

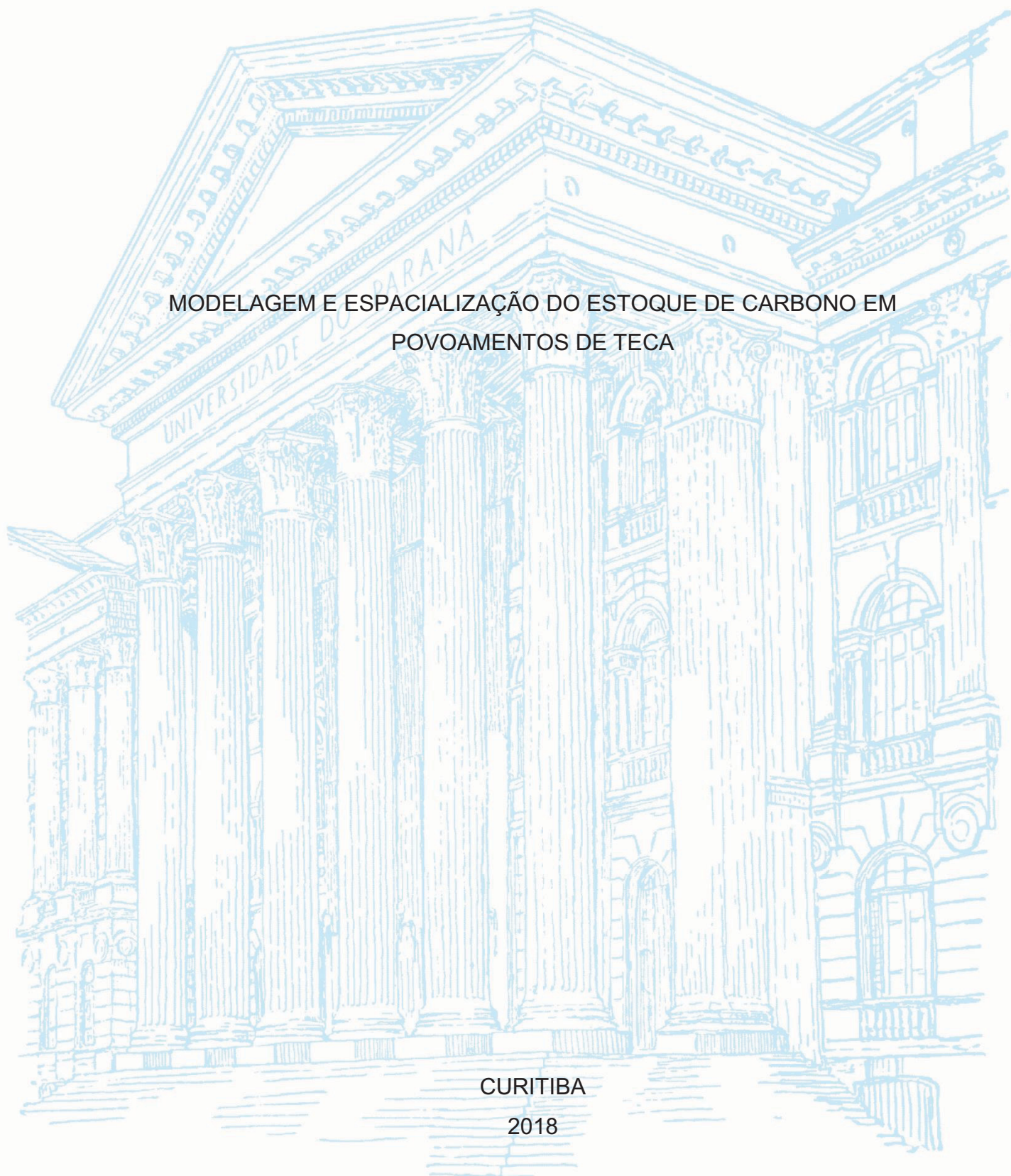
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

IASMIN FERNANDA PORTELA PFUTZ

MODELAGEM E ESPACIALIZAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO EM
POVOAMENTOS DE TECA

CURITIBA

2018



IASMIN FERNANDA PORTELA PFUTZ

MODELAGEM E ESPACIALIZAÇÃO DO ESTOQUE DE CARBONO EM
POVOAMENTOS DE TECA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao MBA em Gestão Florestal do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como pré-requisito para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Allan Libanio Pelissari

Coorientadora: Prof.^a Dra. Carla Krulikowski Rodrigues

CURITIBA

2018

RESUMO

Atividades antrópicas têm intensificado o processo natural de efeito estufa, elevando a temperatura média da Terra e causando mudanças climáticas. Nesse contexto, surgiu o Protocolo de Quioto com o objetivo de vincular legalmente os países que se comprometeram a diminuir e estabilizar suas emissões de gases de efeito estufa. O Protocolo previu também a utilização de mecanismos de flexibilização, com destaque para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo que permite que países desenvolvidos possam financiar projetos de plantio de florestas ou de energia limpa em países em desenvolvimento, gerando assim os créditos de carbono. Nesse cenário a implantação de florestas de teca pode contribuir significativamente para a fixação de carbono, agregando valor a produção e auxiliando na mitigação das mudanças climáticas. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo demonstrar o potencial da inserção de povoamentos de teca no mercado de carbono, pela quantificação do estoque de carbono e variabilidade espacial dessa variável utilizando a geoestatística. Por meio de 46 parcelas permanentes alocada em 213 hectares de plantios de teca, foram calculadas as estimativas dos estoques de carbono aéreo e radicular dos dois anos de idade ao decimo segundo ano. Em seguida, foi realizada uma análise exploratória dos dados, e posteriormente a etapa de modelagem geoestatística com o cálculo das semivariâncias seguida da interpolação e espacialização do estoque de carbono pelo método da krigagem ordinária pontual. A seleção do melhor ajuste foi determinada com base no maior coeficiente de determinação e no menor valor da soma de quadrados dos desvios. Para ambas as variáveis estoque de carbono, o modelo esférico de semivariograma foi o mais eficiente para modelar a variabilidade espacial, apresentando os valores mais altos de coeficiente de determinação e mais baixos de soma dos quadrados dos desvios. Os resultados sugerem que plantios de teca tem potencial para inserção em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, porém recomenda-se o desenvolvimento de equações de estoque de carbono para a área de estudo, além da elaboração de trabalhos referentes a viabilidade econômica de plantios de teca para projetos de carbono.

Palavras-chave: Geoestatística. Créditos de carbono. Krigagem. Teca.

ABSTRACT

Anthropic activities have intensified the natural process of the greenhouse effect, raising the Earth's average temperature and causing climate change. In this context, the Kyoto Protocol was created with the objective of legally binding the countries that have committed to reduce and stabilize their greenhouse gas emissions. The Protocol also provided the use of flexibilization mechanisms, particularly the Clean Development Mechanism, which allows developed countries to finance forest plantations or clean energy projects in developing countries, thereby generating carbon credits. In this context, the implantation of teak forests can contribute significantly to carbon sequestration, adding value to production and helping to mitigate climate change. The aim of this work was to demonstrate the potential of teak stands in the carbon market by quantifying the carbon stock and spatial variability of this variable using geostatistics. By means of 46 permanent plots allocated in 213 hectares of teak plantations, estimates of total tree and root carbon stocks from the two years of age to the twelfth year were calculated. Afterwards, an exploratory analysis of the data was carried out, followed by the geostatistical modeling stage with the semivariance calculation followed by the interpolation and spatialization of the carbon stock by the ordinary point kriging method. The selection of the best fit was determined based on the highest coefficient of determination and the smallest value of the sum of squares from deviations. For both carbon stock variables, the spherical semivariogram model was the most efficient for modeling spatial variability, presenting the highest values of coefficient of determination and lowest of sum of squares from deviations. The results suggest that teak plantations have potential for inclusion in Clean Development Mechanism projects, but the development of carbon stock equations for the study area is recommended, as well as the elaboration of works related to the economic viability of teak plantations for carbon.

Keywords: Geostatistics. Carbon credits. Kriging. Teak.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
2	REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1	RETROSPECTO HISTÓRICO DOS ACORDOS INTERNACIONAIS	7
2.2	MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO	8
2.3	GEOESTATÍSTICA	11
2.3.1	Semivariograma	12
2.3.2	Krigagem ordinária	14
3	MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
3.2	COLETA DE DADOS	17
3.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS	17
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1	ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS	18
4.2	MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DO CARBONO AÉREO E RADICULAR ..	20
5	CONCLUSÃO	29
	REFERÊNCIAS	30

1 INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um processo natural, que causa o aumento da temperatura da Terra devido a retenção do calor por gases atmosféricos, como: metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, entre outros. Porém, as atividades antrópicas têm intensificado esse processo natural, elevando a temperatura média e causando mudanças climáticas. Com o objetivo de reduzir e estabilizar a emissão dos gases de efeito estufa (GEEs), o Protocolo de Quioto foi assinado em 1997, o qual estipulou metas concretas de redução de emissões.

O Protocolo previu também a utilização de mecanismos de flexibilização, com destaque para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permite que países desenvolvidos possam financiar projetos de plantio de florestas ou de energia limpa em países em desenvolvimento, gerando assim os créditos de carbono. Esses créditos têm sido internacionalmente negociados e ganharam, com o Acordo de Paris ratificado pelo Brasil em 2016, mais um incentivo por meio do “Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável (MDS)”, que tem uma visão mais ampla do MDL, pois prevê a possibilidade de compra de créditos de carbono pelas duas partes.

Nesse contexto, os povoamentos florestais desempenham um papel importante no mercado global de carbono, devido a sua capacidade de sequestrar e estocar CO₂, por meio da fotossíntese. Segundo Sanquetta et al., (2018), no período de 1990-2016 os povoamentos florestais brasileiros proporcionaram a remoção de 4,905 bilhões t CO_{2eq}. Assim, além de prover a matéria-prima para as indústrias de base florestal, as árvores plantadas auxiliam na mitigação das mudanças climáticas.

A teca é considerada uma das mais importantes espécies arbóreas do mundo para fins comerciais, tendo ganhado reputação mundial devido a durabilidade e beleza de sua madeira. Desde sua implantação no Brasil na década de 1960, houve uma grande expansão de plantios comerciais da espécie, localizados principalmente nos estados do Mato Grosso e Pará. Estima-se que 87.502 ha são cobertos por povoamentos de teca (IBÁ, 2017), podendo haver mais de 20.000 ha de plantações com menos de sete anos no Sudeste do Pará (SANQUETTA et al., 2016). Dessa forma, a implantação de florestas de teca pode contribuir significativamente para a fixação de carbono, agregando valor à produção, devido ao

alto preço da madeira, e aumento dos benefícios ambientais em decorrência da mitigação dos efeitos climáticos.

Com isso, para medir a contribuição de povoamentos de teca em relação a fixação de carbono, bem como seu valor econômico, é essencial obter informações sobre a quantidade e os padrões de armazenamento de carbono num determinado momento, além da taxa de sequestro de carbono (CHANAN; RIANY, 2014).

Diante disso, objetiva-se com este trabalho demonstrar o potencial da inserção de povoamentos de teca no mercado de carbono, por meio da quantificação do estoque de carbono e variabilidade espacial dessa variável utilizando a geoestatística. Tendo como objetivos específicos: 1) Determinar o estoque de carbono aéreo e das raízes; 2) aplicar a geoestatística para caracterizar as dinâmicas e as correlações espaciais das variáveis estudadas; e 3) avaliar o potencial de inserção de povoamentos de teca no mercado de carbono.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 RETROSPECTO HISTÓRICO DOS ACORDOS INTERNACIONAIS

Pesquisas que evidenciam o aquecimento global, devido à ação antropogênica, ganharam legitimidade científica na década de 1950 e se consolidaram ainda mais nas décadas seguintes (LEITE, 2015). Porém, essa temática entrou em pauta, pela primeira vez em 1972 na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, também conhecida como Conferência de Estocolmo. É considerada como um marco inicial da colaboração internacional para a proteção do meio ambiente.

Essa Conferência foi importante pois promoveu discussões e debates internacionais acerca das mudanças climática. Nesse sentido, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa das Nações Unidas para Meio Ambiente (PNUMA) criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (em inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC*), que tem por objetivo a produção de relatórios que difundam todo o conhecimento científico sobre mudanças climáticas.

Em seu primeiro relatório, o IPCC constatou a interferência de ações antrópicas no equilíbrio climático do planeta, por meio da emissão de GEEs. Além disso, o estudo previu o aumento em 0,3% a 0,6% da temperatura média da Terra por década, e indicou, como principal causa, a liberação de GEEs pela queima de combustíveis fósseis e atividade humana. Dentre os principais GEEs constam: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HCFs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) (IPCC, 2004; AUGUSTYNCZIK, 2018).

Dessa forma, foi criado o primeiro tratado a abordar sobre transformações climáticas, a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), que tinha como objetivo a estabilização das concentrações de GEEs na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático (BRASIL, 1998). Inicialmente, o tratado não fixou limites para as emissões de GEE, porém incluiu os protocolos que devem criar limites obrigatórios de emissões.

Os países signatários do CQNUMC, foram divididos em dois grupos de países: Anexo I (países desenvolvidos) e não Anexo I (países em desenvolvimento). Essa divisão levou em consideração o princípio da responsabilidade comum, porém diferenciadas, que afirma que os países devem proteger o sistema climático em benefício das gerações presentes e futuras, de forma igualitária, porém em conformidade com suas respectivas capacidades. Diante disso as principais responsabilidades acerca das mudanças climáticas foram atribuídas aos países do Anexo I, ao passo que os países não Anexo I foram estimulados a aplicar novas tecnologias na busca de um desenvolvimento sustentável (MMA, 2017).

O Artigo 7 da CQNUMC estabeleceu a criação da Conferência das Partes, órgão supremo que acompanha, regulamenta e promove a implementação dos projetos dessa Convenção (BRASIL, 1998). Durante a terceira Conferência das partes (COP-3), em 1997, surgiu o Protocolo de Quioto, acordo que definiu metas concretas de redução de emissão de GEEs para os países integrantes do Anexo I.

No entanto, esse protocolo só entrou em vigor em 2005, após o atendimento às condições que exigiam a ratificação de pelos 55 (cinquenta e cinco) países, que contabilizassem no total pelo menos 55% das emissões totais de dióxido de carbono em 1990. Após sua ratificação, os países do Anexo I, que possuíam os maiores índices de emissão de GEEs se comprometeram a reduzir suas emissões combinadas de gases de efeito estufa em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990, no período de 2008 a 2012 (BRASIL, 2002).

Objetivando facilitar o cumprimento dessas metas de redução, o Protocolo previu a criação de três instrumentos comerciais chamados de mecanismos de flexibilização, com destaque para os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) que permitem que os países industrializados alcancem suas metas individuais por meio de projetos implantados em países em desenvolvimento (BRASIL, 2002).

2.2 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO

O objetivo do MDL, previsto no Artigo 3 do Protocolo de Quioto, é prestar assistência aos países não Anexo I para que atinjam o desenvolvimento sustentável e ajudar os países do Anexo I no cumprimento de seus compromissos de redução de emissão de GEE (BRASIL, 2002). Esse mecanismo possibilita que um país desenvolvido, possuidor de recursos financeiros e com necessidade de redução de

GEE aplique seus recursos em países em desenvolvimento, viabilizando o desenvolvimento sustentável por meio da implementação de projeto capaz de contribuir para a mitigação de GEEs.

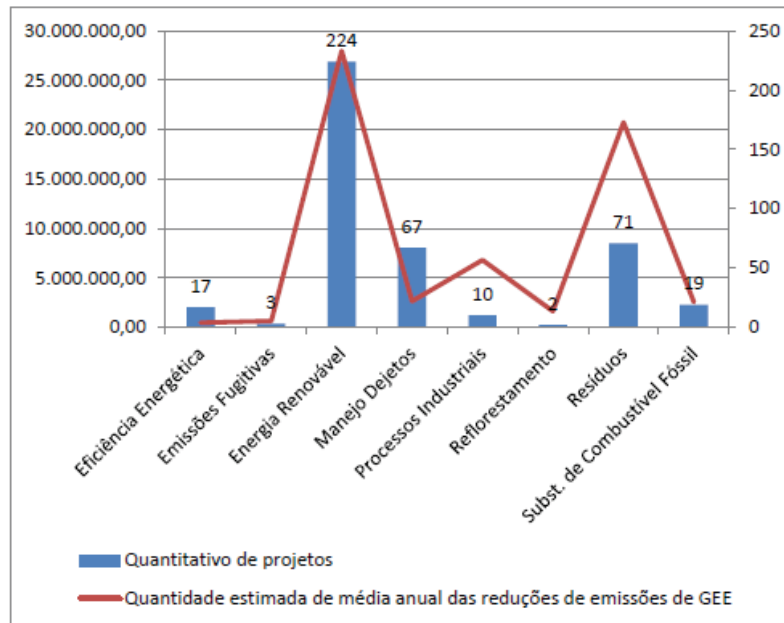
Isso se dá, por meio de sumidouros, projetos de sequestro de carbono associados ao reflorestamento e florestamento, investimentos em tecnologias mais limpas, fontes alternativas de energia, e aumento da eficiência energética no uso de combustíveis, biomassa, etc.

O artigo 12, parágrafo 5 apresenta alguns critérios essenciais para que um projeto de MDL, seja elegível, são eles: participação deve ser de livre espontânea vontade sem qualquer imposição do governo ou administração pública; benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo; os projetos devem proporcionar redução de emissão superiores as que ocorreriam na ausência da atividade certificada de projeto (BRASIL, 2002).

Ao ser comprovada a efetividade desses projetos, são gerados créditos de carbono, que ao serem certificados, por entidades operacionais designadas pelas Partes, se transformam nas “Reduções Certificadas de Emissões” (RCE), que podem ser comercializados no mercado financeiro internacional (BRASIL, 2002). As RCE podem ser comercializadas no mercado financeiro internacional, para serem adquiridas pelos Países do Anexo I e auxilia-los a alcançarem as metas determinadas pelo Protocolo de Quioto (BRASIL, 2002; AUGUSTYNCZIK, 2018). Segundo Augustynczik (2018), após a concretização de Projetos de MDL e a criação de um valor transacional para as reduções, originou-se o mercado internacional de créditos de carbono.

No Brasil, de 2004 a 2013, verificou-se uma média de 41 projetos de redução de emissão de GEE por ano, totalizando 413 projetos nesse período. De acordo, com a FIGURA 1, é possível observar a predominância de atividade de projetos no escopo de energia renovável, devido principalmente à razão de que a matriz energética brasileira ser composta de 39,4% de fontes de energia renováveis, como hidrelétricas, eólicas e de biomassa (TORRES et al.,2016).

FIGURA 1 – MÉDIA ANUAL DAS REDUÇÕES DE EMISSÕES DE GEE COMPARA COM A QUANTIDADE DE PROJETOS.



FONTE: TORRES et al., (2016).

Embora os projetos de reflorestamento representem uma pequena fração, esses desempenham um importante papel na remoção de emissões, conforme constatado por Sanquetta et al. (2018) que quantificou a disponibilidade de madeira comercial nas plantações florestais brasileiras, e estimou, em um período de 26 anos, os estoques de biomassa e carbono, visando evidenciar o papel destas a mitigação das emissões de GEE no país. O estoque total de biomassa e carbono nas plantações florestais contribuíram para promover a remoção de 4,9 bilhões t de dióxido de carbono na atmosfera. Comprovando assim que as árvores plantadas além de garantir o abastecimento a indústria de base florestal, promovem também a mitigação das mudanças climáticas.

Em 2015, durante a COP-21 representantes de 195 países aprovaram um novo tratado global sobre as mudanças climáticas: o Acordo de Paris. Dessa forma mercado de carbono ganhou força novamente, devido a criação de um novo mecanismo do mercado de carbono: o Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável; que tem uma visão mais inclusiva do MDL, proposto pelo Protocolo de Quioto. Nesse acordo todos os países terão metas, sendo assim existirá a possibilidade de compra de créditos de carbono pelas duas partes.

Nesse sentido, os países que reduzirem suas emissões além da meta, poderão negociar o excedente no mercado, já os países que não conseguirem reduzir tanto assim irão comprar esses créditos e deduzi-los da própria meta. Segundo Augustynczik (2018) “o preço da tonelada de carbono aumentaria,

estimulando os países a extrapolarem as suas metas de reduções e comercializar a parte excedente”. Enquanto esse novo mecanismo não está apto para aplicação, pretende-se continuar com a comercialização de certificados de carbono gerados a partir de projetos de MDL do Protocolo de Quioto.

2.3 GEOESTATÍSTICA

O engenheiro Daniel Krige enquanto trabalhava com dados de concentração de ouro, na década de 1950, constatou que além da informação dada pela variância, seria necessário levar em consideração a distância entre as observações, para explicar o fenômeno em estudo (ANDRIOTTI, 2003).

Com base nas observações de Krige, que o matemático Matheron desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas, considerada a fundamentação teórica e a orientação matemática da geoestatística (PELISSARI, 2015). A partir disso, o termo variável regionalizado ficou definido como uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples (MATHERON, 1971).

Atualmente, o termo Geoestatística tem uma abrangência mais ampla e pode ser definida como uma subárea da Estatística, a qual estuda as variáveis regionalizadas, embasada na suposição de que a influência de cada amostra é inversamente proporcional à distância. Dessa forma, amostras situadas em distâncias menores entre si tendem a ser fortemente relacionadas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Segundo Andriotti (2003), as técnicas geoestatísticas podem ser usadas para: descrever e modelar padrões espaciais, para prever valores em locais não amostrados, para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados e para otimizar malhas de amostragem.

Quando comparada com outras técnicas estatísticas convencionais, as vantagens que a geoestatística apresenta são: análise da variabilidade espacial, suavização de valores preditos, poder de anular concentrações localizadas de observações, análise do comportamento da variabilidade em direções diferentes, precisão sobre as áreas avaliadas, noção da margem de erro que acompanha a estimativa (ANDRIOTTI, 2003).

Inicialmente a Geoestatística era amplamente aplicada para situações de geologia mineira e ciência do solo, no entanto, a partir da década 1980, passou a ter ampla aplicação em Agricultura de precisão, Cartografia, Climatologia, Ecologia da Paisagem, Engenharia Florestal, entre outros (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

As análises espaciais aplicadas às pesquisas em Engenharia Florestal obtiveram ênfase, com o estatístico florestal Bertil Matérn, em sua obra *Spatial Variation* (MATÉRN, 1960). A partir disso, vários trabalhos foram desenvolvidos na área florestal, com o objetivo de espacializar e analisar as variáveis dedrométricas pela geoestatística, como exemplo pode-se citar Rufino et al., (2006); Pereira et al., (2011), Rosa Filho et al., (2011), Pelissari et al., (2012), entre outros.

De modo geral, a modelagem geoestatística envolve três etapas fundamentais (BAGNARA et al., 2012):

- Análise semivariográfica, cujo objetivo é descrever a estrutura espacial;
- Análise inferencial ou krigagem, cujo objetivo é interpolar os valores de uma variável espacial em locais não amostrados; e
- Simulação estocástica, que tem como objetivo construir cenários equiprováveis do fenômeno espacial em estudo.

2.3.1 Semivariograma

O semivariograma é uma ferramenta da geoestatística, o qual utiliza uma função que reflete a distribuição espacial do fenômeno de estudo, medindo as variâncias entre pontos separados por uma distância h (ANDRIOTTI, 2003).

Para entender a variação espacial, deve-se levar em consideração de que o resultado de uma amostra pode influenciar no resultado de outra amostra, sendo razoável supor que a influência é tanto maior quanto menor for a distância entre as amostras. O valor entre as amostras pode apresentar continuidade, até determinada distância, sendo que a partir desse ponto pode-se dizer que as amostras são aleatórias e que não exercem mais influência sobre a outra (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Em termos matemáticos o semivariograma é o valor médio do quadrado das diferenças entre os valores de pontos no espaço, tomados a uma distância h uns dos outros (ANDRIOTTI, 2003), conforme expressão (1):

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

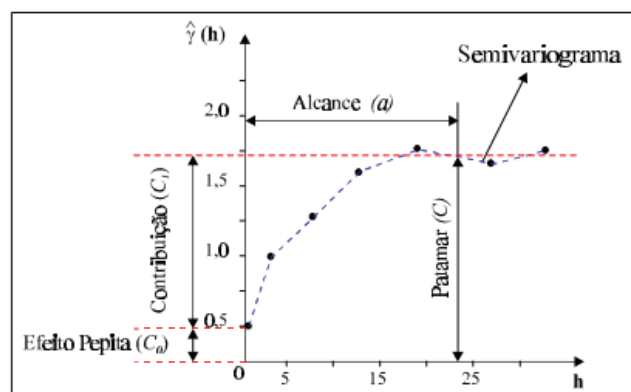
Em que: $y(h)$ = semivariância da variável $Z(x_i)$; h = distância; e $N(h)$ = número de pares de pontos medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$, separados por uma distância h .

Recomenda-se, quando possível, calcular os semivariogramas, para pelo menos quatro direções, geralmente em 0° , 45° , 90° e 135° no plano espacial, com o objetivo de identificar possível presença de anisotropias. Se esses semivariogramas, calculados em diferentes direções, apresentarem o mesmo comportamento, diz-se haver isotropia da variável, ou seja, o comportamento da variável será o mesmo indiferente da direção. Caso contrário, temos o fenômeno de anisotropia, que corresponde a existência de direções privilegiadas que condicionaram a gênese da variável de estudo (ANDRIOTTI, 2003; YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

As propriedades de um típico semivariograma com patamar (FIGURA 2), são (ANDRIOTTI, 2003):

- Alcance (a): esse parâmetro marca a distância a partir do qual as amostras tornam-se independentes, ou seja, sem correlações espaciais;
- Patamar (C_0+C): valor da variância correspondente ao ponto em que o mesmo estabiliza;
- Efeito pepita (C_0): representa o valor da semivariância para a distância zero; e
- Contribuição (C_1): diferença entre o patamar e o efeito pepita.

FIGURA 2 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM SEMIVARIOGRAMA TÍPICO E SEUS PARÂMETROS.



FONTE: CAMARGO (1998).

Outro parâmetro obtido pelo semivariograma é o grau de dependência espacial (GD), expresso pela razão percentual entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C) e que representa a porção da variabilidade espacial devida ao acaso (CAMBARDELLA et al., 1994). Quando o grau de dependência é igual a zero temos o efeito pepita puro, que reflete a inexistência de correlação espacial entre os pontos amostrados.

Com base no conhecimento dos parâmetros básicos que caracterizam um semivariograma, é possível ajustar modelos teóricos que podem explicar a variabilidade da grande maioria dos fenômenos espaciais. A TABELA 1 apresenta alguns desses modelos teóricos:

TABELA 1 – MODELOS TEÓRICOS DE SEMIVARIOGRAMAS.

Modelo	Equação
Esférico	$\gamma(h) = C_0 + C \left[\left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{h}{A} \right) - \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right] \text{ para } h < a$ $\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h > a$
Exponencial	$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) \text{ para } 0 < h \leq a$ $\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h > a$
Gaussiano	$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right) \text{ para } 0 < h \leq a$ $\gamma(h) = C_0 + C \text{ para } h > a$

Em que: $\gamma(h)$ = semivariância da variável, C_0 = efeito pepita; C = patamar; A = alcance; e h = distância; e = exponencial;

Fonte: ANDRIOTTI (2003).

O procedimento de ajuste é iterativo, pois nesse processo o interprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico, podendo ou não redefinir o modelo até obter um considerado satisfatório (CAMARGO, 1998).

2.3.2 Krigagem ordinária

Conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as unidades amostrais, procede-se a etapa de interpolação e espacialização das variáveis pelo método de krigagem.

Krigagem é um processo geoestatístico de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço, com base em valores adjacentes quando considerados independentes pela análise semivariográfica (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A krigagem produz melhores estimativas em termos de interpolação, pelo fato de apresentar estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Segundo Yamamoto e Landim (2013) “a krigagem ordinária é um método local de estimativa e, dessa forma, a estimativa em um ponto não amostrado resulta da combinação dos valores encontrados na vizinhança próxima.”

De acordo, com Pelissari (2015), ao considerar um local não amostrado (X_0) e valores de n pontos próximos as estimativas lineares ponderadas obtidas pela krigagem ordinária, é descrita pela expressão (2):

$$Z(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (2)$$

Em que: $Z(X_0)$ = valor estimado para local não amostrado; n = número de valores medidos; $Z(X_i)$ = valor obtido por amostragem no campo; λ_i = peso associado ao valor medido na posição.

É importante salientar que na krigagem ordinária os pesos são distribuídos de forma diferenciada, resultam de um esquema de ponderação que considera tanto o efeito da distância entre os pontos amostrais e o ponto estimado. Dessa forma nos pontos próximos são atribuídos pesos maiores que os mais distantes (BAGNARA et al., 2012).

Após a krigagem realiza-se a validação cruzada, visando avaliar a incerteza, representada pelo erro, associada as estimativas obtidas pela krigagem. Essa técnica compara os valores reais com os valores observados, sendo a diferença entre eles chamado de resíduo da validação cruzada (ANDRIOTTI, 2003).

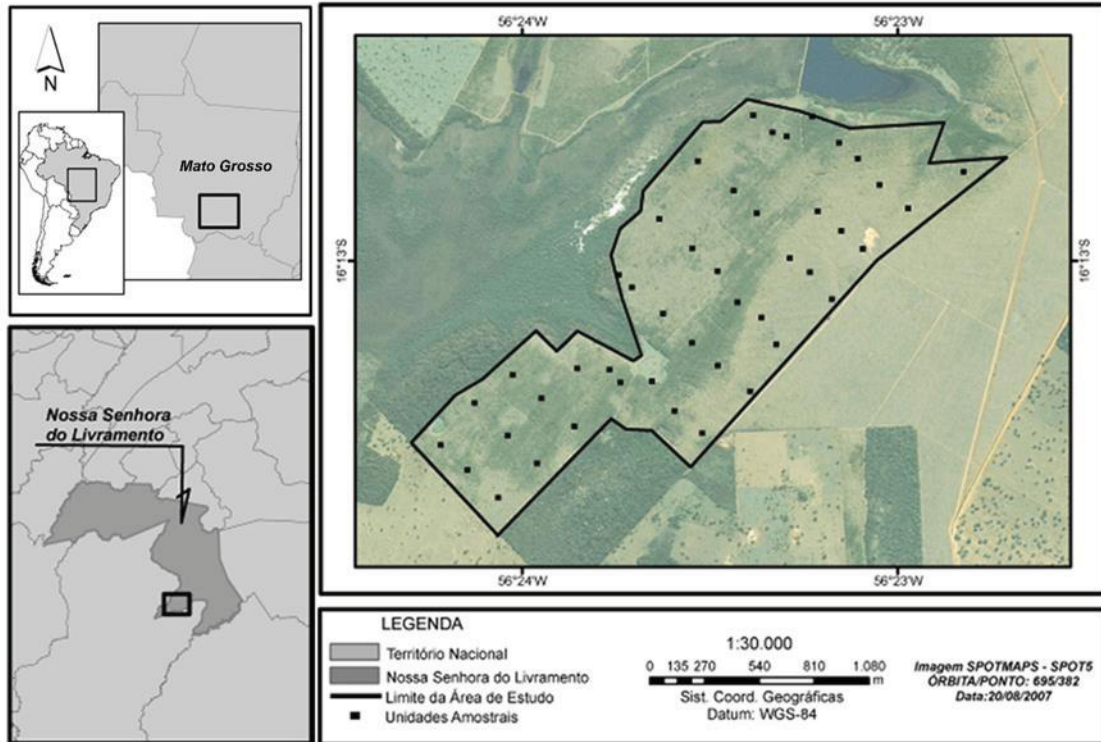
3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em um povoamento equiânio e homogêneo de *Tectona grandis* L. f. com 213 ha implantados em 1999 no espaçamento 3 m x 3 m,

localizado no município de Nossa Senhora do Livramento, estado de Mato Grosso, a 73 km de Cuiabá (FIGURA 3).

FIGURA 3 – LOCALIZAÇÃO DO POVOAMENTO DE TECA NO ESTADO DO MATO GROSSO.



FONTE: Pelissari et al., (2012).

De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região é do tipo Aw, tropical com estação seca no inverno, com temperatura média anual de 25° C e precipitação média de 1.300 mm ano⁻¹ (ALVARES et al., 2014). Segundo Pelissari et al., (2012) “o relevo característico é o suave ondulado e o solo é classificado como PLANOSSOLO Háplico Eutrófico (EMBRAPA, 2006) de textura franco-argilo-arenosa”.

Na área de estudo foram realizados três desbastes do tipo seletivo, com remoção média de 40% do plantio inicial, 33% e 33% do total de árvores remanescente, nas idades de cinco, oito e onze anos, respectivamente. Além disso, foram aplicadas quatro desramas: no segundo ano, com a retirada de galhos até 1/3 da altura total das árvores nessa idade; no terceiro ano, até a 1/2 da altura total; no quarto ano até 2/3; e, por fim, a manutenção da desrama, com a remoção de galhos até 7 m de altura nas idades seguintes (PELLISSARI et al., 2012).

3.2 COLETA DE DADOS

Para a coleta de dados, foram alocadas 46 parcelas permanentes de 450 m² (15 m x 30 m), correspondendo a uma densidade inicial de 50 árvores por parcela, e obtidos os valores de diâmetro à altura do peito (DAP), com avaliação nas idades entre dois e doze anos do povoamento.

3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS

As estimativas dos estoques de carbono aéreo e radicular nos povoamentos de teca foram realizadas com a utilização das equações (3) e (4) desenvolvida no trabalho de Kraenzel et al., (2002), devido à ausência de modelos desenvolvidos para essa cultura no Brasil.

As estimativas calculadas nesse trabalho foram comparadas com valores observados em povoamentos de teca no Brasil, visando corroborar a eficácia das equações.

$$\text{Log Carbono aéreo} = 2,574 (\text{Log DAP}) - 1,345 \quad (3)$$

$$\text{Log Carbono raiz} = 2,387(\text{Log DAP}) - 1,968 \quad (4)$$

Em que: Log = logaritmo base 10; e DAP = diâmetro à altura do peito (cm).

Na sequência, foi realizada a análise exploratória dos dados, que permitiu descrever o comportamento geral dos dados, além da identificação de dados discrepantes (*outliers*). Essa etapa contou com a aplicação da análise estatística descritiva e do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de significância.

Posteriormente, iniciou-se a etapa de modelagem geoestatística com o cálculo das semivariâncias. Com isso, observada a dispersão espacial do estoque de carbono em função da distância, por meio do ajuste dos semivariogramas teóricos: esférico, exponencial, linear e gaussiano. Esses modelos foram ajustados com o auxílio do programa GS+ v. 5.1.1 (ROBERTSON, 2008).

A seleção do melhor ajuste foi determinada com base no maior coeficiente de determinação (R²) e no menor valor da soma de quadrados dos desvios (SQD). Além disso, para verificar a presença de anisotropia, os semivariogramas foram

executados nas direções de 0°, 45°, 90° e 135° e apresentados na forma escalonada pela variância amostral.

A interpolação e a espacialização do estoque de carbono por idade dos povoamentos de teca foram realizadas pelo método de krigagem ordinária pontual, considerando os parâmetros dos semivariogramas ajustados (efeito pepita, alcance e patamar). Quando da presença de efeito pepita puro, sendo um indicativo da ausência de dependência espacial, utilizou-se a interpolação linear baseada no inverso do quadrado das distâncias para estimar os valores das variáveis em locais não amostrados (CORÁ; BERALDO, 2006).

Os mapas temáticos, com quatro classes, foram confeccionados no *software* GS+, utilizando as amplitudes do estoque de carbono em t ha⁻¹.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

Na TABELA 2 estão apresentados os valores mínimos, médios e máximos do carbono aéreo e radicular de teca, bem como o desvio padrão, coeficiente de variação e teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov.

TABELA 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA DO ESTOQUE DE CARBONO AÉREO E RADICULAR DE POVOAMENTOS DE TECA DE DOIS A DOZE ANOS DE IDADE.

Idade (ano)	Mínimo (t ha ⁻¹)	Média (t ha ⁻¹)	Máximo (t ha ⁻¹)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)	Kolmogorov- Smirnov
Estoque de Carbono Aéreo						
2	1,26	3,95	7,41	1,56	39,5	0,086*
3	8,80	16,37	23,54	3,98	24,3	0,132 ^{ns}
4	18,15	31,27	41,87	6,29	20,1	0,174 ^{ns}
5	22,16	44,66	57,87	8,78	19,6	0,177 ^{ns}
Desbaste1	6,00	15,12	27,50	4,27	28,2	0,082*
6	19,08	39,96	54,29	8,36	20,9	0,162 ^{ns}
7	24,87	52,24	70,93	10,04	19,2	0,170 ^{ns}
8	30,68	59,03	81,16	11,43	19,3	0,137 ^{ns}
Desbaste2	1,31	13,66	25,13	5,01	36,6	0,101*
9	23,06	51,85	68,35	10,27	19,8	0,106*
10	27,28	59,10	79,64	11,56	19,5	0,134 ^{ns}

11	29,74	67,23	91,47	13,37	19,8	0,165 ^{ns}
Desbaste3	4,50	16,22	30,34	5,91	36,4	0,068*
12	20,43	57,61	78,73	11,88	20,6	0,134 ^{ns}
Estoque de Carbono Radicular						
2	0,23	0,67	1,22	0,25	37,2	0,082*
3	1,41	2,53	3,56	0,58	22,9	0,119*
4	2,77	4,62	6,09	0,87	18,9	0,174 ^{ns}
5	3,26	6,43	8,23	1,19	18,6	0,164 ^{ns}
Desbaste1	0,85	2,19	3,96	0,60	27,4	0,089*
6	2,74	5,62	7,60	1,12	20,0	0,153 ^{ns}
7	3,50	7,20	9,73	1,33	18,4	0,166 ^{ns}
8	4,27	8,06	11,03	1,50	18,6	0,137 ^{ns}
Desbaste2	0,79	1,91	3,42	0,63	32,8	0,116*
9	3,20	6,98	9,15	1,33	19,0	0,106*
10	3,73	7,87	10,54	1,48	18,8	0,111*
11	4,04	8,87	12,02	1,69	19,1	0,144 ^{ns}
Desbaste3	0,62	2,15	4,02	0,75	35,1	0,062*
12	2,69	7,51	10,22	1,49	19,90	0,144 ^{ns}

Em que: * = significativo a 5% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov; e ^{ns} = não significativo.

FONTE: O autor (2018).

A quantidade de carbono aéreo e radicular variou conforme a idade, demonstrando tendência crescente no decorrer dos anos. Entretanto, observa-se que após a realização dos desbastes ocorreu redução no aumento do estoque de carbono, podendo-se concluir que o desbaste provoca uma alteração estrutural da floresta, acarretando em uma pequena diminuição da capacidade de estocagem de carbono do povoamento por área.

Na determinação do estoque de carbono na parte aérea de um povoamento de teca em diferentes idades, Almeida et al., (2010), obtiveram valores médios de 5,62 t de C ha⁻¹ aos 2,5 anos e 14,15 t de C ha⁻¹ aos 3,5 anos. Para o estoque de carbono radicular, obteve-se 6,7 t de C ha⁻¹ aos 2,5 anos e 4,9 t de C ha⁻¹ aos 3,5 anos. Valores semelhantes foram obtidos nesse trabalho, para o estoque de carbono aéreo, 3,95 t de C ha⁻¹ aos dois anos e 16,37 t de C ha⁻¹ aos 3 anos. Já para o carbono radicular, obteve-se 0,67 de C ha⁻¹ aos 2 anos e 2,53 de C ha⁻¹ aos 3 anos. Os valores elevados de carbono radicular, quando comparados com esse trabalho, ocorrem possivelmente devido a presença de elementos químicos no solo, que influenciam no desenvolvimento das raízes.

Em povoamentos de teca no Panamá, Kraenzel et al., (2002) fizeram a avaliação do estoque de carbono em plantios de 20 anos de idade e obtiveram médias de 104,5 t ha⁻¹ para carbono aéreo e 15,7 t ha⁻¹ para carbono radicular. Esse trabalho obteve altos valores de carbono aéreo e radicular, quando comparado com o presente trabalho, devido ao fato de o plantio ter uma rotação de 20 anos.

Resultados semelhantes dos obtidos no presente estudo foram encontrados por Basso (2016), para o estoque médio de carbono radicular (0,523 t ha⁻¹ de carbono fixado) de teca em um povoamento com 27 meses de idade.

Na determinação do estoque de carbono na madeira de troncos de um povoamento de teca no Mato Grosso, Roquette et al., (2012) obtiveram 79,8 t ha⁻¹ de carbono aos 9 anos de idade e 96,2 t ha⁻¹ aos 12 anos. Esses valores elevados de carbono, quando comparados com o presente trabalho, possivelmente ocorrem em função da ausência de tratamento silvicultural, como desbastes.

Nota-se pelos valores do coeficiente de variação que, tanto o carbono aéreo quanto o carbono radicular, tornam-se mais homogêneos no decorrer dos anos, ocorrendo uma pequena oscilação nos valores quando há desbastes. Pode-se concluir, com isso, que a realização do desbaste aumenta a variabilidade do povoamento.

Em algumas idades, tanto do carbono aéreo como para o carbono radicular, não apresentaram distribuição normal, ao nível de 5% de significância pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Dessa forma, foi necessária a transformação logarítmica, para correção de uma possível assimetria positiva, a qual é prejudicial à modelagem geoestatística (YAMAMOTO; LANDIN, 2013).

4.2 MODELAGEM GEOESTATÍSTICA DO CARBONO AÉREO E RADICULAR

Com os ajustes dos semivariograma, é apresentado na TABELA 3 o resumo dos parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), alcance (A), bem como das estatísticas de ajuste: coeficiente de determinação (R^2) e soma de quadrados dos desvios (SQD), para o carbono aéreo em cada idade. Foi verificada a presença de dependência espacial para essa variável em todos os períodos de avaliação, o que permitiu a aplicação das modelagens geoestatísticas.

TABELA 3 - PARÂMETROS DOS SEMIVARIOGRAMA AJUSTADOS PARA O CARBONO AÉREO DE POVOAMENTOS DE TECA

Idade (ano)	Modelo	C ₀	C ₀ + C	A (m)	R ²	SQD
Estoque de Carbono Aéreo						
2	Gaussiano	0,585	1,226	675	0,964	0,0135
3	Exponencial	0,293	1,061	206	0,967	1,39x10 ⁻⁰⁵
4	Exponencial	0,283	1,076	241	0,927	2,91x10 ⁻⁰⁵
5	Exponencial	0,007	1,118	296	0,975	2,02x10 ⁻⁰⁵
6	Esférico	0,336	1,078	870	0,978	1,79x10 ⁻⁰⁵
7	Esférico	0,292	1,063	780	0,994	3,63x10 ⁻⁰⁶
8	Esférico	0,428	1,163	1303	0,954	2,91x10 ⁻⁰⁵
9	Esférico	0,564	1,207	1269	0,951	0,0124
10	Esférico	0,437	1,175	1072	0,995	3,62x10 ⁻⁰⁶
11	Gaussiano	0,482	1,154	443	0,978	1,94x10 ⁻⁰⁵
12	Esférico	0,300	1,127	860	0,971	2,96x10 ⁻⁰⁵
Estoque de Carbono Radicular						
2	Gaussiano	0,589	1,225	675	0,962	4,08x10 ⁻⁰⁴
3	Exponencial	0,328	1,066	212	0,960	2,90x10 ⁻⁰³
4	Exponencial	0,021	1,065	204	0,947	1,66x10 ⁻⁰⁵
5	Exponencial	0,065	1,056	233	0,917	4,05x10 ⁻⁰⁵
6	Esférico	0,346	1,078	874	0,975	1,64x10 ⁻⁰⁵
7	Esférico	0,279	1,038	730	0,976	1,07x10 ⁻⁰⁵
8	Esférico	0,304	1,089	929	0,986	8,58x10 ⁻⁰⁶
9	Esférico	0,518	1,154	1083	0,962	8,00x10 ⁻⁰³
10	Esférico	0,444	1,177	1101	0,994	3,63x10 ⁻⁰⁶
11	Esférico	0,291	1,137	859	0,976	1,60x10 ⁻⁰⁵
12	Esférico	0,305	1,121	854	0,969	2,70x10 ⁻⁰⁵

FONTE: O autor (2018).

Os ajustes dos semivariograma mostraram que o carbono aéreo e radicular apresentaram os melhores ajustes com o modelo exponencial e esférico, exceto aos dois anos, para carbono radicular e aéreo, e onze anos de idade, para o carbono aéreo, onde o modelo gaussiano apresentou melhor qualidade de ajustamento.

No presente estudo, tanto para carbono aéreo quanto para carbono radicular foram verificados valores de efeito pepita (C₀) baixos e inferiores a uma unidade; cuja estimativa representa a variância ocasionada por erros ou variações não identificadas. Os valores de alcance (A), que representam as distâncias limites de

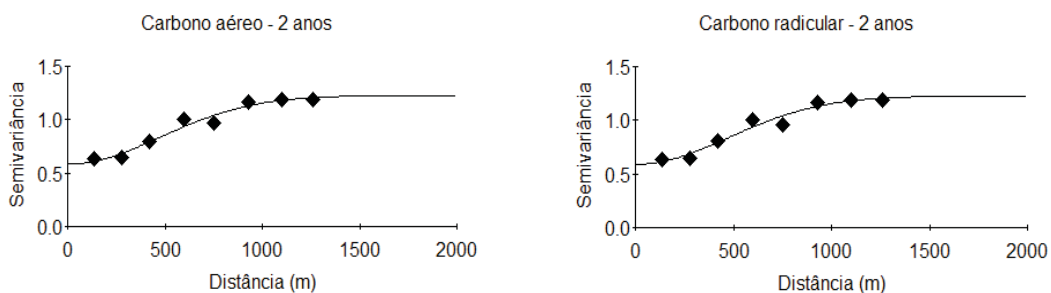
dependência espacial entre as unidades amostrais (VIEIRA, 2000), apresentaram, para o carbono aéreo, valor mínimo de 206 m aos três anos e máximo de 1.303 m aos oito anos de idade (TABELA 3). O carbono radicular apresentou valores diferentes de alcance, com o mínimo de 204 m aos quatro anos e máximo de 1.101 m aos dez anos (TABELA 3). Ambos os valores indicam uma heterogeneidade espacial elevada.

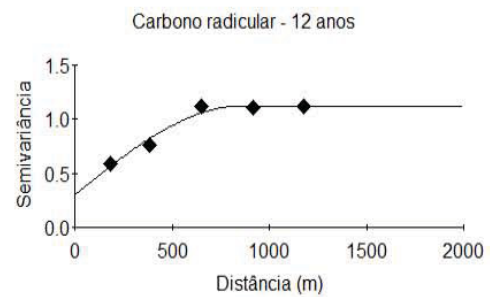
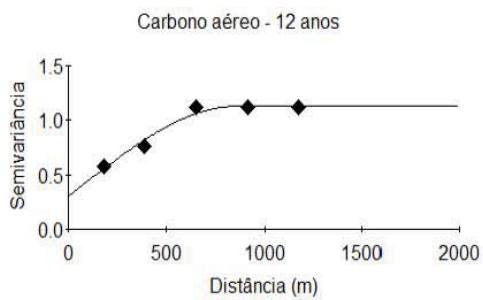
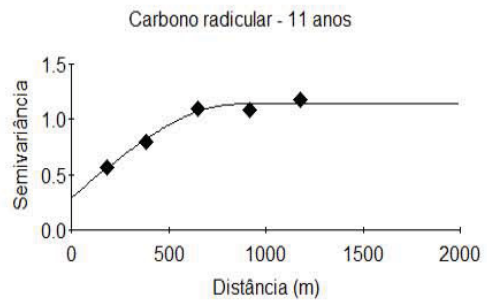
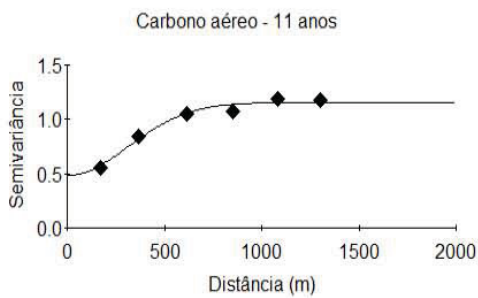
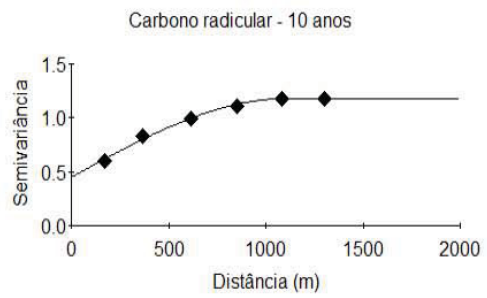
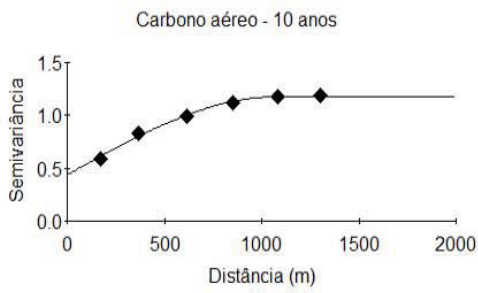
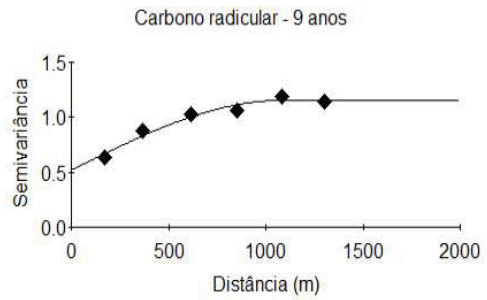
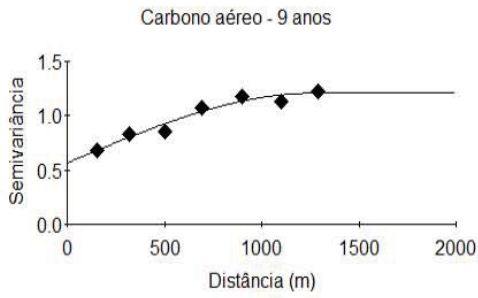
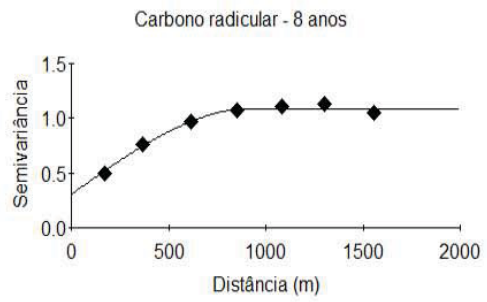
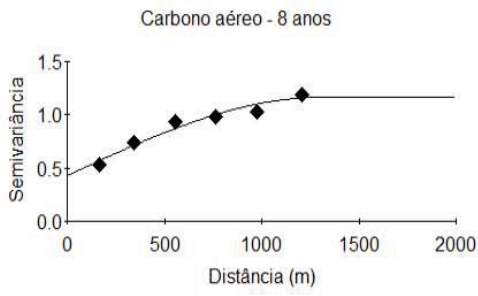
Ambos os ajustes foram estatisticamente eficientes, com R^2 superiores a 0,91, o que indica o quão próximo os valores reais das semivariâncias se encontram das estimativas (PELLISSARI et al., 2014). Enquanto, a SQD, do carbono aéreo apresentou valores mínimo de $3,62 \times 10^{-06}$ e máximo de 0,0135; do carbono radicular o valor mínimo foi de $3,63 \times 10^{-06}$ e máximo de $2,90 \times 10^{-03}$.

O modelo esférico foi o que apresentou melhor ajuste, para o carbono aéreo e radicular, na idade de 7 e 10 anos, respectivamente. Com maior coeficiente de determinação (0,994) e menor soma dos quadrados dos desvios ($3,63 \times 10^{-06}$).

A partir dos gráficos de semivariograma (FIGURA 4), constata-se o espalhamento reduzido dos valores observados em torno da linha média estimada, com características apropriadas que resultaram nos ajustes adequados para as estimativas espaciais do carbono aéreo e radicular.

FIGURA 4 - SEMIVARIOGRAMAS ESCALONADOS PARA O CARBONO AÉREO E RADICULAR DO SEGUNDO AO DECIMO SEGUNDO ANO DE IDADE EM PLANTIOS DE TECA.

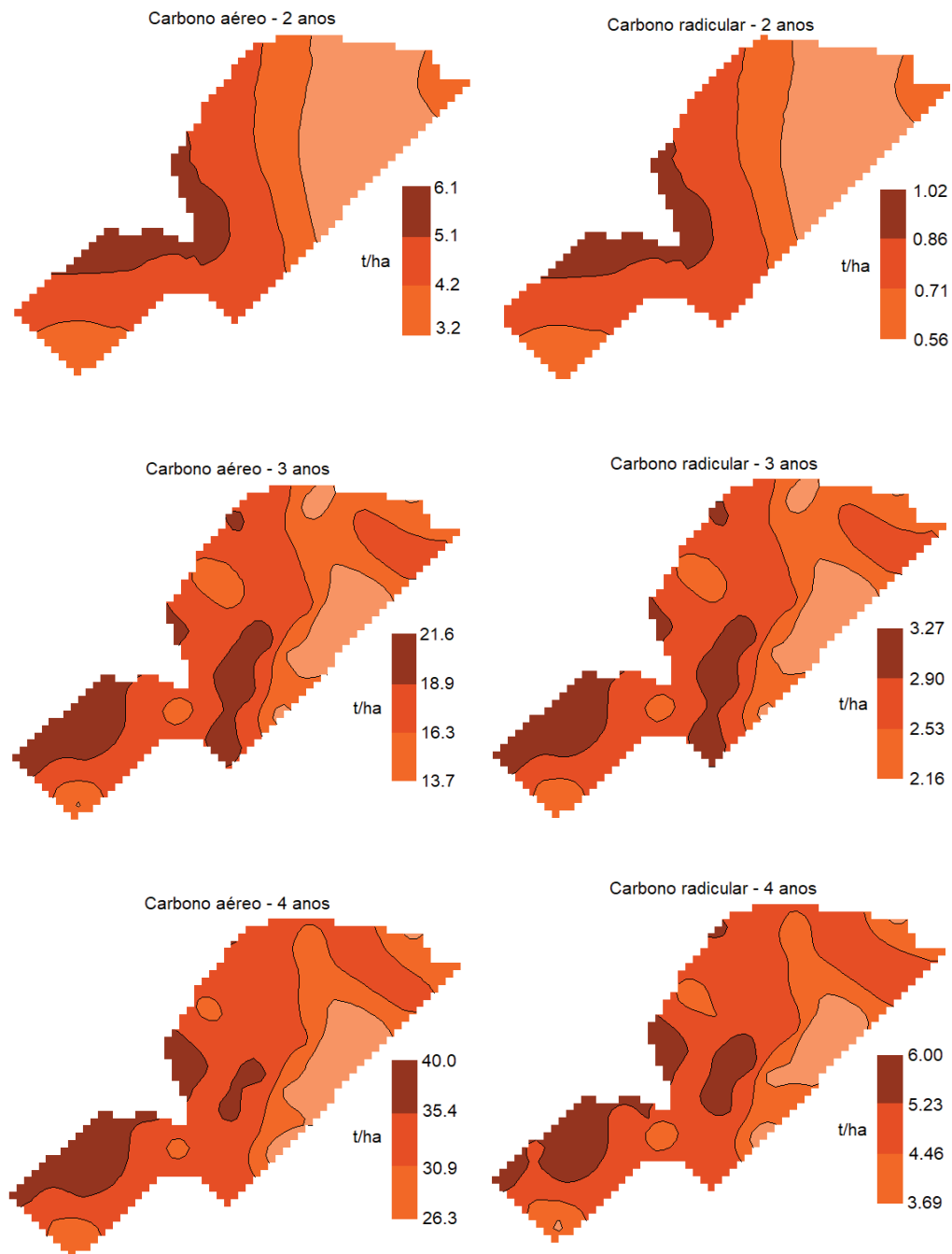




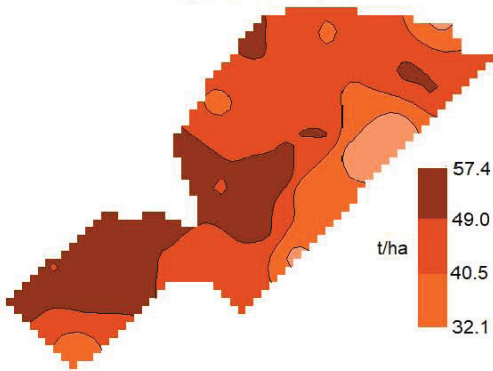
FONTE: O autor (2018).

Dessa forma, após a obtenção dos ajustes e constatada a dependência espacial entre as amostras, procedeu-se a interpolação espacial por meio da krigagem ordinária pontual, para a confecção da distribuição espacial do carbono aéreo e radicular de teca, nas idades entre dois e doze anos (FIGURA 5).

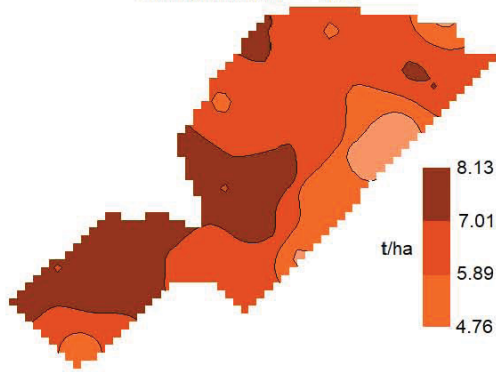
FIGURA 5 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CARBONO AÉREO E RADICULAR PARA TECA DOS DOIS ANOS AOS DOZE ANOS DE IDADE.



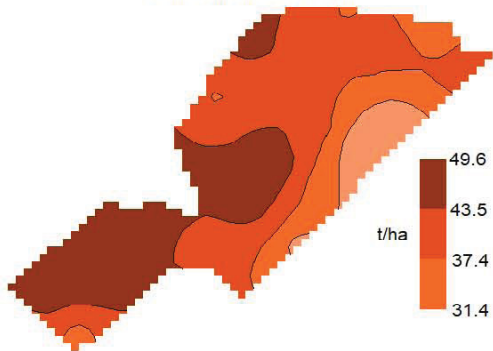
Carbono aéreo - 5 anos



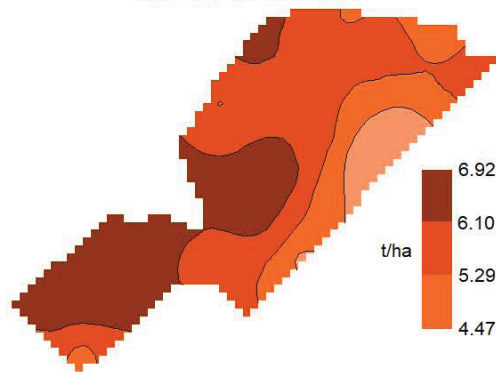
Carbono radicular - 5 anos



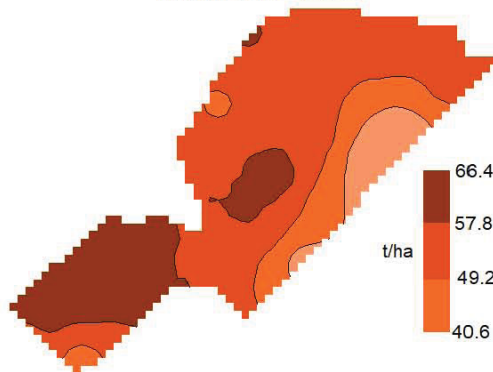
Carbono aéreo - 6 anos



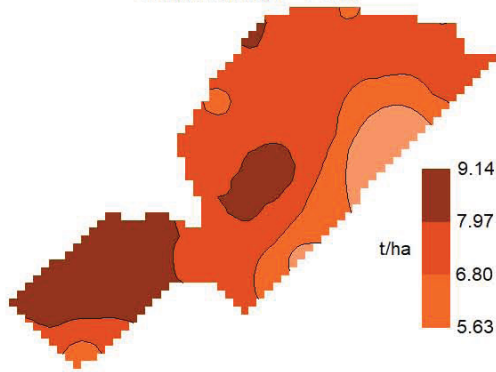
Carbono radicular - 6 anos



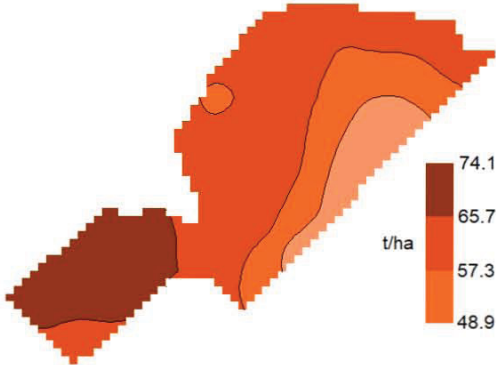
Carbono aéreo - 7 anos



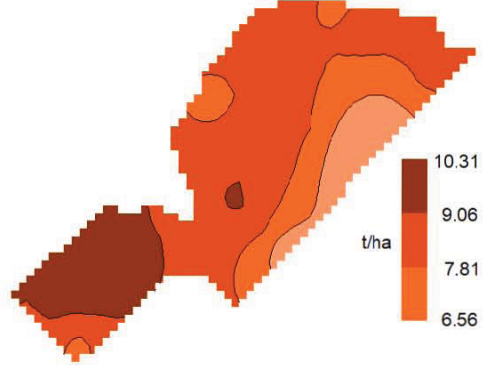
Carbono radicular - 7 anos



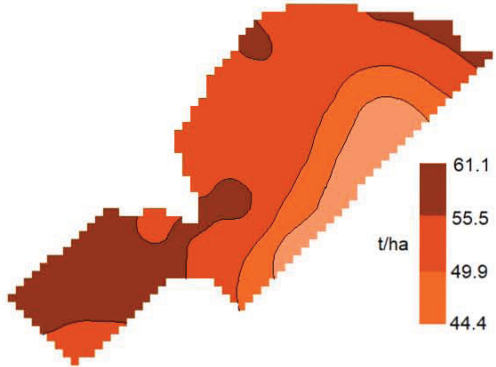
Carbono aéreo - 8 anos



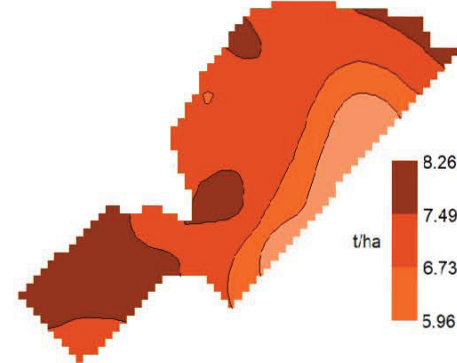
Carbono radicular - 8 anos



Carbono aéreo - 9 anos



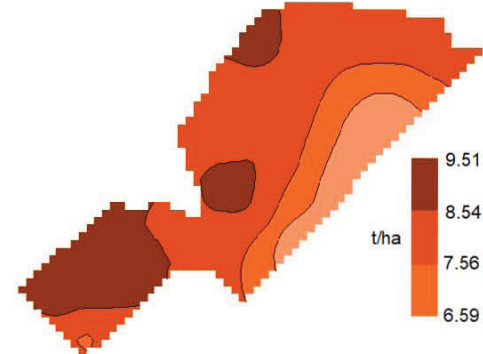
Carbono radicular - 9 anos

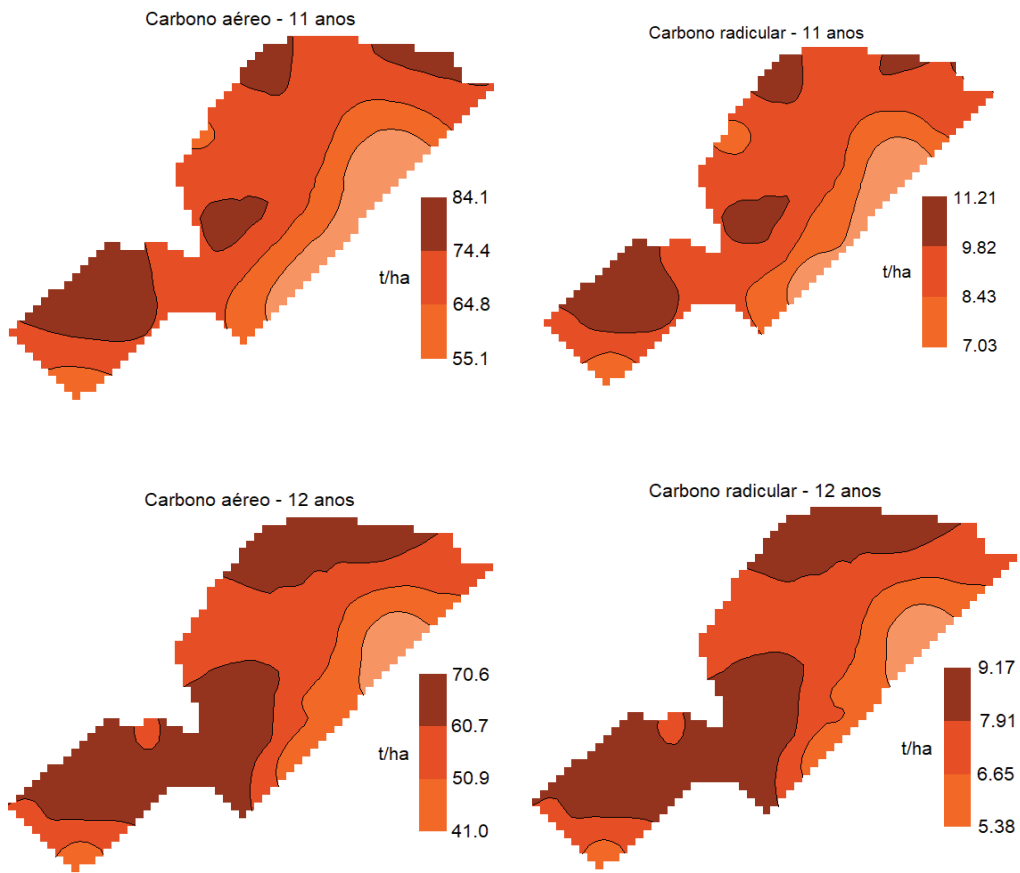


Carbono aéreo - 10 anos



Carbono radicular - 10 anos





FONTE: O autor (2018).

O mapeamento (FIGURA 5) mostra a heterogeneidade espacial da variável carbono aéreo e radicular. Observa-se que, ao longo dos anos, a região central do mapa se destaca desde o início com altos valores de toneladas de carbono por ha. Essa área se expande e passa por períodos de contração no decorrer dos anos, que coincide com dois períodos onde foram realizados desbastes, como no quinto e oitavo ano.

Ao Leste, outra área apresenta, no decorrer dos anos, os menores estoques de carbono por ha, passando também por períodos de expansão e contração de seus valores. Ambos os fenômenos descritos provavelmente são explicados pela qualidade do sítio (PELLISSARI et al., 2015), que deve ser melhor nas áreas com maior produtividade de carbono e menores nas áreas com menor produtividade.

5 CONCLUSÃO

O estoque de carbono aéreo em plantios de teca varia de forma crescente com a idade, com uma média de 3,95 t ha⁻¹ de C aos 2 anos de idade, e atinge uma média de 57,61 t ha⁻¹ de C aos doze anos com a realização de três desbastes seletivos ao longo desse período. O estoque de carbono radicular também varia de forma crescente com a idade, com uma média de 0,67 t ha⁻¹ aos 2 anos e atinge 7,51 t ha⁻¹ aos doze anos.

Comparando-se os valores de estoque de carbono obtidos neste trabalho com os presentes na literatura, conclui-se que a equação utilizada, embora não tenha sido desenvolvida especificamente para a área de estudo, teve bom desempenho, obtendo estimativas próximas das observadas em plantios na mesma região.

Para ambas as variáveis estoque de carbono, o modelo esférico de semivariograma foi o mais eficiente para modelar a variabilidade espacial, apresentando os valores mais altos de R² e mais baixos de SQD.

A aplicação da análise geoestatística permite, com precisão estatística, mensurar e identificar os diferentes padrões e dinâmicas espaciais do carbono aéreo e radicular para o povoamento de teca, sendo essenciais para a definição de técnicas de manejo de precisão.

Os resultados sugerem que plantios de teca tem potencial para inserção em projetos de MDL, porém recomenda-se o desenvolvimento de equações de estoque de carbono para a área de estudo, além da elaboração de trabalhos referentes a viabilidade econômica de plantios de teca para projetos de carbono.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, E. M.; JÚNIOR, J. H. C.; 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, 2010.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: UNISINOS, 2003. 165 p.
- AUGUSTYNCZIK, P. S. P. **Comercialização internacional de créditos de carbono: regulamentos e problemáticas**. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Gestão Corporativa de Carbono) - Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- BAGNARA, D.; PRIETTO, P. D. M.; TIMBOLA, R. S. **Aplicação da krigagem ordinária na modelagem do pH e da dureza da água subterrânea na área central de Passo Fundo – RS**. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n. 20, p.15-22, 2012.
- BASSO, S. **Biomassa, Carbono e relação entre atributos químicos do solo e variáveis de produção da teca**. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2016.
- BRASIL. Decreto Nº 2.652, de 1º de julho de 1998. Promulga a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. Brasília, DF, 1 jul. 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D2652.htm. Acesso em 01 de outubro de 2018.
- BRASIL. Decreto Legislativo Nº 144, de 2002. Aprova o texto do Protocolo de Quioto a Convenção-Quadro das Nações Unidas. Brasília, DF, 20 jun. 2002. Disponível em: <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decleg/2002/decretolegislativo-144-20-junho-2002-458772-protocolo-1-pl.html>. Acesso em 01 de outubro de 2018.
- CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: Fundamento e Aplicações. In: CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. 2 ed. São José, dos Campos: INPE, 1998. 36 p.
- 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**, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, 1994.
- CHANAN, M.; IRIANY, A. Estimating carbon storage on teak (*Tectona grandis* Linn. F). **Journal of Environment and Earth Science**. v.4, n.3, p. 9-17, 2014.
- CORÁ, J. E.; BERBALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 2, p. 374-387, 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

IBÁ – INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. **Relatório 2017**. São Paulo: IBÁ, 2017.

IPCC. UNDERSTANDING CLIMATE CHANGE: 22 years of IPCC Assessment. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/press/ipcc_leaflets_2010/ipcc-brochure_understanding.pdf. Acesso em: 01 set. 2017.

KRAENZEL, M.; CASTILLO, A.; MOORE, T.; POTVIN, C. Carbon storage of harvest-age teak (*Tectona grandis*) plantations, Panama. *Forest Ecology and Management*. 173. 213-225, 2002.

LEITE, J. C. Controvérsias na climatologia: o IPCC e o aquecimento global antropogênico. **Scientiae Studia**, v. 13, n. 3, p. 643-677, 2019.

MATÉRN, B. **Spatial variation**. Estocolmo: Meddelanden fran Statens Skogsforsknings Institut, 1960. 144 p.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Fontainebleau: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971. 211 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Disponível em: <http://mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas.html>. Acesso em: 01 de outubro de 2018.

PEREIRA, J. C.; MOURÃO, D. A. C.; SCALET, V.; SOUZA, C. A. M. de. Comparação entre modelos de relação hipsométrica com e sem componente espacial para *Pinus* sp. na FLONA Ipanema – SP. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 89, p. 043-052, 2011.

PELLISSARI, A. L. **Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L. f.** 119 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

PELLISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; DRESCHER, R.; SANTOS, V. S. Modelagem geoestatística da dinâmica espacial da altura dominante de *Tectona grandis* L.f (Teca). **Biosfera**, v. 8, n. 15, p.1249-1260, 2012.

PELLISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A. Propostas de mapeamentos da capacidade produtiva de sítios florestais por meio de análises geoestatísticas. **Scientia Forestalis**, v. 43, p. 601-608, 2015.

PELLISSARI, A. L.; CALDEIRA, S. F.; SANTOS, V. S. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em povoamentos de *Tectona grandis*. *Cerne*, v. 20, n. 3, p. 377-384, 2014.

RIBEIRO, S. C.; JACOVINE, L. A. G.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V.; SOUZA, A. L.; NARDELLI, A. M. B. Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma floresta madura no município de Viçosa, Minas Gerais. **Árvore**, v. 33, n. 5, p. 917-962, 2009.

- ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences**. Plainwell: Gamma Design Software, 2008. 179 p.
- ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M. de P. e; MONTANARI, R.; SILVA, J. M. da; SIQUEIRA, G. M.; ZAMBIANCO, E. C. Variabilidade espacial de propriedades dendrométricas do eucalipto e de atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Bragantia**, v. 70, n. 2, p. 439-446, 2011.
- ROQUETTE, J. G.; DRESCHER, R.; PELISSARI, A. L. Estoque de carbono na madeira dos troncos de um povoamento de *Tectona grandis* L. f. no sudoeste de Mato Grosso, Brasil. *Multitemas*, Campo Grande, MS, n. 42, p. 7-19, 2012.
- RUFINO, T. M. C.; THIERSCH, C. R.; FERREIRA, S. O.; KANEGAE JUNIOR, H.; FAIS, D. Uso da Geoestatística no estudo da relação entre variáveis dendrométricas de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e atributos do solo. **Ambiência**, v. 2, n. 1, p. 83-93, 2006.
- SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; PELISSARI, A. L.; TOMÉ, M.; MAAS, G. C. B.; SANQUETTA, M. N. I. Dinâmica em superfície, volume, biomassa e carbono nas florestas plantadas brasileiras: 1990-2016. **Biofix Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 152-160, 2018.
- SANQUETTA, M. N. I.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; MAAS, G. C. B. Densidade da madeira e teor de carbono em um indivíduo jovens de teca no Pará, Brasil. **Científica**, v. 44, n. 4, p. 608-614, 2016.
- TORRES, C.; FERMAM, R. K. S.; SERAGIA, I. Projetos de MDL no Brasil: oportunidades de mercado para empresas e para novas entidades operacionais designadas. **Ambiente e Sociedade**, v. 19, n. 3, p. 199-214, 2016.
- VIEIRA, S. R. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Org.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 01-54, 2000.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215 p.