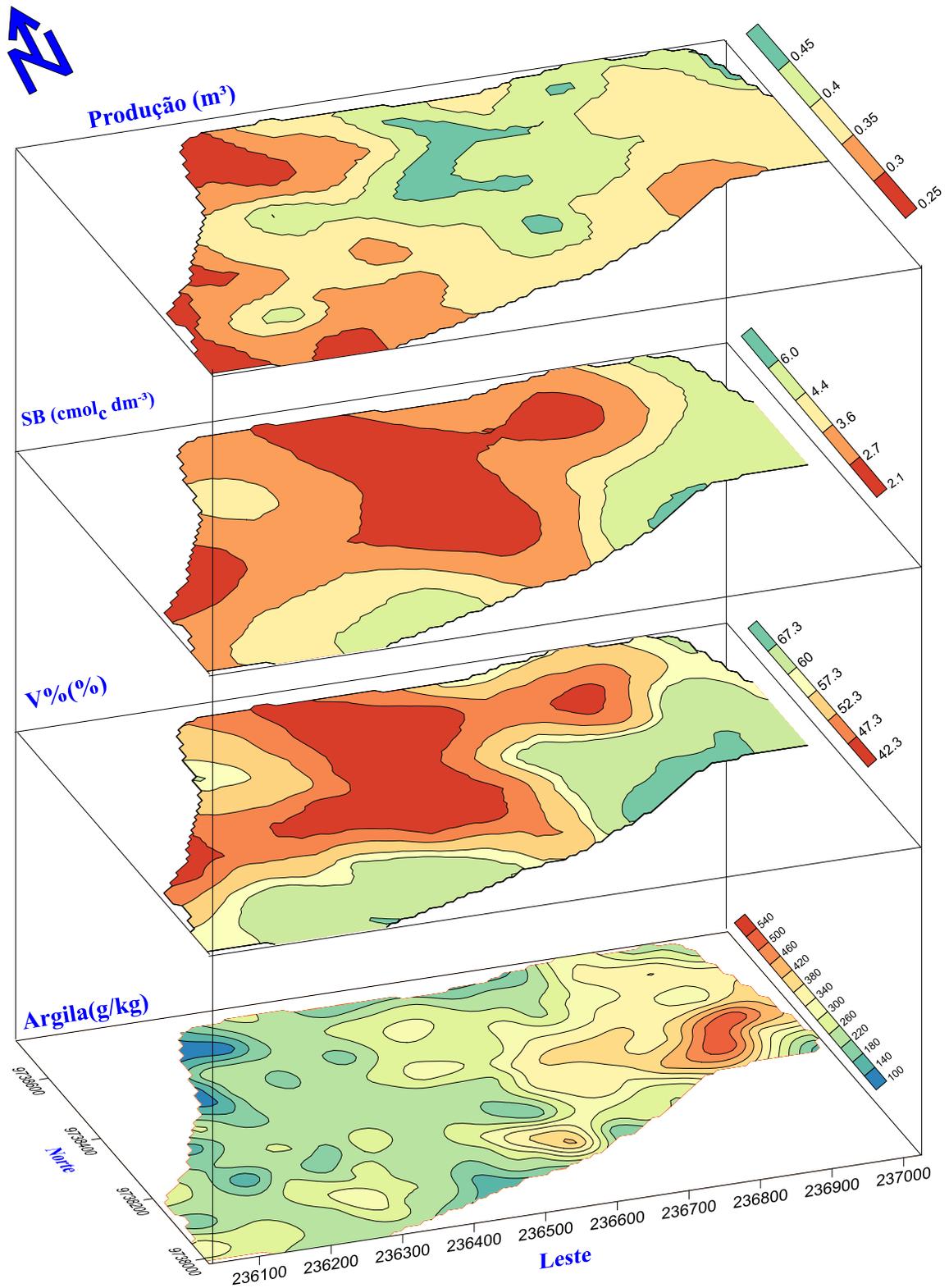
Fonte: O autor.

Figura 15 - Variabilidade espacial do Volume, Mg, K e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no Município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.



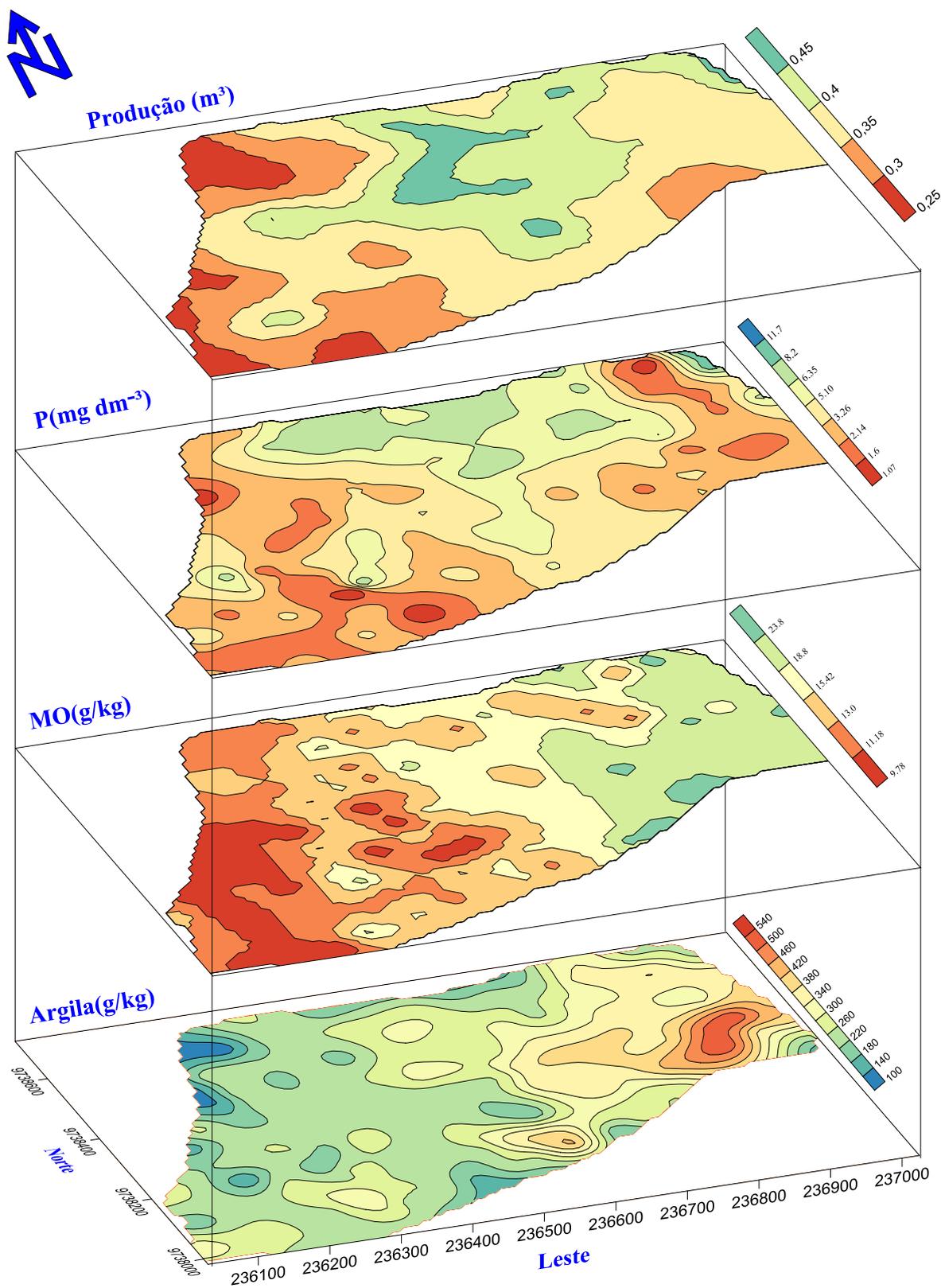
Fonte: O autor.

Figura 16 - Variabilidade espacial do Volume, SB, V% e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.



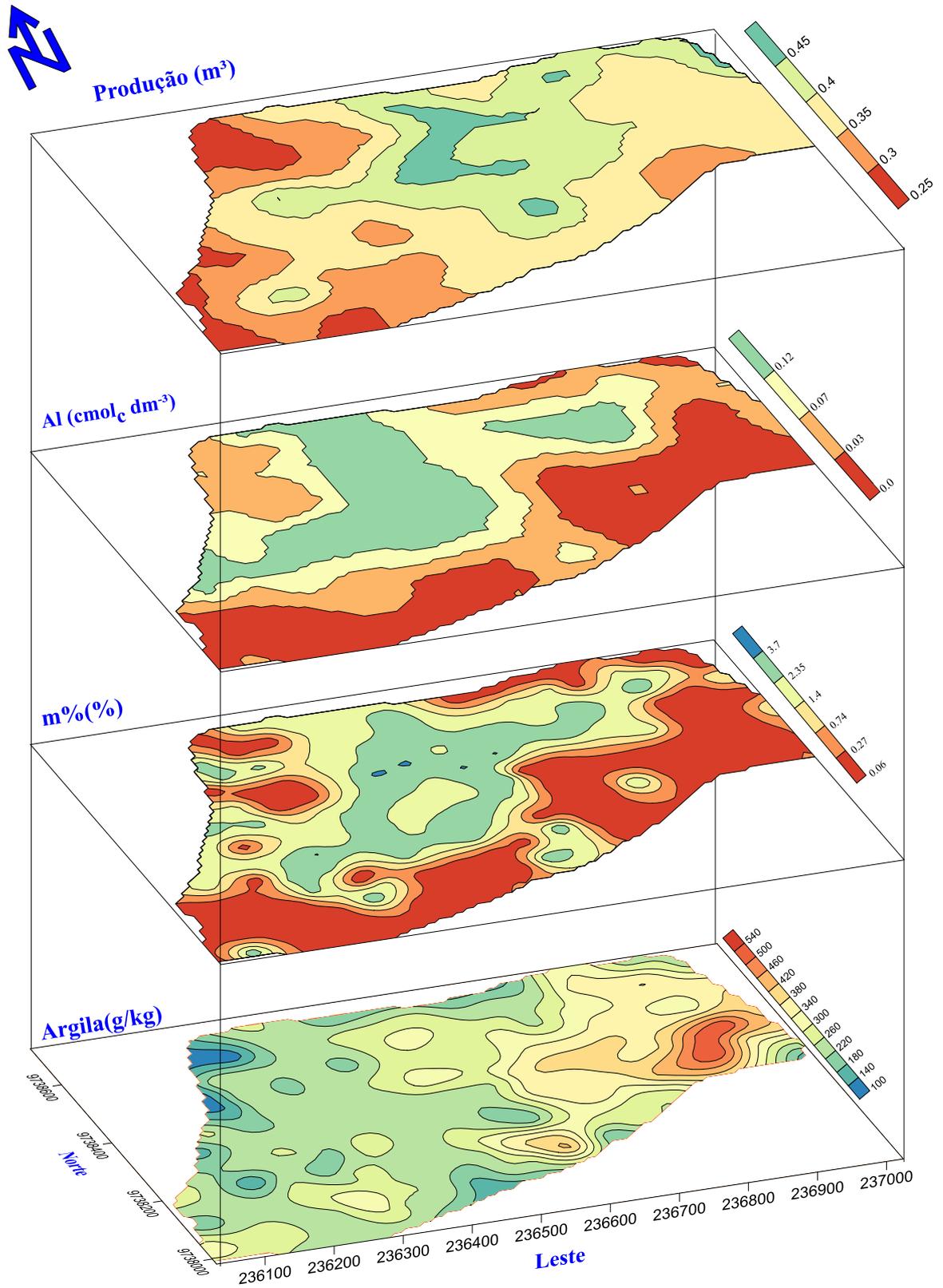
Fonte: O autor.

Figura 17 - Variabilidade espacial do Volume, P, MO e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.



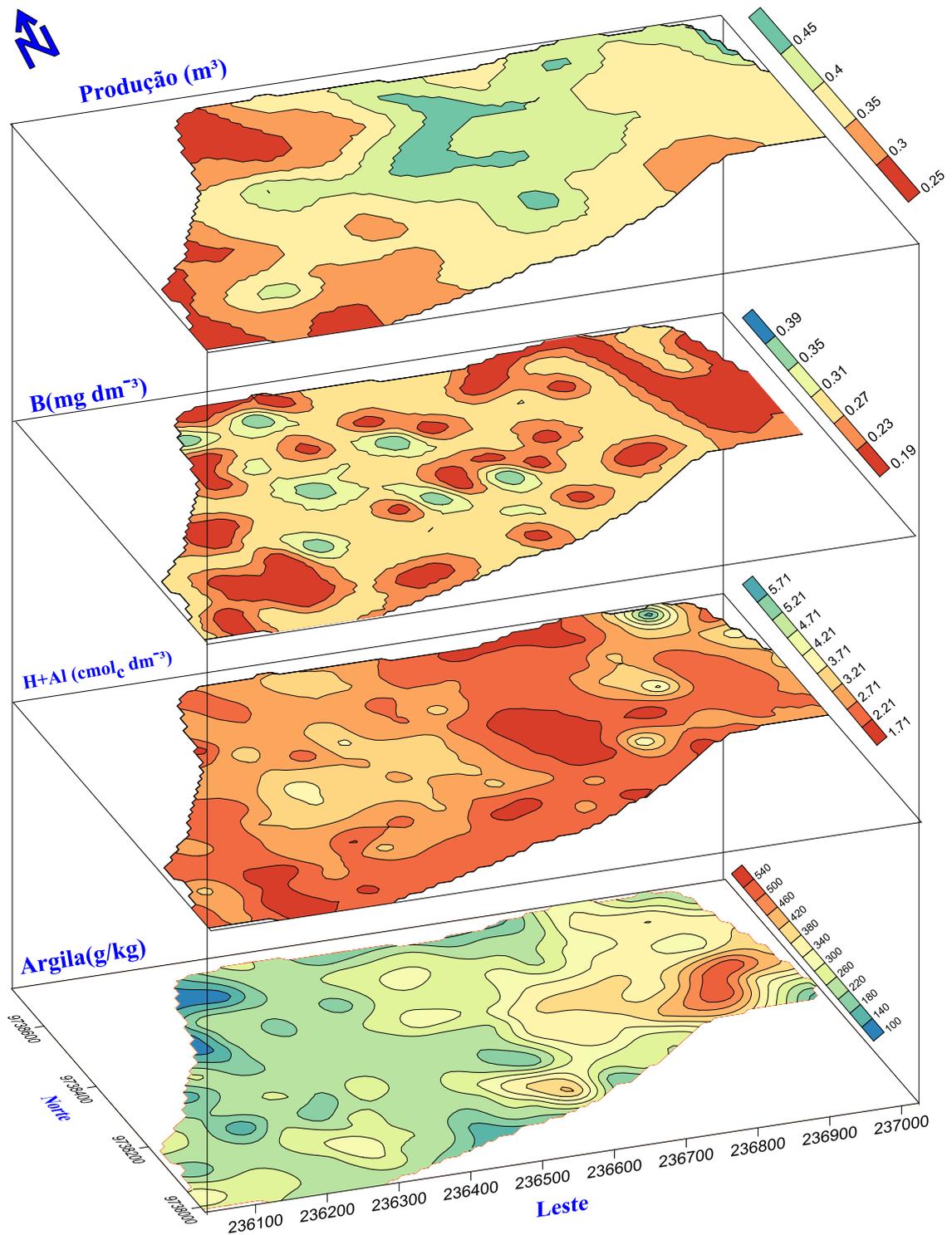
Fonte: O autor.

Figura 18 - Variabilidade espacial do Volume, Al, m% e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.



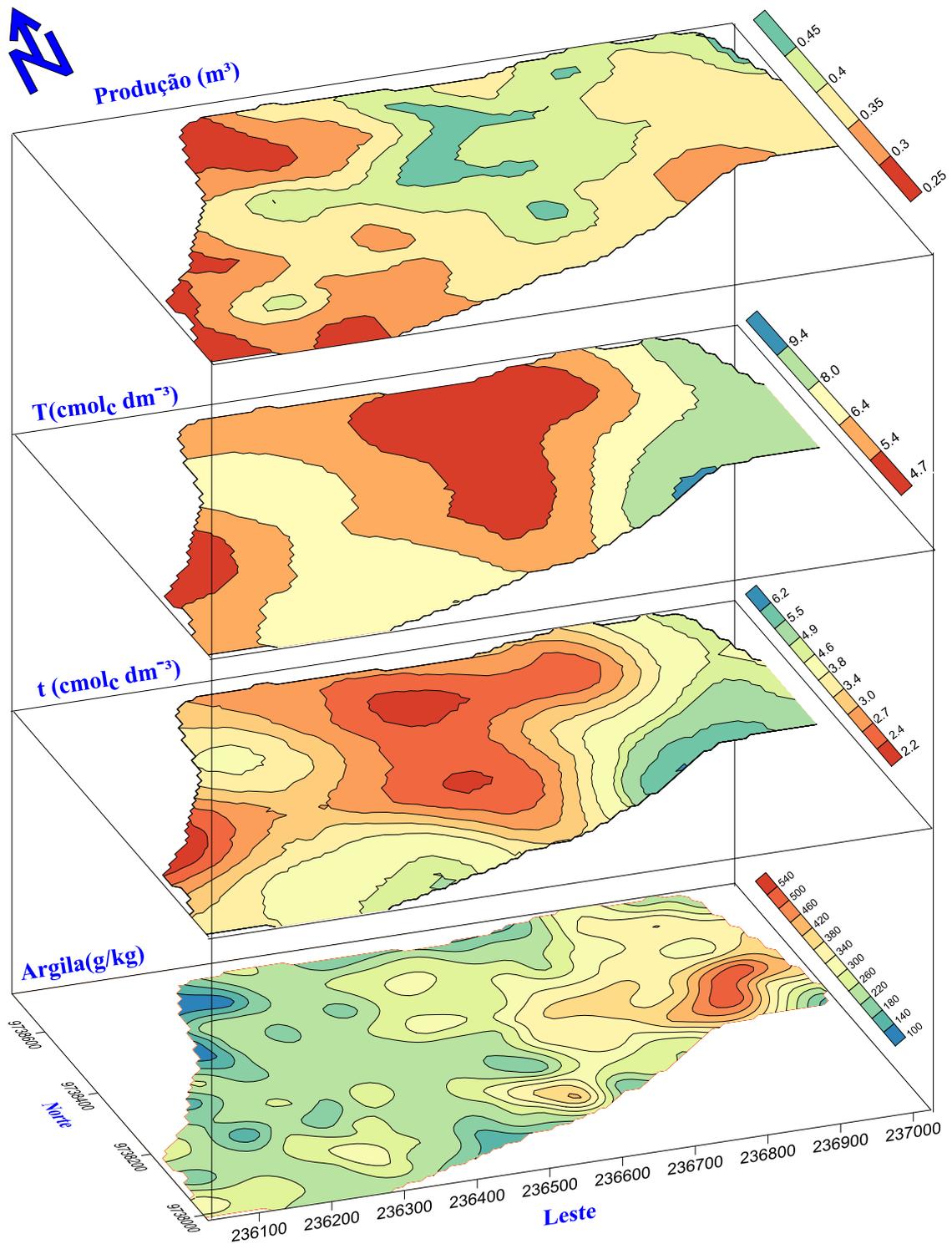
Fonte: O autor.

Figura 19 - Variabilidade espacial do Volume, Al, m% e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.



Fonte: O autor.

Figura 20 - Variabilidade espacial do Volume, T, t e da Argila, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.



Fonte: O autor.

O Mg e o K variaram entre 0,53 a 1,6 (cmol_c dm⁻³) e de 7,5 a 53,88 (mg dm⁻³) respectivamente (Figura 15). Para o magnésio essa variação pode ser classificada de médio a muito bom e, a partir de valores acima de 0,9 seu status pode ser considerado

bom. Para as regiões de melhor fertilidade do Mg (acima de $0,9 \text{ mg dm}^{-3}$), os valores encontrados nesse trabalho são semelhantes àqueles encontrados por Behling (2009), que observou valores de Mg que vão de 0,9 a 1,6 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) na camada superficial (primeiros 20 cm) de uma área produtora de teca, localizada no Mato Grosso.

As concentrações de K variaram de muito baixo a médio em quase 100% de sua área está sob o status de baixo ($>41,00 \text{ mg dm}^{-3}$) o que mostra a deficiência de nutriente em quase toda a área de produção. Esses valores foram abaixo dos encontrados por Behling (2009) que observou uma faixa de valores de K variando de 60 a 140 (mg dm^{-3}) na região superficial de uma área produtora de teca. Os valores também foram abaixo dos encontrados por Fernández-Moya et al. (2014) que observaram valores médios, para o K, em torno de 78 (mg dm^{-3}) na camada superficial de 195 áreas de uma empresa produtora de teca, localizada na América Central (Costa Rica).

A soma de bases (SB) variou de 2,1 a 6,4 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) que são valores considerados de médio a muito bom. Em relação ao V% a variação foi de 42,3 a 71,54 (%) valores esses considerados de médio a muito bom, o que mostra que boa parte das cargas do solo estão ocupadas pelas bases trocáveis, principalmente o Ca e o Mg, uma vez que o K está deficiente em quase 100% da área (Figura 16) (ALVAREZ V ET AL., 1999).

O P variou de 1,07 a 11,7 (mg dm^{-3}), esses valores são considerados de muito baixo a alto (Figura 17). A região que apresenta valores acima de 8,0 (mg dm^{-3}) é aquela considerada de melhor fertilidade (RAIJ et al., 1996). A região de melhor fertilidade para o P (acima de 8,0 mg dm^{-3}) apresentou valores superiores ao encontrados na literatura, como àqueles encontrados por Fernández-Moya et al. (2013) e por Rosa; Scaramuzza e Silva (2015), que observaram concentrações de P em áreas de teca, em torno de 3 e 2,4 (mg dm^{-3}), respectivamente.

A MO variou de 9,78 a 32 (g/kg) (Figura 17). Esses valores podem ser classificados de baixo a médio, sendo que a região que apresenta valores acima de 20 (g/kg) é a de melhor classificação de concentrações de MO (ALVAREZ V ET AL., 1999). Valores próximos foram encontrados por Pelissari; Caldeira e Santos (2014) que encontraram valores de MO, em uma plantação de teca de 9 anos localizada no Mato Grosso, que variaram de 10 a 40 (g/kg). Já os valores de MO encontrados por Behling (2009) em um plantio de teca de 7 anos foram de 55 a 85 (g/kg), superiores aos encontrados nesse trabalho.

Em relação as variáveis ligadas a acidez do solo (Al, H+Al e m%) (Figuras 18 e 19), todas apresentaram valores satisfatórios (baixo ou muito baixo) em quase 100% de sua área (ANEXO), o que são resultados excelentes para a produção de teca, uma vez que valores baixos dessas variáveis estão ligados ao desenvolvimento dessa espécie florestal (ALVARADO; FALLAS, 2004).

O B apresentou valores considerados baixos ($<0,35 \text{ mg dm}^{-3}$) em quase 100% de sua área (Figura 19). Esses valores foram próximos aos encontrados por Behling (2009) que encontrou valores de B, em plantio de teca, que variaram de 0,3 a 0,5 (mg dm^{-3}) na camada superficial do solo. As variáveis T e t mostraram valores que variaram de médio a bom (ANEXO) (Figura 20).

Além de mostrar o padrão local dos atributos químicos do solo no talhão de estudo, a variabilidade espacial também possibilitou correlacionar, espacialmente, cada uma das variáveis do solo com o volume (Figuras 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20). Pode-se observar, nos mapas de variabilidade espacial, que não houve uma tendência das maiores concentrações da maioria dos nutrientes e outros indicadores de fertilidade do solo (Ca, Mg, pH, V%, T e t) estarem nos locais onde houve os maiores valores encontrados para o volume. Já em relação ao P, pode-se observar que os locais onde foram encontradas suas maiores concentrações, também, mostraram os maiores valores para o volume.

Não é possível observar que há uma tendência espacial entre os valores de K e MO (Variáveis que se correlacionaram com as variáveis de produção, através da correlação de spearman) com os valores de volume (Figuras 15 e 17). A não relação com a MO pode estar ligada com a granulometria do solo, uma vez que, em solos muito argilosos, há alta concentração de matéria orgânica (SILVA et al., 2014). Pode-se observar que há uma relação entre os maiores valores concentração de argila ($>350 \text{ g/kg}$) e a quantidade de MO, nos mapas de variabilidade espacial (Figura 17).

A correlação com o fósforo pode ser a responsável pelos maiores valores do volume no centro do talhão, uma vez que o uso anterior dessa área foi cultivado com pimenta. As adubações fosfatadas para o cultivo anterior da pimenta pode ter tido um efeito residual na produção do talhão. O efeito residual do fósforo em plantações está relacionado a lenta disponibilidade desse nutriente fornecida por adubos fosfatados de baixa solubilidade (CAIONE; FERNANDES; LANGE, 2013).

Além da MO os atributos químicos também foram relacionados, espacialmente, com a granulometria do solo, através dos valores de porcentagem de argila (Figuras 14,

15, 16, 17, 18, 19 e 20). A variabilidade espacial da quantidade de argila na área foi feita através do método da mínima curvatura (SANTOS; CUNHA; CASTRO, 2016).

A teca se desenvolve melhor em áreas com porcentagem de argila inferior a 350 g/kg, valores superiores a esses dificultam o seu desenvolvimento devido a sua baixa aeração, que resulta em grande retenção de água, o que dificulta a disponibilidade de oxigênio e o desenvolvimento radicular da teca (CÁRCERES FLORESTAL, 2002; MATRICARDI, 1989 apud JEREZ-RICO; COUTINHO, 2017; OSMAN, 2013). Em relação a área de estudo a maior quantidade de argila, pode-se observar que há uma tendência de as melhores concentrações de determinados nutrientes e indicadores de fertilidade do solo (pH, Ca, Mg, SB, V%, T e t) estarem localizadas nas regiões que apresentam concentração de argila acima de 350 g/kg (Figuras 14, 15, 16 e 20).

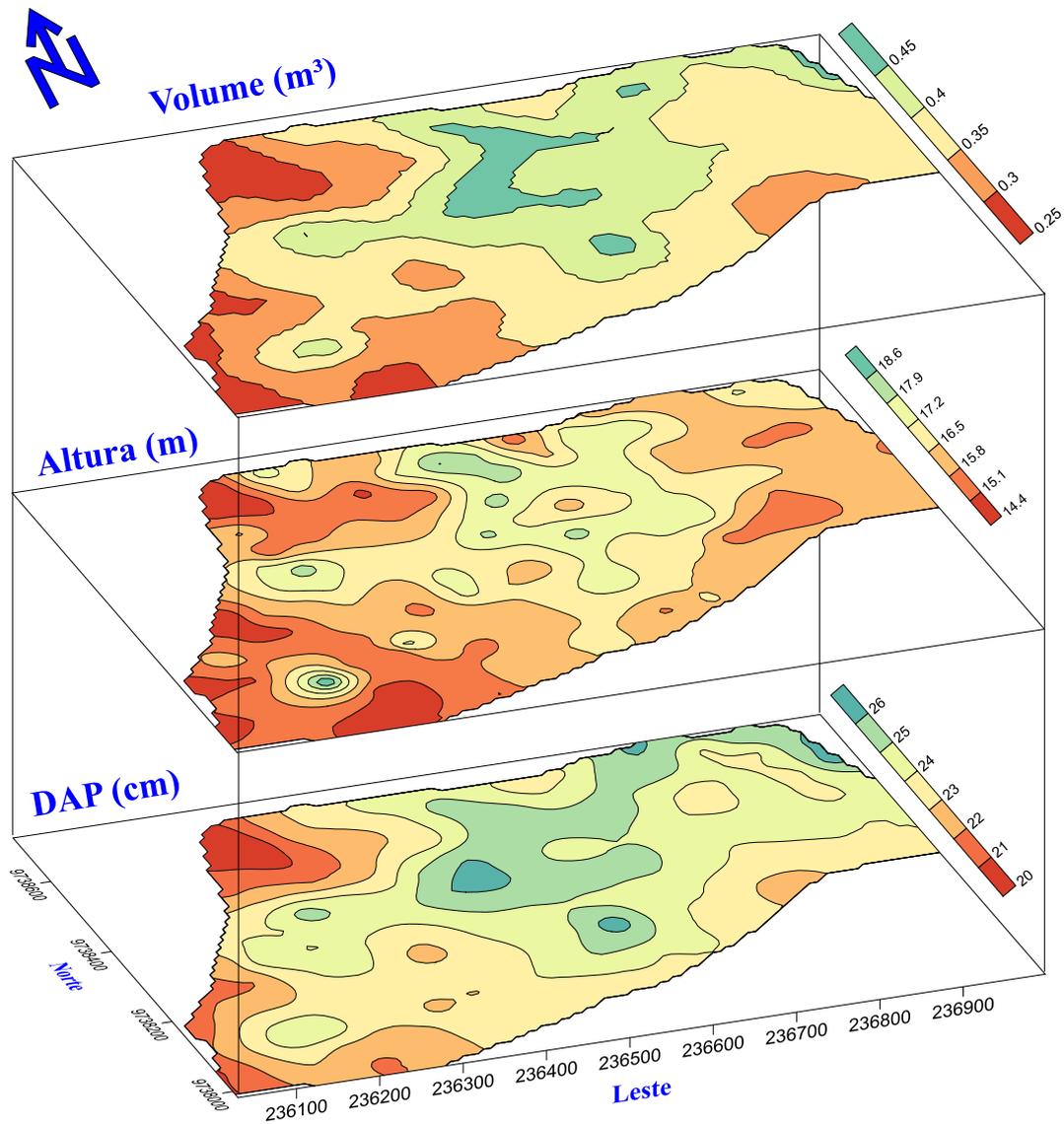
5.6. Variabilidade espacial das variáveis de produção

Além da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, foi também possível realizar a krigagem para as variáveis de produção (DAP, altura total e volume). Pode-se observar que essas variáveis estão espacialmente relacionadas. A região central do talhão é a que melhor apresenta os melhores índices de produção (Figura 21).

A geoestatística, também, é uma excelente ferramenta para analisar o comportamento do desenvolvimento em plantações. No caso de plantios florestais ela pode auxiliar em execução de inventários florestais. Pelissari et al (2012) conseguiram utilizar a geoestatística para analisar a variabilidade espacial do DAP e da altura total em um plantio de teca. Santos et al. (2017) conseguiram utilizar a geoestatística para analisar a variabilidade do volume (m³/ha) do eucalipto.

O uso de mapas de variabilidade espacial também pode auxiliar em práticas de manejo como o desbaste. No primeiro desbaste (a partir 3º ano) o indicador principal para essa prática de manejo é a altura. Os desbastes seguintes devem ser planejados em função do DAP, a avaliação da variabilidade espacial dessa variável pode auxiliar nas tomadas de decisão para o desbaste (CÁRCERES FLORESTAL, 2002).

Figura 21 - Variabilidade espacial do DAP, Altura Total e do Volume, em uma área de plantação de teca de 10 anos, no município de Capitão Poço, no Nordeste Paraense.



Fonte: O autor.

6. CONCLUSÃO

Foram encontrados os modelos exponencial, esférico e gaussiano de semivariogramas, para as variáveis em estudo.

O Índice de dependência espacial variou de moderado a forte, sendo encontrado o IDE forte para a maioria das variáveis.

O pH apresentou valores considerados de classificação baixo e bom para os solos brasileiros, e suas maiores concentrações estão localizadas em áreas com maiores concentrações de importantes nutrientes para a teca (Ca e Mg).

A soma de bases apresentou valores considerados de médio a muito bom. Essa classificação foi representada principalmente pelos valores de Ca e Mg, uma vez que o K apresentou valores considerados baixos em quase 100% da área de estudo.

O P apresentou valores considerados de muito baixo a alto. Foi possível observar uma tendência entre os maiores valores do nutriente com as variáveis de estudo, nos mapas de variabilidade espacial.

Não foi possível observar uma tendência entre os maiores valores de MO, Ca, Mg e K com as variáveis de produção. Em relação a MO essa falta de relação pode estar relacionada a granulometria do solo, uma vez que, a maiores concentrações de MO estão localizadas onde há maior concentração de argila (acima de 350 g/kg).

A não correlação entre as áreas mais férteis e a produção pode estar relacionada ao caráter argiloso dessas áreas.

A correlação da produção com o fósforo pode estar relacionada ao efeito residual de adubações realizadas em plantios anteriores.

A geoestatística se mostrou uma ferramenta adequada para a determinação da variabilidade espacial da fertilidade do solo e das variáveis de produção da teca.

REFERÊNCIAS

ABRAF (Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas). **Anuário estatístico da ABRAF 2013**. Brasília. 2013. 142 p.

ALVARADO, A; FALLAS, J. L. LA SATURACIÓN DE ACIDEZ Y EL ENCALADO SOBRE EL CRECIMIENTO DE LA TECA (*Tectona grandis L.f.*) EN SUELOS ÁCIDOS DE COSTA RICA. **Agronomia Costarricense**. Costa Rica, v. 25, n. 1, p 81 – 87, mar. 2004.

ALVARADO, A. NUTRICION Y FERTILIZACION DE LA TECA. In: ESPINOSA, J. (Ed.). **Informaciones Agronomicas**. Canadá: INPOFOS, 2006. P. 1-8.

ALVARADO, A. NUTRICIÓN Y FETILIZACIÓN DE *Tectona grandis*. In: ALVARADO, A.; RAIGOSA, J. In: **NUTRICIÓN y FERTILIZACIÓN FLORESTAL em REGIONS TROPICALES**. 1. ed. San José, C.R. : Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 2012. p. 317-344.

ALVARADO, A.; FERNÁNDEZ-MOYA, J.; SEGURA, J. M.; VAIDES, E. E.; CAMACHO, M.; AVELLÁN, M. J.; ÁVILLA, C. E. NUTRIENT MANAGEMENT IMPROVEMENTS IN FORESTRY SPECIES. **Better Crops With Plant Food**. [S.I], v. 98, n. 4, p 16 – 18. 2014.

ALVAREZ, V. V. H; NOVAIS, R. F; BARROS, N. F; CANTARUTTI, R. B; LOPES, A. S. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DE SOLOS. In: RIBEIRO, A. C; GUIMARÃES, P. T. G; ALVAREZ, V. V. H (Ed.). **RECOMENDAÇÕES PARA O USO DE CORRETIVOS E FERTILIZANTES EM MINAS GERAIS: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. P. 25 – 32.

BASSO, S. **BIOMASSA, CARBONO E RELAÇÃO ENTRE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DA TECA**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado em ciência florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Paraná, 2016.

BEHLING, M. **NUTRIÇÃO, PARTIÇÃO DE BIOMASSA E CRESCIMENTO DE POVOAMENTOS DE TECA EM TANGARÁ DA SERRA-MT**. 2009. 176 f. TESE (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

BEHLING, M.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F.; KISHIMOTO, C. B.; SMIT. L. EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DE NUTRIENTES PARA FORMAÇÃO DERAÍZES FINAS E MÉDIAS EM POVOAMENTO DE TECA. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.5, p.837-846, 2014.

BHUNIA, G. S.; SHIT, P. K.; CHATTOPADHYAY, R. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). **Annals of Agrarian Science**, Georgia, v. 16, p. 436 – 443. 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agricultura de Precisão** 2014/ 2030. Desenvolvimento Brasília: Mapa/ACS, 2014. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologiaagropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/agenda-estrategica-do-setor-deagricultura-de-precisao.pdf>. Acesso em: 22 março 2019.

BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, CE v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

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

CALDEIRA, S. F.; OLIVEIRA, D. L. C. Desbaste seletivo em ovoamento de *Tectona grandis* com diferentes idades. **Acta Amazonica**, [s.l.], v. 38, n. 2, p.223-228, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 6, p.1501-1511, Sept/Oct. 1994.

CAON, D.; GENUÍ, A. M. Mapeamento de atributos químicos em diferentes densidades amostrais e influência na adubação e calagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p.629-639, abr. 2013.

Cárceres Florestal. **Manual do Cultivo de Teca**, 2003. Disponível em: http://www.caceresflorestal.com.br/Manual_do_cultivo_da_teca-Caceres_Florestal.pdf. Acesso: 22 março 2019.

COLAÇO, A. F. **Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management**. 2012. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012.

COLAÇO, A. F.; MOLIN, J. P.. Variable rate fertilization in citrus: a long term study. **Precision Agriculture**, New York, v. 18, n. 2, p.169-191, 2017.

COLAÇO, A. F.; MOLIN, J. P. **Agricultura de Precisão: Amostragem Georreferenciada**. Piracicaba: Esalq/usp, 2015. Disponível em: http://www.agriculturadeprecisao.org.br/upimg/publicacoes/pub_boletim-tecnico-02---amostragem-georreferenciada-03-02-2015.pdf. Acesso em: 22 março 2019.

COSTA, K. L. **CRESCIMENTO DE TECTONA GRANDIS (TECA) EM SISTEMA SILVICULTURAL DE TALHADIA COMPOSTA EM MINAS GERAIS**. 2011. 77 F. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

CUNHA, H. F. V.; GONÇALVES, J. F. C.; SANTOS JUNIOR, U. M.; FERREIRA, M. J.; PEIXOTO, P. H. P. Biomassa, trocas gasosas e aspectos nutricionais de plantas jovens de pau de balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. Ex Lamb.) Urb.) submetidas à fertilização fosfatada em ambientes contrastantes de irradiância. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 215-230, mar. 2016.

DIAS, L. P. R.; GATIBONI, L. C.; BRUNETTO, G.; ARRUDA, B.; COSTA, M. M. Distribuição e morfologia do sistema radicular de *Eucalyptus dunnii* em resposta à aplicação de fósforo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.16, n.3, p.203-213, 2017.

EMBRAPA. **MANUAL DE MÉTODOS DE ANÁLISE DE SOLO**. Brasília, Df: Embrapa, v. 3, 2017.

FARIAS, P.R.S.; SÁNCHEZ-VILA, X.; BARBOSA, J.C.; VIEIRA, S.R.; FERRAZ, L. C. C. B.; SOLÍS-DELFIN, J. Using geostatistical analysis to evaluate the presence of *Rotylenchulus reniformis* in cotton crops in Brazil: Economic implications, **Journal of Nematology**. v. 34, n.3, p. 232-238, 2002.

FARIAS, P. R. S.; NOCITI, L. A. S.; BARBOSA, J. C.; PERECIN, D. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade em pomares de cítricos usando geoestatística. **Revista Brasileira de fruticultura**. Jaboticabal. v. 25, n. 2, p. 235-241, 2003.

FERNÁNDEZ-MOYA, J.; MURILLO, R.; PORTUGUEZ, E.; FALLAS, J. L.; RIOS, V.; KOTTMAN, F.; VERJANS, J. M.; MATA, R.; ALVARADO, A. Nutrient concentration age dynamics of teak (*Tectona grandis* L.f.) plantations in Central America. **Forest Systems**. [S.I], v.22, n.1, p. 123-133, 2013.

FERNÁNDEZ-MOYA, J.; ALVARADO, A.; MORALES, M.; MIGUEL-AYANZ.; MARCHAMALO-SACRISTÁN. Using multivariate analysis of soil fertility as a tool for forest fertilization planning. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**. [S.I], v.98, p. 155-167. 2014.

FERNÁNDEZ-MOYA, J.; ALVARADO, A.; FALLAS, J. L.; MIGUEL-AYANZ, A. S.; MARCHAMALO-SACRISTÁN, M. N-P-K FERTILISATION OF TEAK (*TECTONA GRANDIS*) PLANTATIONS: A CASE STUDY IN COSTA RICA. **Journal of Tropical Forest Science**, Malaysia, v. 25, n. 4, p. 417-427, 2017.

FIGUEIREDO, E. O. Manejo de Povoamentos Florestais Plantados. In: FIGUEIREDO, E. O.; SÁ, C. P. **Silvicultura e Manejo de Povoamentos de Teca (*Tectona grandis* L. f.)**. Rio Branco: Embrapa, 2015. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1043922/1/25987.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2018.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, L. C.; BARBOSA, L. K. F.; **Teca (*Tectona grandis* L.f.)**: Principais perguntas do futuro empreendedor florestal. Rio Branco, AC: Embrapa Acre, 2005, 89 p.

FIGUEIREDO, E. O.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. **Estimativa do Percentual de Casca e do Fator de Forma em Povoamentos Jovens de Teca (*Tectona grandis* L.f.)**. 2005. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/510535/1/comunicado165.pdf>. Acesso em: 21 março 2019.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem Complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p.

FRANCEZ, L. M. B.; SOUZA, D. V.; TAKEHANA, C. L. I.; BARROS, P. L.C. **Manual para análise de inventário florestal e equação de volume em projetos de manejo florestal sustentável - PMFS**. SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE, 2010. Disponível em: <http://www.acszanzini.net/wp-content/uploads/material/apostilas/APOSTILA%20INVENT%C3%81RIO.pdf>. Acesso em: 21 março 2019.

FREDDI, O. S.; TAVANTI, R. F. R.; SOARES, M. B.; ALMEIDA, F. T.; PERES, F. S. C. PHYSICAL-CHEMICAL QUALITY OF A LATOSSOL UNDER DIRECT SEEDING AND SOYBEAN-CORN SUCCESSION IN THE CERRADO AMAZONIAN ECOTONE. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 4, p. 991 – 1000, out. – dez., 2017.

FU, W.; ZHAO; K.; ZHANG, C.; WU, J.; TUNNEY, H.; Outlier identification of soil phosphorus and its implication for spatial structure modeling. **Precision Agriculture**, Nova York, v. 17, p. 121 – 135, aug. 2015.

GIL, R. L. **CARACTERISAÇÃO FÍSICO QUÍMICO E ANÁLISE DE PRODUTIVIDADE DO POVOAMENTO FLORESTAL DE *Tectona grandis* L. f. UTILIZANDO A SILVICULTURA DE PRECISÃO**. 2017. 82f. Dissertação (Mestrado em ciência ambientais) – Universidade de Cuiabá, Cuiabá, 2017.

Gil, R.L.; Lansanova, L.R.; Chig, L.A.; Almeida Garrett, A.T.; Oliveira, R. V, Oliveira Filho, P. C.; Ferreira, K.R. MODELLING SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES IN *TECTONA GRANDIS* STANDS IN CENTRAL-WEST

BRAZIL. **Journal of Tropical Forest Science**, Malásia, V. 30, p 376 – 383, Nov. 2018.

GIMENEZ, L. M.; ZANCANARO, L. MONITORAMENTO DA FERTILIDADE DO SOLO OCM A TÉCNICA DA AMOSTRAGEM EM GRADE. **INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS**. Piracicaba, SP, nº 138, p. 19-25, jun. 2012.

GREGO, C. R.; OLIVEIRA, R. P. Conceitos Básicas da Geoestatística. In: OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDÃO, Z. N. **Geoestatística aplicada na Agricultura de Precisão utilizando o Vesper**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2015. p. 41 – 62.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística Operacional**. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988.145 p.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAN, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 682 p.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C. A. Agricultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de Precisão: Resultados de Um Novo Olhar**. Brasília: Embrapa, 2014, p. 21 – 33.

JEREZ – RICO, M.; COUTINHO, S. A. Natural Teak Forests – Silviculture and Stand Management. In: KOLLERT, K.; KLEINE, M.; (Ed.). **The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources**. Austria: IUFRO, 2017. p. 49 – 65.

KEOGH, R. M. La teca y su importância económica a nivel mundial. In: CAMINO, R.; MORALES, J. P. **Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades**. Turrialba: CATIE, 2013. p. 8 – 28.

KHAINING, N.; Oo, M. M.; TUN, T. N.; LWIN. O.; MINN, Y.; KLEINE, M. Natural Teak Forests – Silviculture and Stand Management. In: KOLLERT, K.; KLEINE, M.; (Ed.). **The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources**. Austria: IUFRO, 2017. p. 39 – 47.

KOLLERT, W. and CHERUBINI, L. **Teak resources and market assessment 2010**. FAO Planted Forests and Trees Working Paper FP/47/E, Rome, 2012. Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-an537e.pdf>. Acesso: 22 março 2019.

KOCH, B.; KHOSLA, R. The Role of Precision Agriculture in Cropping Systems. **Journal of Crop Production**, Philadelphia, v.9, p. 361-381, 2003.

KUMAR, P. S. NUTRIENT DYNAMICS OF TEAK PLANTATIONS AND THEIR IMPACT ON SOIL PRODUCTIVITY - A CASE STUDY FROM INDIA. Disponível em: < <https://exptimes.com/admin/upload/pks.pdf>>. Acesso em: 21 Mar. 2019.

LIMA, J. S. S.; ALVES, D. I.; COELHO, R. I.; STURIÃO, W. P.; SILVA, S. A. Spatial variability in the diagnosis of nutritional status in the papaya. **Revista Ciência Agrônômica**. Fortaleza, v. 47, n. 2, p. 264 – 274, abr – jun, 2016.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. Influência do Tipo de Amostragem na Estimativa de Volume de Madeira de Eucalipto por Krigagem. **Floresta Ambient.**, [s.l.], n. , p.0-13, 2016.

MAEDA, S.; AHRENS, S.; CHIARELLO, S. R.; OLIVEIRA, E. B.; STOLLE, L.; FOWLER, J. A. P.; BOGNOLA, I. A. Silvicultura de Precisão. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de Precisão: Resultados de Um Novo Olhar**. Brasília: Embrapa, 2014, p. 467 – 477.

MALAVOLTA, E. **MANUAL DE NUTRIÇÃO MINERAL DE PLANTAS**. São Paulo: CERES, 2006. 638 p.

MATRICARDI, W. A. T. **Efeitos dos fatores de solo sobre o desenvolvimento da teca (*Tectona grandis L. F.*) cultivada na grande Cáceres – Mato Grosso**. 1989. 135 f. Dissertação (Mestrado em ciências florestais), Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **AGRICULTURA DE PRECISÃO: BOLETIM TÉCNICO**. Brasília, 2013. 40 p.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F.; **AGRICULTURA DE PRECISÃO**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos; 2015. 238 p.

MONTENEGRO, F.; KOTMAN, F.; CAMINO, R. Tecnologías disponibles para el cultivo de teca. In: CAMINO, R.; MORALES, J. P. **Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades**. Turrialba: CATIE, 2013. p. 46 – 52.

OLIVEIRA, P. C. G. **VARIABILIDADE ESPACIAL DE MACRONUTRIENTES CORRELACIONADOS COM A PRODUTIVIDADE EM POMARES CÍTRICOS DO MUNICÍPIO DE CAPITÃO POÇO, PA**. 69f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2007.

OSMAN, K. T. **FOREST SOILS: Properties and management**. Germany: Springer, 2013. 217 p.

PANDEY, D.; BROWN, C. Teak: a global overview. **Unasyuva**, Fao, v. 51, n. 201, p.3-13, 2000.

PELISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; SANTOS, V. S.; SANTOS, J. O. P. Correlação especial dos atributos químicos do solo com o desenvolvimento da teca em Mato Grosso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 247-256, jul./set. 2012.

PELISSARI, A. L. **SILVICULTURA DE PRECISÃO APLICADA AO DESENVOLVIMENTO DE *Tectona grandis* L.f. NA REGIÃO SUL DO ESTADO DE MATO GROSSO**. 2012. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Mato Grosso, 2012.

PELISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; SANTOS, V. S.; SANTOS. VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM POVOAMENTO DE *Tectona grandis*. **CERNE**, [s.l.], v. 20, n. 3, p.377-384, set. 2014.

PIRES, J. L. F.; CORASSA, G. M.; RAMBO, A. C.; KEBER, L.; PASINATO, A.; DALMAGO, G. A.; SILVA JÚNIOR, J. P.; SANTI, A.; SANTI, A. L.; GUARIENTI, E. M.; CUNHA, G. R.; STRIEDER, M. L.; FOCHESSATTO, E. Aplicação de nitrogênio a taxa variável em cultura de trigo: estudo de caso na Unidade Piloto de Agricultura de Precisão de Não-Me-Toque, RS. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de Precisão: Resultados de Um Novo Olhar**. Brasília: Embrapa, 2014, p. 287 – 294.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronomicos e florestais**. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.

PITA, J. D. **VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DENDROMÉTRICOS EM PLANTIO DE TECA (*Tectona grandis* L. f. *Lamiaceae*) NO MUNICÍPIO DE ABAETETUBA-PA**. 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2012.

PONTES, M. S.; SANTIAGO, E. F.; NOBREGA, M. A. S.; FREIDA, V. M. B. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA USANDO DIMENSÕES LINEARES SOBRE OS ATRIBUTOS BIOMÉTRICOS EM SEMENTES DE *Annona reticulata* (L.) Vell. (ANNONACEAE). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 696-707, abr.-jun., 2018.

RAIJ, V. B.; Cantarella, H. Quaggio, J. A.; Furlani, A. M. C. **BOLETIM TÉCNICO 100: Recomendação de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Iac, 1997. 285 p.

RENDU, J. M. **An introduction to geostatistical methods of mineral evaluation.** Johannesburg: Institute of Mining and Metallurgy, 83p, 1978.

RESENDE, A. V.; COELHO, A. M. AMOSTRAGEM PARA MAPEAMENTO E MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO NA ABORDAGEM DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. **INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS**, Piracicaba, SP, nº 159, set. 2017.

ROSA, T. F. D.; SCARAMUZZA, W. L. M. P.; SILVA, R. G. CONCENTRAÇÃO E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM POVOAMENTOS DE TECA NO ESTADO DE MATO GROSSO, BRASIL. **CERNE**, [S.I.], v. 21, n.1, p. 51 – 57, 2015.

SANTOS, A. V. F.; OLIVEIRA, C. F. **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DOS ADULTOS DE *Rhynchophorus palmarum* LINNAEUS, 1764 (COLEOPTERA: CURCULIONIDAE) EM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL.** 2016. 54 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2016.

SANTOS, H. S.; CUNHA, G. N.; CASTRO, J. R. Avaliação Qualitativa das Técnicas de Interpolação de Mínima Curvatura, Krigagem e Bidirecional na Formação de imagens. **Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana**, [S.I.], n. 4, p. 2-6, 2016.

SANTOS, M. C.; ROVEDA, M.; ZANON, M. L.B.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ROILK, M.; PACHECO, J. M.; SCAVINSKI, V. Inventário Florestal Utilizando Técnicas de Silvicultura de Precisão em Povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Floresta e Ambiente**, Serropédica, v. 24, p.1-9, 1 jan. 2017.

SANTOS, R. O.; FRANCO, L. B.; SILVA, S. A.; SODRÉ, G. A. MENEZES, A. A. Spatial variability of soil fertility and its relation with cocoa yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, V.21, p. 88 – 93, Jan. 2017.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **SISTEMA BRASILEIRO DE CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS.** Brasília: Embrapa, v. 5, n. 1, 2018.

SILVA, F. M.; SOUZA, Z. M.; FIGUEIREDO, C.A.P.; VIEIRA, L. H. S.; OLIVEIRA, E. VARIBILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS QUIMICOS E PRODUTIVIDADE DA CULTURA DO CAFÉ EM DUAS SAFRAS AGRÍCOLAS. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev., 2008.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; XAVIER, A. C.; TEIXEIRA, M. M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 15 – 22, jan. 2010.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio da análise de componentes principais e geoestatística. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 2, p. 271 – 277, mar/abr. 2012.

SILVA, A. S.; SILVA, I. F.; BANDEIRA, L. B.; DIAS, B. O.; SILVA NETO, L. F. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.44, n.10, p.1783-1789, out, 2014.

SOUZA, Z. M.; SOUZA, G. S.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Número de amostras na análise geoestatística e na krigagem de mapas de atributos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 44, n. 2, p. 261 – 268, fev. 2014.

TAYLOR, S. E.; MCDONALD, T. P.; FULTON, J. P.; SHAW, J. N.; CORLEY, F. W.; BRODBECK, C. J. **Precision forestry in the southeast U.S.** In: INTERNATIONAL PRECISION FORESTRY SYMPOSIUM, 3., 2006, South Africa Proceedings. 2006. p. 397-414.

TSUKAMOTO FILHO, A. A.; SILVA, M. L.; COUTO, L.; MÜLLER, M. D. ANÁLISE ECONÔMICA DE UM PLANTIO DE TECA SUBMETIDO A DESBASTES. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.4, p.487-494, set. 2003.

TREVISAN, R. G.; MOLIN, J. P.. **Agricultura de Precisão: Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para Agricultura de Precisão**. Piracicaba, sp: Esalq/Usp, 2014. Disponível em: <http://www.agriculturadeprecisao.org.br/upimg/publicacoes/agricultura-de-precisao---boletim-tecnico--02-12-2014.PDF>. Acesso em: 21 março 2019.

UGALDE ARIAS, L. A. **TEAK: New trends in silviculture, commercialization and wood utilization**. Cartago, Costa Rica: International Forestry and Agroforest, 2013.

VASU, D.; SINGH S. K.; SAHU, N.; TIWARY, P.; CHANDRAN, P.; DURAISAMI, V. P.; RAMAMURTHY, V.; LALITHA, M.; KALAISELVI, B. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. **Soil & Tillage Research**, v. 169, p. 25 – 34, Jun. 2017.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, j. I.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**: a journal of agricultural science published by the california agricultural experiment station, N.i., v. 51, n. 3, p.1-75, jun. 1983.

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P.; GONZÁLEZ, A. P. JACK KNIFING FOR SEMIVARIOGRAM VALIDATION. **Bragantia**, Campinas, v. 69, Suplemento, p. 97-105, 2010.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A.. **Geostatistics for environmental scientists: Statistics in Practice**. 2. ed. London: John Wiley & Sons, 2007. 332 p.

WEHR, J. B.; SMITH, T. E.; MENZIES, N. W. Influence of soil characteristics on teak (*Tectona grandis* L. f.) establishment and early growth in tropical Northern Australia. **Journal of Forest Research**,[S.I], v. 22, n. 3, p. 153 – 159, 2017.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **GEOESTATÍSTICA: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 216. p.

ZANÃO, L. A. Z.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. Q.; P, J. M. A. VARIABILIDADE ESPACIAL DOS TEORES DE MACRONUTRIENTES EM LATOSSOLOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO. **Revista BRASILEIRA de Ciência do Solo**. [S.I], v. 34, p. 389 – 400, 2010.

ZECH, W.; DRECHSEL, P. Relationships between growth, mineral nutrition and site factors of teak (*Tectona grandis*) plantations in the rainforest zone of Liberia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 41, p. 221-235, 1991.

ZONTA, J. H; BRANDÃO, Z. N; MEDEIROS, J. C; SANA, R. S; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, n.6, p.595–602, 2014.

ANEXO

Classes de interpretação para a acidez ativa do solo (pH)¹ - Classificação agrônômica².

Característica	Muito Baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito Bom
pH	<4,5	4,5 – 5,4	5,5 – 6,0	6,1 – 7,0	>7,0

1/ pH em H₂O, relação 1:2,5, TFSA: H₂O. 2/ A qualificação utilizada indica adequado (Bom) ou inadequado (muito baixo e baixo ou alto e muito alto).

Adaptado de ALVAREZ V ET AL., 1999.

Classes de interpretação de fertilidade do solo para a matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica.

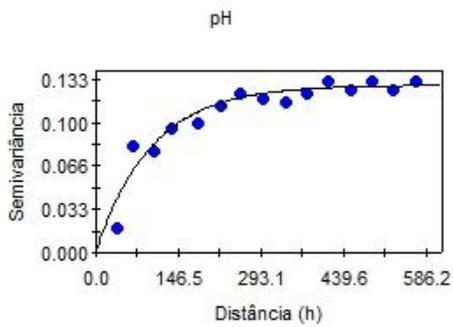
Característica	Unidade	Classificação				
		Muito Baixo	Baixo	Médio ¹	Bom	Muito Bom
Matéria orgânica (MO)²	%	≤ 0,70	0,71 – 2,0	2,01 – 4,00	4,01 – 7,00	>7,00
Cálcio trocável (Ca²⁺)³	cmol_c dm⁻³	≤ 0,40	0,41 – 1,20	1,21 – 2,40	2,41 – 4,00	>4,00
Magnésio trocável (Mg²⁺)³	cmol_c dm⁻³	≤ 0,15	0,16 – 0,45	0,46 – 0,90	0,91 – 1,50	>1,50
Acidez trocável (Al³⁺)³	cmol_c dm⁻³	≤ 0,20	0,21 – 0,50	0,51 – 1,00	1,01 – 2,00¹⁰	>2,00¹⁰
Soma de Bases (SB)⁴	cmol_c dm⁻³	≤ 0,60	0,61 – 1,80	1,81 – 3,60	3,61 – 6,00	>6,00
Acidez potencial (H+Al)⁵	cmol_c dm⁻³	≤ 1,00	1,01 – 2,50	2,51 – 5,00	5,01 – 9,00¹⁰	>9,00¹⁰
CTCefetiva (t)⁶	cmol_c dm⁻³	≤ 0,80	0,81 – 2,30	2,31 – 4,60	4,61 – 8,00	>8,00
CTC pH 07 (T)⁷	cmol_c dm⁻³	≤ 1,60	1,61 – 4,30	4,31 – 8,60	8,61 – 15,00	>15,00
Saturação por Al³⁺ (m)⁸	%	≤ 15,00	15,1 – 30,0	30,1 – 50,0	50,1 – 75,0¹⁰	>75,0¹⁰
Saturação por bases (V)⁹	%	≤ 20,0	20,1 – 40,0	40,1 – 60,0	60,1 – 80,0	>80,0
Potássio (K)¹¹	mg dm⁻³	≤ 15	16 - 40	41 – 70¹²	71 - 120	>120
Boro (B)¹³	mg dm⁻³	≤ 0,15	0,16 – 0,35	0,36 – 0,60	0,61 – 0,90	> 0,90
Fósforo (P)¹⁴	mg dm⁻³	0 - 2	3 - 5	6 - 8	9 – 16¹⁵	>16¹⁶

¹O limite superior desta classe indica o nível crítico. ²Método Walkley & Black; M.O. = 1,724 x C.O. ³Método KCl 1 mol/L. ⁴SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺. ⁵H + Al, Método Ca(OAc)₂ 0,5 mol/L, pH 7. ⁷t = SB + Al³⁺. ⁷T = SB + (H + Al). ⁸m = 100 Al³⁺/t. ⁹V = 100 SB/T. ¹⁰A interpretação destas características, nestas classes, deve ser alta e muito alta em lugar de bom e muito bom. ¹¹Método melich – 1. ¹²O limite superior dessa classe indica nível crítico. ¹³Método água quente. ¹⁴Resina. ¹⁵Alto. ¹⁶Muito alto.

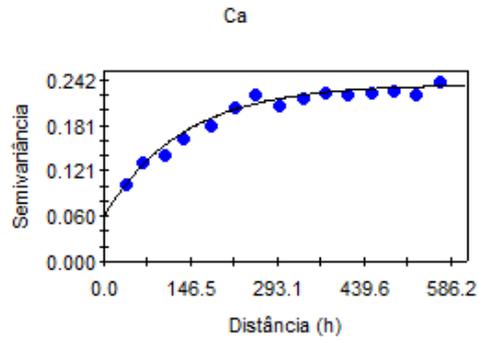
Adaptado de ALVAREZ V ET AL., 1999 e RAIJ et al., 1996

APÊNDICE

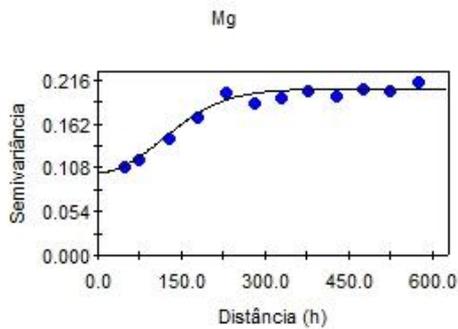
Semivariogramas Experimentais



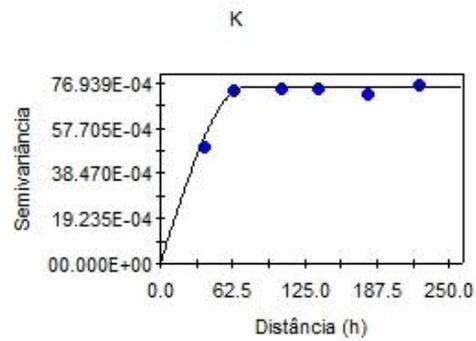
Exponential model ($C_0 = 0.00130$; $C_0 + C = 0.12860$; $A_0 = 99.0$;
RSS = $1.063E-03$)



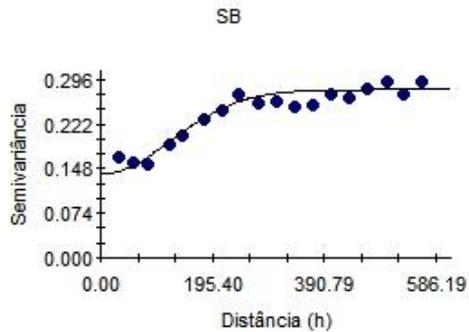
Exponential model ($C_0 = 0.06100$; $C_0 + C = 0.23600$; $A_0 = 133$;
RSS = $6.729E-04$)



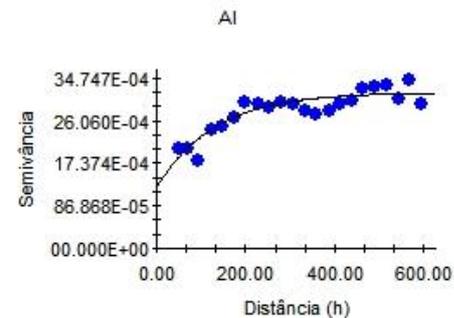
Gaussian model ($C_0 = 0.10180$; $C_0 + C = 0.20460$; $A_0 = 161.0$;
RSS = $4.973E-04$)



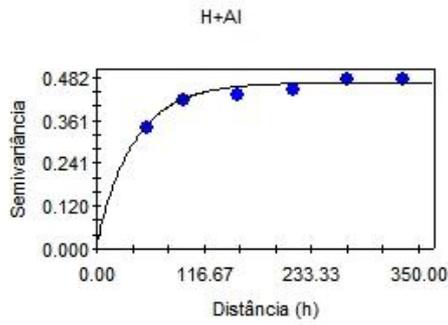
Spherical model ($C_0 = 0.00001$; $C_0 + C = 0.00753$; $A_0 = 72.80$;
RSS = $8.605E-08$)



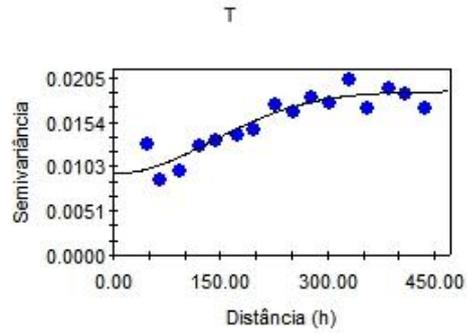
Gaussian model ($C_0 = 0.140$; $C_0 + C = 0.280$; $A_0 = 173.00$; r_2 ;
RSS = $3.056E-03$)



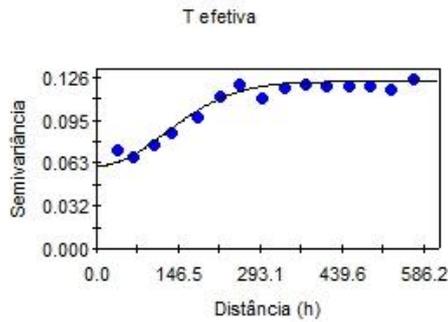
Exponential model ($C_0 = 0.001$; $C_0 + C = 0.003$; $A_0 = 129.00$; r ;
RSS = $7.679E-07$)



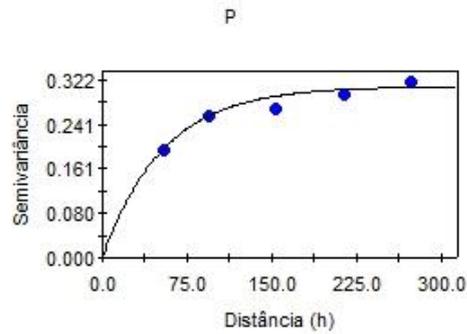
Exponential model ($C_0 = 0.019$; $C_0 + C = 0.468$; $A_0 = 41.30$; r_2 RSS = $8.907E-04$)



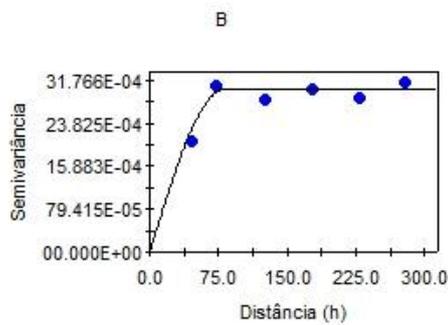
Gaussian model ($C_0 = 0.009$; $C_0 + C = 0.019$; $A_0 = 194.50$; r_2 RSS = $2.621E-05$)



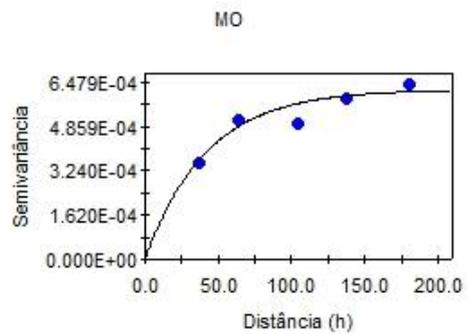
Gaussian model ($C_0 = 0.06120$; $C_0 + C = 0.12340$; $A_0 = 175.0$ RSS = $2.463E-04$)



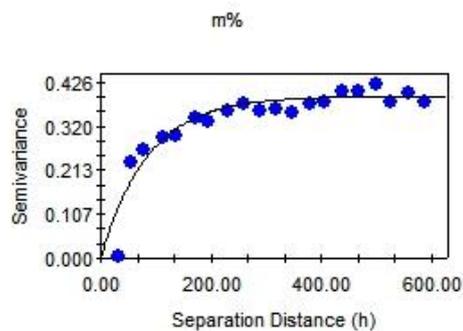
Exponential model ($C_0 = 0.00010$; $C_0 + C = 0.31020$; $A_0 = 53.5$ RSS = $5.869E-04$)



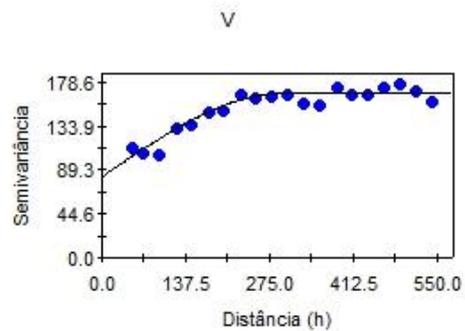
Spherical model ($C_0 = 0.00000$; $C_0 + C = 0.00302$; $A_0 = 82.10$ RSS = $1.067E-07$)



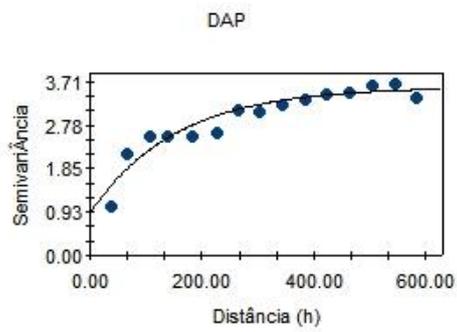
Exponential model ($C_0 = 0.00000$; $C_0 + C = 0.00062$; $A_0 = 41.8$ RSS = $6.818E-09$)



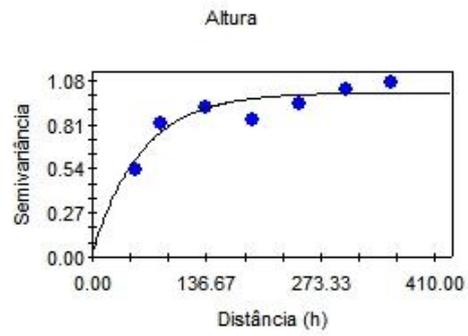
Exponential model ($C_0 = 0.001$; $C_0 + C = 0.393$; $A_0 = 85.00$; r_2 RSS = 0.0192)



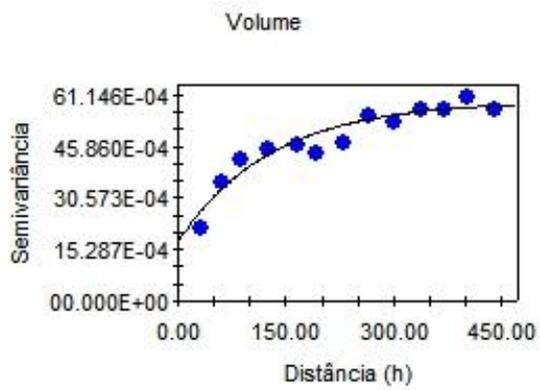
Spherical model ($C_0 = 82.60000$; $C_0 + C = 167.90000$; $A_0 = 30$ RSS = $864.$)



Exponential model ($C_0 = 0.907$; $C_0 + C = 3.597$; $A_0 = 152.00$; r
 RSS = 0.651)



Exponential model ($C_0 = 0.028$; $C_0 + C = 1.009$; $A_0 = 58.50$; r_2
 RSS = 0.0293)



Exponential model ($C_0 = 0.002$; $C_0 + C = 0.006$; $A_0 = 129.40$; r
 RSS = 1.341E-06)