



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

AGENOR FRANCISCO ROCHA JUNIOR

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO
EM ÁREA DEGRADADA CULTIVADA COM PINHÃO MANSO E GRAMÍNEAS,
EM GILBUÉS-PI**

Teresina – PI

2019

AGENOR FRANCISCO ROCHA JUNIOR

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO SOLO
EM ÁREA DEGRADADA CULTIVADA COM PINHÃO MANSO E GRAMÍNEAS,
EM GILBUÉS-PI**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Agricultura Tropical para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares

Co-orientador: Dr. Marcos Emanuel da Costa Veloso

Teresina – PI

2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial CCA
Serviço de Representação da Informação

R672v

Rocha Junior, Agenor Francisco.

Variabilidade espacial dos atributos físico-químico do solo em área degradada cultivada com pinhão manso e gramíneas, em Gilbués-PI / Agenor Francisco Rocha Junior. – 2019.
149 f.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura Tropical - Teresina, 2023.

“Orientador: Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares.”

1. Desertificação. 2. Geoestatística. 3. Semivariograma. 4. Cobertura do solo. I. Valladares, Gustavo Souza. II. Título.

CDD 574.52

Bibliotecário: Rafael Gomes de Sousa – CRB/1163

AGENOR FRANCISCO ROCHA JUNIOR

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-QUÍMICOS DO
SOLO EM ÁREA DEGRADADA CULTIVADA COM PINHÃO MANSO E
GRAMÍNEAS, EM GILBUÉS-PI**

Tese apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia-Agricultura Tropical, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

APROVADA em 12 de dezembro de 2019.

Comissão Julgadora:

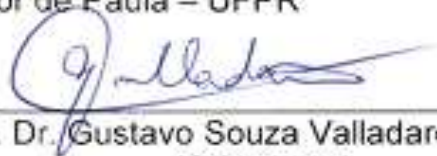

Pesq. Dr. Marcus Emanuel da Costa Veloso – EMBRAPA


Profa. Dra. Melissa Oda Souza – UESPI


Prof. Dr. Francisco Edinaldo Pinto Mousinho – UFPI


Pesq. Dr. Ademir Fontana – Embrapa Solos


Prof. Dr. Eduardo Vedor de Paula – UFPR


Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares – UFPI
(Orientador)

TERESINA – PI

2019

Ao meu pai, Agenor Francisco Rocha (in memoriam), e ao meu avô, João Marques da Silva (in memoriam), pelos exemplos de perseverança, honestidade e integridade moral, e que mesmo não estando mais neste plano material sempre estarão presentes na minha vida. A minha mãe, Maria do Desterro Carvalho Rocha – amor da minha vida – pelo amor, dedicação, compreensão e por, apesar de todas as dificuldades de nossas vidas, ter sido minha maior incentivadora em todas as etapas vividas, bem como por ter contribuído imensuravelmente para minha formação e educação, assim como dos meus irmãos. A minha filha, Isabela Guimarães Rocha, meu maior incentivo e inspiração na reta final desse trabalho, e por ser meu amor maior.

DEDICO

Aos meus irmãos, Gabriela Rocha e Rafael Rocha, pelo companheirismo, incentivo e, acima de tudo, pela grande amizade existente entre nós; a minha esposa, Alane Rosane Castro Guimarães, por toda sua força, amor, companheirismo e incentivo; a minha tia Lourdes Rocha, ao tio Marcelo (in memoriam) e a toda minha família por estarem sempre presentes e torcendo por mim.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, provedor de todo o bem, pela minha existência e força para alcançar meus objetivos, pois sem Ele nada é possível.

À Universidade Federal do Piauí, por ter concedido a oportunidade de cursar o Doutorado em Agronomia e desenvolver todos os meus trabalhos.

À Embrapa Meio-Norte, por todo o suporte para a instalação, condução e desenvolvimento do experimento.

Ao projeto de pesquisa financiado com recursos do CNPq, processo nº 577.137-5, intitulado ‘Geração de Tecnologias para Recuperação de Áreas Degradadas Utilizando Pinhão Manso e Gramíneas na Região de Gilbués, Piauí, Brasil’.

Ao Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares, pela orientação eficiente, compreensão e apoio, bem como pelos conhecimentos, pela amizade, por todo ensinamento oferecido desde o início da orientação e por toda paciência e confiança em mim depositadas durante esse tempo.

Ao pesquisador e amigo da Embrapa Meio-Norte, Dr. Marcos Emanuel da Costa Velos, por todo o apoio e empenho dados para a realização deste trabalho, pelos ensinamentos, oportunidades, confiança e, acima de tudo, por toda a amizade.

Aos demais professores do Curso de Doutorado em Agronomia do PPGA-AT, pelos ensinamentos de fundamental importância para a elaboração deste trabalho.

Ao secretário do mestrado em Agronomia, Vicente de Sousa Paulo (*in memoriam*), pelo respeito, ajuda, conversas e alegrias.

Ao meu pai, pelos exemplos de vida, honestidade e perseverança.

A minha mãe, por toda dedicação, amor, confiança e por ter sempre me apoiado em todos os momentos de minha vida.

A toda minha família, pela minha formação e ensinamentos.

A minha amada esposa, Alane Rosane Castro Guimarães, por ter contribuído para a suavização dessa longa caminhada, assim como pelo seu amor, dedicação e por sua compreensão durante os momentos de estresse e ausência.

A minha filha, Isabela Guimarães Rocha – meu maior amor –, por seu amor incondicional e por ser meu maior incentivo para minhas realizações.

Aos novos amigos da turma de Doutorado, José Eduardo Junior, Ricardo Silva, Eduardo Magno, Jayara Costa e José Girão.

Aos colegas do grupo de estudos, Daniel Dantas, Miriam Graziela e Léya Cabral.

À grande família do Refúgio, Hugo Henrique, Wilon Pinheiro, Leandra Silvestre, João Silvestre, Eliane Silvestre, Guilherme Duarte, Ramon Rêgo e todos aqueles que por lá passaram, por nossa amizade e companheirismo.

Aos amigos da UFPI, José Ramos Filho, Pedro Gonçalves, Maria José Carvalho, Alexandro Saraiva, Gabriela Celso, Ramalho Lino, Rosilane Silva e João Messias (*in memoriam*).

Aos amigos da Embrapa Meio-Norte, Gustavo Carvalho, Diego Sávio, Vanda Daiane, Edigar Augusto e Lucas, pela amizade e convivência fraterna em todos os momentos de nosso trabalho.

E, finalmente, a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho... meus agradecimentos!

RESUMO

Promover a recuperação de áreas degradadas no nosso planeta é um desafio para a humanidade no século 21. A região de Gilbués é considerada a principal área em degradação do Estado do Piauí. Assim, existe a necessidade de se conhecer os atributos físico-químicos dos solos dessas áreas, com a finalidade de se propor tecnologias para a sua regeneração, gerando emprego, renda e fixação do homem no campo. O objetivo deste trabalho é caracterizar e analisar a variabilidade espacial dos atributos físico-químicos do solo em área degradada cultivada com pinhão manso e gramíneas, em Gilbués – PI. O estudo foi realizado em uma área de Neossolo Litólico, com teores médios de areia de $564,5 \text{ g kg}^{-1}$, silte de $350,75 \text{ g kg}^{-1}$ e argila de $84,75 \text{ g kg}^{-1}$. A amostragem para análise e mapeamento do solo foi feita em uma malha regular de 30 m e em uma transeção na parte central da área em intervalos de 5 m, onde se coletou 80 amostras nas profundidades de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, totalizando 240 amostras, todas submetidas a análises físico-químicas. O pinhão manso foi implantado em dezembro de 2009, em espaçamento simples de 4 x 3 m. As gramíneas foram semeadas em linha entre as fileiras do pinhão com espaçamento entre linhas de um metro. A área estudada foi dividida em quatro subáreas de, aproximadamente, um hectare da seguinte forma: A1 – pinhão manso mais capim nativo (*Andropogon fastigiatus* SW); A2 – pinhão manso mais *Brachiaria decumbens*; A3 – pinhão manso mais *Brachiaria brizantha*, cultivar Piatã; e, A4 – pinhão manso mais capim andropogon (*Andropogon gayanus* L.). As avaliações fenológicas e de solo foram iniciadas a partir do ano de 2010. Para a avaliação da parte vegetativa do pinhão manso, em cada área foram selecionadas 30 plantas, avaliando-se o incremento da altura, do diâmetro de copa e do caule a cada três meses por um período de três anos. A amostragem das forrageiras foi realizada em dez pontos por área, onde os incrementos de altura e produção de massa verde e seca para as gramíneas foram feitos por todo o período chuvoso de cada ano. Os dados foram submetidos a análises estatísticas, estatística descritiva e geoestatística. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que: (1) os dados físicos do solo indicaram que a implantação do pinhão manso consorciado com diferentes gramíneas, na área degradada, contribuiu para o aumento do carbono orgânico total, da estabilidade de agregados, da densidade do solo, da capacidade de campo, do ponto de murcha e microporosidade, acarretando na melhora da estrutura do solo e em sua capacidade de armazenamento de água; (2) o diâmetro médio geométrico e o índice de estabilidade dos agregados demonstraram elevada correlação espacial com o carbono orgânico do solo; (3) os dados químicos do solo indicaram que o consórcio entre pinhão manso e gramíneas extrai uma considerável quantidade de nutrientes do solo, podendo acarretar em um empobrecimento do solo em longo prazo caso não se utilize algum tipo de manejo nutricional na área; (4) a maioria dos atributos físico-químicos estudados apresentou dependência espacial dentro da escala avaliada de 30 x 30 m, podendo influenciar a amostragem desses atributos e o manejo agrícola do solo; para todos os atributos que apresentaram dependência espacial, a relação foi classificada como de moderada a forte, com exceção do DMP que apresentou dependência espacial fraca; (5) os atributos físico-químicos foram os que apresentaram as maiores dependência espacial dentro da escala avaliada de 30 x 30 m, podendo influenciar a amostragem desses atributos e o manejo agrícola do solo; para todos os atributos que apresentaram dependência espacial, a relação foi classificada como de moderada a forte, com exceção do DMP que apresentou dependência espacial fraca; e, (6) a análise da distribuição espacial aliada à krigagem possibilitou o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos físico-químicos estudados do solo nas três profundidades, com exceção do diâmetro médio geométrico e ponderado no ano de 2010, proporcionando melhor visualização do seu comportamento na área de estudo.

Palavras-chave: Desertificação. Geoestatística. Semivariograma. Consórcio. Cobertura do solo.

ABSTRACT

Promoting the recovery of degraded areas in our planet is a challenge for humanity in the 21st century. The Gilbués region is considered the main area in degradation in the state of Piauí. Thus, there is a need to know the physical and chemical attributes of the soils of these areas, in order to propose technologies for their regeneration, generating employment, income and fixing the man in the field. The objective of this work is to characterize and analyze the spatial variability of physical-chemical soil attributes in a degraded area cultivated with jatropha and grasses, in Gilbués-PI. The study was carried out in an area of Litholic Neosol, with average sand contents of 564.5 g kg⁻¹, silt of 350.75 g kg⁻¹ and clay of 84.75 g kg⁻¹. Sampling for soil analysis and mapping was done in a regular 30 m grid and in a transect in the central part of the area at 5 m intervals, where 80 samples were collected at depths of 0.0-0.05, 0.05-0.10 and 0.10-0.20 m, totaling 240 samples, all submitted to physical and chemical analysis. The jatropha was planted in December 2009, in a simple spacing of 4 x 3 m. The grasses were sown in rows between the rows of jatropha with inter-row spacing of one meter. The studied area was divided into four sub-areas of approximately one hectare as follows: A1 - jatropha plus native grass (*Andropogon fastigiatus* SW); A2 - jatropha plus *Brachiaria decumbens*; A3 - jatropha plus *Brachiaria brizantha*, cultivar Piatã; and A4 - jatropha plus andropogon grass (*Andropogon gayanus* L.). Phenological and soil evaluations were initiated in 2010. For the evaluation of the vegetative part of the jatropha, thirty plants were selected in each area where the increment in height, crown and stem diameter were evaluated every three months for a period of three years. The sampling of forage plants was performed in ten points per area, where the increments of height, green and dry mass production for the grasses was done for the entire rainy period of each year. The data was submitted to statistical analysis, descriptive statistics, and geostatistics. Based on the results obtained, it was concluded that: (1) The soil physical data indicated that, the implantation of jatropha intercropped with different grasses in the degraded area, contributed to the increase of total organic carbon, aggregate stability, soil density, field capacity, wilting point and microporosity, leading to the improvement of soil structure and its water storage capacity; (2) The geometric mean diameter and aggregate stability index showed high spatial correlation with soil organic carbon; (3) The chemical data of the soil indicate that the intercropping between jatropha and grasses extracts a considerable amount of nutrients from the soil, which may lead to soil impoverishment in the long term if some kind of nutritional management is not used in the area; (4) Most of the physical-chemical attributes studied showed spatial dependence within the evaluated scale 30 x 30 m, which may influence the sampling of these attributes and the agricultural management of the soil. For all attributes that presented spatial dependence the relationship was classified as moderate to strong, with the exception of DMP that presented weak spatial dependence; (5) The physical-chemical attributes were those that presented the greatest spatial dependence within the evaluated scale 30 x 30 m, which may influence the sampling of these attributes and the agricultural management of the soil. For all attributes that showed spatial dependence the relationship was classified as moderate to strong, except the DMP that showed weak spatial dependence; and (6) The analysis of spatial distribution combined with kriging enabled the mapping of spatial variability of physical-chemical attributes, studied, of the soil in the three depths with the exception of geometric mean diameter and weighted in the year 2010, providing better visualization of their behavior in the study area.

Keywords: Desertification. Geostatistics. Semivariogram. Consortium. Soil cover.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Parâmetros do ajuste do modelo de semivariograma.....	44
Figura 2	Mapa de localização e imagem de satélite da área experimental da Embrapa Meio-Norte, no município de Gilbués, PI.....	48
Figura 3	Perfil do Neossolo Litófilo Eutrófico típico, presente na área de teste, comunidade Vaqueta, Gilbués, PI.....	49
Figura 4	Aspecto geral da área de estudo antes da implantação do experimento (a) e área de estudo com suas divisões em função dos tratamentos utilizados (b).....	50
Figura 5	Imagens do preparo da área com a construção dos terraços (a) e sulcamento (b).....	51
Figura 6	Área amostral, com <i>grids</i> em malha regular e transecção, contendo 80 pontos amostrais, na comunidade de Vaqueta, em Gilbués, PI.....	52
Figura 7	Amostragem do solo na área experimental (a) e mini trincheira para coleta de amostras indeformadas (b), na comunidade de Vaqueta, Gilbués, PI.....	54
Figura 8	Incremento médio em altura de plantas de pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI...	61
Figura 9	Incremento médio, em diâmetro, de copa de plantas de pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI.....	64
Figura 10	Incremento médio do diâmetro de caule de plantas de pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI.....	66
Figura 11	Produtividade de frutos e sementes de pinhão manso cultivado em área degradada consorciado com diferentes gramíneas em Gilbués, PI.....	67
Figura 12	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para carbono orgânico total (A, B e C, em 2010, e D, E e F, em 2012), e Índice de Estabilidade de Agregados (G, H e I, em 2010, e J, K e L, em 2012).....	77
Figura 13	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para Diâmetro Médio Ponderado (A, B e C, em 2010, e D, E e F, em 2012) e Diâmetro Médio Geométrico (G, H e I, em 2010, e J e K, em 2012), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI..	78
Figura 14	Mapa de distribuição espacial para Carbono Orgânico Total (COT), nos anos de 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	80
Figura 15	Mapa de distribuição espacial para o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA), nos anos de 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico, no município de Gilbués, PI.....	81
Figura 16	Mapa de distribuição espacial para o Diâmetro Médio Ponderado (DMP), nos anos de 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico, no município de Gilbués, PI.....	82
Figura 17	Mapa de distribuição espacial para o Diâmetro Médio Geométrico (DMG), nos anos de 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), nas camadas de	

	0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico, no município de Gilbués, PI.....	82
Figura 18	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente para: densidade do solo (A, B e C, em 2010, e D, E e F, em 2012); capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível (0,0-0,20 m, em 2010 e 2012); macroporosidade, microporosidade e porosidade total (0,0-0,20 m, em 2010 e 2012), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	90
Figura 19	Mapa de distribuição espacial para Densidade do solo (Ds), nos anos de 2010 (A, B e C) e de 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	92
Figura 20	Mapa de distribuição espacial para Capacidade de Campo – CC ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ponto de Murcha Permanente – PMP ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Água Disponível – AD (mm), nos anos de 2010 (A, C e E) e de 2012 (B, D e F), na camada de 0,0-0,20 m, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI....	93
Figura 21	Mapa de distribuição espacial para macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Porosidade Total – PT ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), em 2010 (A, C e E) e 2012 (B, D e F), nas camadas de 0,0-0,20 m de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	95
Figura 22	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para matéria orgânica (g.kg^{-1}), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), pH (H_2O), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	105
Figura 23	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para fósforo (mg.dm^3), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e potássio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	106
Figura 24	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para cálcio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e magnésio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	107
Figura 25	Mapa de distribuição espacial para matéria orgânica (g.kg^{-1}), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), pH (H_2O), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	109
Figura 26	Mapa de distribuição espacial para fósforo (mg.dm^3), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e potássio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	110
Figura 27	Mapa de distribuição espacial para cálcio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e magnésio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	112
Figura 28	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para sódio ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	119
Figura 29	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e	

	2012 (D, E e F), e soma de bases ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	120
Figura 30	Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e saturação por bases (%), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	121
Figura 31	Mapa de distribuição espacial para sódio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	123
Figura 32	Mapa de distribuição espacial para H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e soma de bases ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	124
Figura 33	Mapa de distribuição espacial para capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e saturação por bases (%), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI.....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Caracterização química e física do solo da área experimental nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m.....	51
Tabela 2	Altura de plantas (cm) de pinhão manso cultivado em área degradada consorciado com diferentes gramíneas em Gilbués, PI.....	60
Tabela 3	Diâmetro médio de copa (cm) de plantas de pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI....	63
Tabela 4	Diâmetro de caule (mm) de plantas pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI.....	65
Tabela 5	Análise descritiva dos atributos do solo, nos anos de 2010 e 2012, nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	72
Tabela 6	Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	76
Tabela 7	Análise descritiva dos atributos do solo, nos anos de 2010 e 2012, nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	87
Tabela 8	Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados para os dados de Densidade do Solo – DS (g cm^{-3}), Capacidade de Campo – CC ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ponto de Murcha Permanente – PMP ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Água Disponível – AD (mm), Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Porosidade Total – PT ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e valores de efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A), r^2 e dependência espacial, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	89
Tabela 9	Análise descritiva dos atributos do solo matéria orgânica (g.kg^{-1}) e pH (H_2O) nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	97
Tabela 10	Análise descritiva dos atributos do solo fósforo (mg.dm^3), potássio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), cálcio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$) e magnésio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), nos anos de 2010 e 2012, nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	99
Tabela 11	Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados para os dados de matéria orgânica (g.kg^{-1}) e pH (H_2O) nas camadas de 0,0-0,05, 0,05 0,10e0,10-0,20m.....	101
Tabela 12	Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados para os dados de fósforo (mg.dm^3), potássio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), cálcio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$) e magnésio ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$), e valores de efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A), r^2 e dependência espacial, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	103
Tabela 13	Análise descritiva dos atributos do solo sódio ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$) e alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$) nas profundidades de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	113
Tabela 14	Análise descritiva dos atributos do solo H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$), soma de bases, capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$) e saturação por bases (%), nos anos de 2010 e 2012, nas profundidades de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	114
Tabela 15	Estimativa dos modelos ajustados para os dados de sódio ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$) e alumínio ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$) para os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A), r^2 e dependência espacial, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	116
Tabela 16	Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados para os dados de H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$), soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$), capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c.\text{dm}^3$) e saturação por bases (%) para os parâmetros efeito pepita	

(C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A), r^2 e dependência espacial, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m..... 118

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Processos erosivos no Piauí.....	22
2.2 Causas da degradação do solo	23
2.2.1 Processos erosivos dos solos	20
2.2.2 Recuperação de áreas degradadas	26
2.3 Estratégias de recuperação de áreas degradadas	26
2.3.1 Revegetação de áreas degradadas	26
2.3.2 Utilização de pinhão manso na revegetação de áreas degradadas	28
2.3.3 <i>Andropogon gayanus</i> Kunth.....	31
2.3.4 <i>Andropogon fastigiatus</i> SW (Capim nativo).....	32
2.3.5 Gênero <i>Brachiaria</i>	32
2.3.6 <i>Brachiaria decumbens</i>	33
2.3.7 <i>Brachiaria brizantha</i> cv. <i>BRS Piatã</i>.....	35
2.4 Degradação e atributos relacionados ao solo	36
2.4.1 Densidade do solo	38
2.4.2 Porosidade do solo	38
2.4.3 Água no solo	39
2.4.4 Índice de Estabilidade de Agregados – IEA.....	41
2.4.5 Atributos químicos do solo	43
2.5 Sistemas de Informações Geográficas – SIGs	45
2.6 Geoestatística	46
2.7 Variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo	49
3 MATERIAL E MÉTODOS	52
3.1 Localização e caracterização da área de estudo	52
3.2 A amostragem do solo	56
3.3 Análises físicas	57
3.4 Análises químicas.....	59
3.5 Análise das plantas	59
3.6 Análise dos dados.....	60

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 Avaliação biométrica e produtividade do pinhão manso (<i>Jatropha curcas</i> L.).....	63
4.2 Atributos químicos do solo	99
5 CONCLUSÕES.....	131
REFERÊNCIAS	132

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há diversos questionamentos relacionados ao meio ambiente e, dentre esses, destaca-se a degradação do solo, não só pela amplitude das áreas afetadas, mas, sobretudo, pelas drásticas consequências na desestruturação do sistema produtivo, gerando perda do valor da terra e forte impacto social.

As áreas degradadas na região Nordeste do Brasil ocorrem, geralmente, em virtude das condições edafoclimáticas, que são potencializadas pelo uso e manejo que desconsideram as práticas conservacionistas para essas regiões. Os solos da região, em regra, são rasos, com precipitações pluviais sazonais, tendo como principal agente erosivo a erosão hídrica, com consequente perda da fertilidade do solo e redução da produtividade. Nessa região, destaca-se o município de Gilbués, PI, com a maior área em processo de desertificação do país, chamando atenção pelo acelerado nível de degradação do solo presente em seu território.

O núcleo de Gilbués, composto por 15 municípios, é a principal área degradada no sudoeste do Estado do Piauí, o que vem se agravando, cada vez mais, principalmente pelas ações antrópicas, ao longo do tempo, de forma desordenada, sem conhecimentos técnico e científico, abrangendo uma área de cerca de 7.759 km². As áreas degradadas mais expressivas encontram-se nos municípios de Gilbués (1.760 km²), Barreiras do Piauí (1.246 km²), Corrente (790 km²), São Gonçalo do Gurgueia (697 km²), Riacho Frio (689 km²) e Monte Alegre do Piauí (579 km²), correspondendo por cerca de 75% da área afetada (SILVA, 2008).

As intervenções antrópicas no uso do solo, como mineração, pecuárias extensivas e agricultura de subsistência, realizadas de forma inadequada, propiciaram a perda de sua qualidade em seus aspectos químico, físico e biológico, provocando a redução da capacidade do solo em exercer suas funções diversas. Essas alterações contribuem, geralmente, para o declínio da agregação do solo, bem como para o aumento de sua compactação, densidade e diminuição da porosidade total, facilitando o surgimento de erosões hídricas, podendo propiciar o abandono dessas áreas.

O conhecimento dos atributos físicos e químicos do solo é básico na condução do planejamento da produção da agropecuária de forma sustentável, auxiliando nas definições das práticas de manejo de solo, água e planta. Por essa razão, a caracterização da variabilidade espacial é essencial para um melhor entendimento das inter-relações entre atributos do solo e o seu manejo. A aplicação de técnicas de geoestatística permite modelar e descrever a variabilidade espacial dos atributos de solo e da planta, favorecendo a construção de mapas de isolinhas com o nível de detalhe desejável para maior compreensão dos dados no espaço.

A geoestatística também é usada como ferramenta auxiliar, visto que permite estabelecer um modelo de semivariograma que melhor descreve a variabilidade espacial dos dados, o qual é usado no processo de interpolação. É importante que o modelo ajustado represente a tendência da semivariância em relação à distância, sendo a krigagem o método de interpolação que confere maior exatidão às estimativas obtidas.

Diante do exposto, considera-se relevante o desenvolvimento de pesquisa sobre a variabilidade espacial dos atributos físico-químicos do solo em áreas degradadas com recuperação, incluindo gramíneas e espécies herbáceas ou arbóreas. Neste contexto, os objetivos deste trabalho foram:

- A. Avaliar a variabilidade espacial dos atributos físicos em diferentes profundidades de um Neossolo Litólico em uma área degradada, cultivada com pinhão manso consorciado com diferentes gramíneas, no município de Gilbués, PI;
- B. Avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos, macro e micronutrientes, em diferentes profundidades de um Neossolo Litólico em uma área degradada, cultivada com pinhão manso consorciado com diferentes gramíneas, no município de Gilbués, PI; e,
- C. Avaliar o desenvolvimento vegetativo, produtivo de plantas de pinhão manso, e a fenologia de diferentes gramíneas, cultivadas de forma integrada no município de Gilbués, PI.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos erosivos no Piauí

As primeiras referências sobre o processo de degradação ambiental no município de Gilbués-PI datam do início dos anos de 1970, com a descrição das características da paisagem local com a ocorrência dos garimpos de diamante na região (SILVA *et al.*, 1972).

No Piauí, os estudos sobre os processos de desertificação foram iniciados no ano de 1977, por meio de documentação fotográfica do estágio de degradação ambiental, momento em que se verificou um processo de degradação ambiental no município de Gilbués, com a constatação de grandes voçorocas.

Em 1994, foi criado o Instituto DESERT, organização não governamental com objetivo de desenvolver ações para recuperar a capacidade produtiva das áreas atingidas pela seca e desertificação, fornecendo elementos de sustentação a uma proposta de desenvolvimento regional (VASCONCELOS SOBRINHO, 1978). Em 1998, este instituto realizou “O Zoneamento Agroecológico do Município de Gilbués” e o “Estudo das Potencialidades Econômicas do Vale do Gurguéia e dos Cerrados do Sul do Estado do Piauí” (PIAUI, 2005).

Em 2003, foi implantado o Núcleo de Pesquisa de Recuperação de Áreas Degradadas, em Gilbués-PI (NUPERADE), quando foram iniciadas as atividades de remodelação topográfica seguidas da construção de pequenas barragens de terra e preparo do solo para a implantação das primeiras pesquisas agrossilvipastoris para recuperação das áreas do Núcleo (PIAUI, 2005).

Até hoje, o Núcleo vem desenvolvendo atividades de pesquisas em parcerias com a Universidade Federal do Piauí, Fundação Agente, Embrapa, Codevasf, dentre outras instituições, para a recuperação de áreas degradadas no município de Gilbués, epicentro dos processos de degradação de solos da região.

Segundo Diniz (1982), a área centro-ocidental do Nordeste apresenta um diagnóstico da região em que se encontra o município de Gilbués-PI, considerando as condições naturais, o povoamento e a população, as atividades econômicas e a organização urbana, e relacionou o processo de desertificação na área com a estrutura do relevo, do clima e a ação antrópica. Os principais fatores que contribuíram para o processo de desertificação na região foram as queimadas indiscriminadas, o superpastoreio e o desmatamento desordenado para a exploração da agropecuária.

Filgueiras (1991) fez uma análise agrostológica em Gilbués-PI e identificou o uso inadequado do solo e o processo de desertificação, respectivamente. Também realizou levantamento e caracterização das gramíneas que ocorrem na área, sugerindo estudos com esse grupo vegetal para controle e recuperação das áreas degradadas. Por fim, registrou as diferentes fácies da degradação e sua relação com as variações lito-pedológicas.

O maior interesse pelo conhecimento dos processos de degradação do solo no sul do Piauí tornou-se particularmente importante no início dos anos 2000, com a aceleração do desenvolvimento do agronegócio na região. Dados da CONAB revelaram um crescimento de 580% na produção de soja durante esse período. Esse crescimento acelerado foi observado especialmente nas regiões de chapada que tiveram sua cobertura florestal de cerrado, com predominância de Latossolos, substituída por grandes lavouras mecanizadas de sequeiro (CREPANI, 2009).

As atividades antrópicas contribuem para o agravamento da erosão, mas de maneira menos marcante do que tem sido descrito na literatura de desertificação do Núcleo, constituindo-se como atividade de maior impacto a pecuária, não pelo tráfego de animais em si, mas pelo corte ou roço dos arbustos do cerrado para aumento da vegetação herbácea, a queima das áreas para renovação das pastagens e o sobrepastoreio, que reduzem a cobertura vegetal, aumentando o risco de erosão (SAMPAIO *et al.*, 2003).

2.2 Causas da degradação do solo

Os processos de degradação do solo, a nível mundial, estão ligados, principalmente, às práticas agropecuárias inadequadas, à pressão populacional e à exploração inadequada dos recursos naturais. Levantamentos estimam que o crescimento dos processos de degradação do solo chega a 0,1% ao ano, o que equivale a cerca de cinco milhões de hectares/ano, e que 15% dos solos das áreas habitadas são classificadas como degradadas pela atividade antrópica (OLDEMAN, 1994).

Para Fendrich *et al.* (1988), o material de origem do qual o solo foi formado pode influenciar na formação de processos erosivos, sabendo que saprolitos, horizonte C com características da rocha matriz, podem apresentar alta erodibilidade.

Já Bertoni e Lombardi Neto (1993) afirmam que, no Brasil, um dos fatores de desgaste que mais tem contribuído para a infertilidade do solo é a erosão hídrica, facilitada e acelerada pelo homem por meio de práticas agrícolas inadequadas, como a semeadura contínua e mal

espaçada, bem como plantas que não protegem o solo, plantio no sentido do declive, queima de restos culturais, sobrepastoreio, dentre outros fatores.

De acordo com Lopes, Santos e Miguel Filho (2011), são várias as causas do processo de degradação em Gilbués-PI, sendo a principal delas a fragilidade do solo, seguida do manejo inadequado da agricultura, do desmatamento, da pecuária extensiva, do uso desordenado do fogo, das estradas mal planejadas e do garimpo de diamantes.

Desta forma, todos esses fatores, associados à geologia local, frágil e suscetível, fazem com que a paisagem da região apresente diversos níveis de erosão. Assim, em Gilbués, o fator mais marcante na paisagem são as áreas com acentuado processo de erosão, com ocorrência frequente de profundas voçorocas e grandes depósitos de sedimentos revolvidos (LOPES; SOARES, 2016).

A declividade acentuada e a forma das encostas do solo podem desfavorecer a infiltração da água de chuva, disponibilizando volumes expressivos de água escoada com velocidades significativas, fazendo com que haja a desagregação do solo e o carreamento de sedimentos para as cotas topográficas mais baixas (RODRIGUES, 2011). Juntando a textura com os fatores de declividade temos uma intervenção direta no processo de degradação do solo, pois solos úmidos são facilmente desagregados e transportados pelas chuvas, especialmente aqueles de textura com maiores teores de silte e areia fina (WISCHMEIER; JOHNSON; CROSS, 1971).

Além de todos os fatores elencados acima, temos a atividade antrópica que pode causar alterações diretas nas características do solo, como a: degradação física, alterando a textura, estrutura, profundidade, densidade do solo, taxa de infiltração e capacidade de retenção de água do solo; a degradação química, alterando os teores de carbono e nitrogênio contidos na biomassa microbiana; e, a degradação biológica, alterando o carbono orgânico total e o teor de matéria orgânica no solo. Quando essas características podem ser identificadas e quantificadas, é possível utilizá-las como indicadores da qualidade do solo; assim, a qualidade do solo é definida por suas propriedades físicas, químicas e biológicas (REINERT, 1998).

Portanto, todas essas características, ao serem analisadas em conjunto, determinam a suscetibilidade dos solos à degradação, definindo, desta maneira, os tipos de solos mais ou menos suscetíveis conforme o seu conjunto de características físicas, químicas e mineralógicas.

2.2.1 Processos erosivos dos solos

A erosão é a desagregação proporcionada pelo transporte e pela deposição dos materiais dos horizontes superficiais e profundos do solo, provocando o seu rebaixamento. Este fenômeno ocorre primeiramente pela remoção de partículas que, posteriormente, são transportadas para cotas topográficas inferiores, alcançando redes de drenagem (GUERRA; SILVA; BOTELHO, 1999). De acordo com a FAO (2019), a erosão foi considerada a ameaça número um às funções do solo, em especial nas regiões da África, Ásia, América Latina, dentre outras, que apresentaram uma maior tendência de deteriorização dos processos erosivos, diferentemente das demais regiões no mundo.

Sendo assim, a erosão é um dos maiores problemas do assoreamento de rios, degradação do solo, perdas de produtividade e degradação ambiental em áreas pós-exploração. O processo se inicia com o salpicamento, desprendimento e arraste das partículas a outras regiões onde estas ficarão depositadas, mediado pelo vento ou água (MARQUES JÚNIOR *et al.*, 2008). Esse processo de desprendimento e arraste de partículas do solo pela água, gelo, vento e outros agentes geológicos e antrópicos causam a modificação física e química dos minerais e rochas. Entretanto, a erosão natural, de natureza geológica, ocorre sob condições normais do meio ambiente em relação a clima e vegetação, sem a interferência do homem (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993).

Nos solos descobertos, geralmente o impacto da gota de chuva produz erosão hídrica, contribuindo para o arraste das partículas do solo, especialmente naqueles em que há declividade. Então, a água tende a descer em velocidade, quando o índice de pluviosidade chega a valores maiores que a taxa de infiltração básica (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012).

Os processos erosivos também se intensificam com a dinâmica climática local, sendo que climas tropicais caracterizados por totais pluviométricos elevados e distribuição não uniforme da chuva ao longo das estações do ano favorecem maior desagregação das partículas do solo. A partir da desagregação do solo, a água da chuva e o agente transportador do sedimento gerado, proporcionando o surgimento de caminhos preferenciais do escoamento. Mediante diversos fatores ambientais, os sulcos formados podem evoluir para ravinas, que, quando não são tomadas devidas medidas de correção e prevenção, podem dar origem a voçorocas (GUERRA, 2007).

A erosão do solo pela água ocorre por meio do escoamento superficial difuso ou concentrado. A erosão por escoamento difuso, chamada de erosão em lençol ou laminar, ocorre de forma lenta, transportando principalmente as partículas mais finas presentes na

superfície do solo, o que resulta na remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais (SANTANA, 1991). Já a erosão causada pelo escoamento concentrado, denominada erosão linear, é causada por concentração das linhas de fluxo das águas de escoamento, resultando em pequenas incisões na superfície do terreno, formando sulcos, ravinas e voçorocas (SALOMAO, 2007).

2.2.2 Recuperação de áreas degradadas

A recuperação de áreas degradadas pode ser conceituada como um conjunto de ações que visam restabelecer as condições de equilíbrio e sustentabilidade em um sistema natural. Na natureza há inúmeros processos e fenômenos biológicos, físicos e químicos envolvidos, portanto a degradação e a recuperação dessas áreas são atividades de complexidade.

Os termos recuperação, reabilitação e restauração vêm sendo utilizados e, de maneira geral, referem-se ao processo inverso à degradação. A recuperação é o processo de reparação dos recursos em uma área, suficiente para o restabelecimento das espécies naturais da região, em composição e frequência (GRIFFITH, 1986). Desta forma, a avaliação e o monitoramento é uma atividade fundamental no acompanhamento das alterações que ocorrem no sistema, sendo uma das formas para avaliar o estágio de degradação ou de recuperação de áreas onde estão sendo implementados mecanismos de controle.

Os métodos de recuperação de áreas degradadas sofreram mudanças ao longo dos anos por causa da evolução das pesquisas e do surgimento de novas tecnologias que vêm proporcionando um crescimento na busca por novas alternativas de recuperação de áreas degradadas. Nos locais onde a vegetação primitiva foi eliminada é possível reverter à superfície do solo por meio de processos de recuperação florestal (ALVES *et al.*, 2008).

2.3 Estratégias de recuperação de áreas degradadas

2.3.1 Revegetação de áreas degradadas

A recuperação de áreas degradadas, por meio da revegetação, requer o uso de espécies de rápido crescimento que sejam capazes de melhorar o solo, depositando matéria orgânica e reciclando nutrientes (FRANCO, 1991). Uma das principais dificuldades inerentes à busca

dessas características desejáveis é que a revegetação com espécies provenientes das regiões afetadas é dificultada pelo fato de poucas espécies suportarem as condições adversas de áreas degradadas. Nessas circunstâncias, o uso de espécies exóticas mais adequadas a esses locais pode ser uma alternativa para melhorar as condições do solo e permitir o desenvolvimento seguinte de espécies menos tolerantes às condições adversas.

Desta forma, a compatibilidade entre as espécies nativas da região e as espécies introduzidas para a recuperação, assim como a biodiversidade e o objetivo de uso da área após recuperação, devem ser levadas em consideração (TOY; DANIELS, 1998).

Resende *et al.* (2007) afirmam que conhecer os atributos do solo e da vegetação, que podem interferir no processo de degradação ambiental, é de fundamental importância para entender o processo. Em relação à vegetação, é interessante conhecer o tipo e a intensidade de cobertura que ela promove.

Áreas degradadas que foram sujeitas a remoção da vegetação e do solo (ou parte das camadas do solo) são propensas à recuperação por meio da revegetação. A recuperação da cobertura vegetal permite a regeneração por meio dos processos que a vegetação exerce sobre a morfologia, a química e a biologia do solo, além de melhorar o aspecto visual da área (RESENDE *et al.*, 2007). Ainda, o sistema radicular de algumas espécies vegetais, em especial as espécies florestais, forma uma densa malha de raízes na porção superficial do solo, criando uma defesa física eficiente contra a ação erosiva da água (PRANDINI; IWASA; OLIVEIRA, 1982).

Consoante Jesus (1994), na escolha das espécies destinadas a um plantio, principalmente em áreas degradadas, é mais importante o conhecimento do habitat e grupo ecológico a que pertence cada espécie, do que propriamente sua origem (exótica ou nativa). Portanto, o pinhão manso é uma planta considerada por muitos como uma espécie nativa e, por outros, uma espécie exótica, que pode se adaptar a diferentes condições edafoclimáticas e com potencial para a recuperação de áreas degradadas (ALVES, 2010).

Esta oleaginosa é tolerante ao déficit hídrico, menos exigente em nutrientes e apresenta capacidade de recuperação de áreas degradadas em função de suas raízes profundas, crescendo em solos de baixa fertilidade; no entanto, é responsiva à fertilidade do solo com elevados aumentos na produtividade das sementes (TEIXEIRA, 2005). Ela pode se desenvolver em diversos tipos de solos, inclusive naqueles arenosos, pedregosos, salinos, alcalinos e rochosos, os quais, sob o ponto de vista nutricional e físico, são restritivos ao pleno desenvolvimento de raízes (ALVES, 2010).

Neste contexto, essa oleaginosa apresenta muitos atributos, usos múltiplos e potencial considerável, uma vez que vem sendo plantada no controle de erosão, na contenção de encostas e dunas, e ao longo de canais, rodovias e ferrovias, e também como cerca viva em divisões internas ou limites de propriedades rurais (SATURNINO *et al.*, 2005).

Os sistemas silvipastoris consistem de uma combinação natural ou uma associação deliberada de um ou de vários componentes lenhosos (arbustivos e/ou arbóreos) dentro de uma pastagem de espécies gramíneas e leguminosas herbáceas nativas ou cultivadas, bem como sua utilização por ruminantes e herbívoros em pastoreio (RIBASKI *et al.*, 2005).

A integração e interação dos componentes pecuário, agrícola e florestal contribuem para o desenvolvimento sustentável, e essa atividade, além de melhorar a produtividade através do manejo integrado dos recursos naturais, possibilita a redução de processos erosivos, melhora a conservação de corpos d'água e aumenta a captura e fixação do carbono. Ainda, proporciona maior comodidade aos animais, aumenta a biodiversidade e reduz a pressão sobre as vegetações naturais remanescentes (DULEBA, 2009).

O plantio integrado de árvores em pastagens pode resultar em diferentes componentes para o ecossistema local, como mudanças no clima, solo, microrganismos, plantas forrageiras e animais. Dessa forma, o agricultor propicia condições ambientais favoráveis para suas pastagens e criações, podendo garantir, ainda, um acréscimo em seus lucros com a produção de madeira ou de frutos, dependendo da espécie implantada (RIBASKI *et al.*, 2005).

Assim, a adaptação de espécies forrageiras consorciadas depende, principalmente, de sua capacidade de se desenvolver em condições edafoclimáticas alteradas pela presença de espécies arbóreas no estrato vegetal superior (RIBASKI *et al.*, 2005). Portanto, a interação entre as diferentes culturas deve ser estudada caso a caso para determinar o melhor sistema de plantio e espaçamento a ser utilizado (PINAZZA; STOLF; MACEDO, 1994).

2.3.2 Utilização de pinhão manso na revegetação de áreas degradadas

A origem do pinhão manso (*Jatropha curcas L.*) é bastante controversa. Acredita-se que seja originário da América Central, contudo desenvolveu-se espontaneamente em diversas regiões do Brasil (ROSADO *et al.*, 2010). No entanto, somente nos últimos 40 anos passou a ser pesquisado agronomicamente e a ser domesticado, em virtude das suas características de

resistência à seca, recuperação de áreas degradadas e utilização medicinal (SATURNINO *et al.*, 2005).

O pinhão manso é uma planta perene, caducifólia e pertencente à família *Euphorbiaceae*, que compreende aproximadamente 8.000 espécies com cerca de 320 gêneros. O gênero *Jatropha* contém cerca de 160 espécies de plantas, em que várias apresentam valor medicinal, ornamental e na produção de óleo (SUJATHA; DHINGRA, 1993).

É uma árvore pequena e de crescimento rápido, podendo atingir até três metros de altura, com diâmetro de tronco de aproximadamente 0,20 m; porém, em condições especiais de cultivo pode atingir até cinco metros de altura e diâmetro variando de 0,20 a 0,30 m (HENNING, 2009). Possui caule liso, de lenho mole e medula desenvolvida, mas pouco resistente; floema com longos canais que se estendem até as raízes, nos quais circula o látex, suco leitoso que corre com abundância de qualquer ferimento. Com relação ao sistema radicular, o pinhão manso apresenta raízes bem desenvolvidas, com a pivotante longa e proeminente, além de raízes periféricas quando a planta é proveniente de plantio por semente, sendo que quando propagada de forma vegetativa, há, normalmente, a ausência da raiz pivotante. Em solos com baixa densidade, a raiz pode chegar ao dobro do comprimento da parte aérea (NUNES *et al.*, 2009).

As folhas são simples, com disposições alternadas a subpostas. As folhas novas são de coloração vermelho-vinho, cobertas com lanugem branca e, à medida que se expandem, tornam-se verdes, pálidas, brilhantes e glabras, com nervuras esbranquiçadas e salientes em sua face inferior. As inflorescências surgem junto com as folhas novas; as flores são de cores amarelo-esverdeadas, monóicas, unissexuais e produzidas na mesma inflorescência. Os frutos são do tipo cápsula trilocular e ficam carnudos e amarelados quando maduros, sendo compostos de 53 a 62% de sementes (SATURNINO *et al.*, 2005).

A semente é ovalada, endospermica, de envoltório liso e com suaves estrias, além de carúncula presa na parte ventral; a rafe é marcada longitudinalmente e pouco evidente, com presença de embrião munido com um par de cotilédones foliáceos e eixo hipocótilo radicular, cilíndrico e reto. A germinação é epígea e fanerocotiledonar (NUNES, 2007), sendo capazes de fornecer de 50 a 52% de óleo quando extraído com solvente, e de 32 a 35% quando extraído por prensagem das amêndoas, além de ter de 33,7 a 45% de casca, restando a torta como subproduto rico em N, P e K, que pode ser utilizada na adubação tanto da lavoura de pinhão manso como em outras culturas (MARTINS *et al.*, 2009).

Dependendo do espaçamento em que for plantado, em que os mais utilizados são os de 4 x 3 m ou de 4 x 4 m, sua produtividade pode passar dos 6.000 kg.ha⁻¹ de sementes,

produzindo mais de 2.000 kg.ha⁻¹ de óleo (LAVIOLA; DIAS, 2008). No entanto, com o melhoramento genético e o aprimoramento do sistema de produção, o pinhão manso poderia produzir acima de 4.000 kg.ha⁻¹ de óleo (MORAES, 2016).

Sendo assim, o cultivo de pinhão manso é encontrado desde o nível do mar até altitudes de aproximadamente 1.000 m; porém, observa-se que a planta se desenvolve melhor entre 200 e 800 m, em temperaturas médias variando entre 18 e 25°C (SATURNINO *et al.*, 2005). Entretanto, uma série de características do seu sistema produtivo ainda não são totalmente dominadas, como: colheita, espaçamento de plantio, tratos culturais, controle de pragas e doenças e necessidades hídricas (SANTOS, 2016).

Kheira e Atta (2009) referem que as informações relacionadas à necessidade hídrica da cultura são divergentes: em condições irrigadas, a planta pode receber 1.500 mm ano⁻¹ e sem irrigação, o pinhão manso tem boa resposta a uma precipitação de 1.200 mm ano⁻¹ combinado com altas temperaturas, podendo sobreviver com apenas 200 mm ano⁻¹.

O pinhão manso abrange diversos usos, desde a utilização como espécie oleaginosa para extração de óleos visando a produção de biodiesel, como também o seu subproduto, a torta resultante do processo de extração do óleo da semente, que tem aproveitamento como fertilizante natural (NETO, 2007).

Adicionalmente, esta cultura possibilita a recuperação de áreas degradadas, promovendo a integração do acesso à produção com renda. O óleo pode ser suprimento de energia, contribuindo com o desenvolvimento rural e com a segurança alimentar, além de permitir o uso de culturas anuais alimentícias em consórcio, bem como com melhorias ambientais, como a formação de um microclima, contribuindo, assim, com o desenvolvimento de outras culturas nas entrelinhas (SATO *et al.*, 2009).

De acordo com Tewari (2007), a produção anual do pinhão manso pode variar de 0,2 a pouco mais de 2 kg de sementes por planta, ou de 2 a 5 Mg ha⁻¹ a depender das condições climáticas e de manejo da cultura. A mais alta produtividade registrada na Índia, em área com cultivo de seis anos de idade sem irrigação, foi de cerca de 500 kg ha⁻¹ no quinto ano de cultivo, enquanto em áreas com apenas três anos de idade, sob condições de sequeiro, foi de apenas 450 kg há⁻¹ (DANIEL, 2008).

Para Drumond *et al.* (2007), existem relatos de produtividades em Petrolina, município de Pernambuco, variando de 330 kg ha⁻¹ em condições de sequeiro e de 1.200 kg ha⁻¹ em área irrigada já no primeiro ano de cultivo. Alves (2010), trabalhando com pinhão manso consorciado com espécies nativas na recuperação de área degradada, provocada pelo cultivo de cana-de-açúcar, no município de Araras, no Estado de São Paulo, uma produtividade de

1,09 Mg ha⁻¹ em cultivo de primeiro ano e de 1,45 Mg ha⁻¹ na área plantada somente com pinhão manso.

Castro, Devid e Anacleto (2008) afirmam que há demanda por pesquisas referentes ao pinhão manso, pois os dados de produtividade ainda são incipientes e faltam informações científicas sobre seu comportamento nas diferentes regiões em que está sendo cultivado. Apesar da grande rusticidade e avanço das pesquisas com o pinhão manso, existem alguns aspectos agronômicos que necessitam de maior investigação, como a interação com diferentes culturas consorciadas.

2.3.3 *Andropogon gayanus* Kunth

O capim andropogon (*Andropogon gayanus* Kunth) é uma gramínea proveniente da Nigéria, introduzida no Brasil em 1977 pelo Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, com o nome de Cultivar Planaltina. O capim andropogon foi introduzido na pecuária brasileira em alternativa à *Brachiaria decumbens*, forrageira bastante difundida e adaptada às condições de solo e clima brasileiros, mas com alta suscetibilidade ao ataque de pragas e fotossensibilização em bovinos (SERAFIM; GOMES; SEIXAS, 2015).

É uma planta perene de hábito de crescimento cespitoso, com intenso crescimento e perfilhamento no período chuvoso, além de apresentar touceiras de até um metro de diâmetro e perfilhamento com altura de até 2,0 m. Possui lâmina foliar inteiramente pilosa e sistema radicular com raízes profundas e altamente ramificadas, que podem alcançar até 1,2 m de profundidade (SOUSA, 2009).

Segundo Nascimento e Renvoize (2001), esta gramínea se desenvolve bem em altitudes entre 1.000 e 2.000 m, e precipitação anual entre 400 e 1.500 mm. Bem adaptada a solos drenados, também se adapta em solos ácidos, pouco férteis e pobres em fósforo. No entanto, responde bem, também, à adição de fertilizantes nitrogenados (HAGGAR, 1975).

Apesar de sua tolerância ao estresse hídrico, a baixa disponibilidade hídrica na estação seca reduz sua produção de forragem (LEITE, 2001). Desta forma, anualmente, produz uma média de 9,5 t ha⁻¹ de massa seca na estação chuvosa e uma média de 2,5 t ha⁻¹ de massa seca na estação seca (BOTREL; ALVIM; XAVIER, 1999). Estas características morfofisiológicas lhe conferem uma elevada relação folha:caule na fase vegetativa, com uma grande capacidade de rebrota e, conseqüentemente, maior adaptação ao pastoreio ou à tolerância ao corte (SOUSA, 2009).

Quanto ao valor nutritivo, o capim *Andropogon* se caracteriza por apresentar digestibilidade entre 4 e 50%, proteína bruta entre 4 a 10%, baixos teores de fósforo (de 0,08 a 0,14%) e teores de cálcio de 0,27 a 0,39%, bem como uma capacidade de suporte de 1,5 a 2,0 UA ha⁻¹ no período chuvoso e de 1,0 a 1,3 UA ha⁻¹ no período seco (COSTA, 2001).

Dentre todas suas características, observa-se que o capim *Andropogon* se destaca pelo seu desenvolvimento, principalmente o sistema radicular, o que lhe confere rusticidade e tolerância à seca, proporcionando, assim, que seja utilizado como estratégia de convivência com a seca em regiões semiáridas e como alternativa no controle de erosão em áreas com avançado processo de degradação do solo.

2.3.4 *Andropogon fastigiatus* SW (Capim nativo)

De acordo com Zanin (2015), o *Andropogon fastigiatus* foi descrito pela primeira vez no Piauí, em 1980, no município de Campo Maior, pela pesquisadora da Embrapa Meio-Norte Dra. Maria do Socorro Bona Nascimento (NASCIMENTO; RENVOIZE; NASCIMENTO, 2002). Posteriormente, o mesmo foi descrito em 1988, em Gilbués, por T. S. Filgueiras e S. M. C. B. Rodrigues (FILGUEIRAS, 1991).

O *Andropogon fastigiatus* é facilmente reconhecido por apresentar apenas um ramo florífero por unidade de inflorescência, com espiguetas sésseis comprimidas entre o entrenó da ráquis e o pedicelo, com aristas longas de 33-47 mm de comprimento, sendo o entrenó da ráquis e o pedicelo fortemente clavados (ZANIN, 2015).

Nascimento e Revoize (2001) afirmam que se trata de uma planta de ocorrência comum nas regiões tropicais, crescendo nas áreas de campo, cerrado e caatinga, principalmente em locais alterados pela ação do homem e pelo superpastejo, em solos arenosos ou pedregosos. Apresenta baixo potencial forrageiro pela reduzida palatabilidade e produtividade, além da baixa relação folha:caule.

A sua baixa palatabilidade também é provocada pela presença de aristas, um prolongamento semelhante a um pelo rígido encontrado nos invólucros das sementes, que podem penetrar na pele e nos olhos dos animais, fazendo com que também seja conhecido, em algumas regiões, como capim-pinica. Como não apresentam boa palatabilidade, essas espécies tendem a aumentar nas áreas superpastejadas (NASCIMENTO; RENVOIZE; NASCIMENTO, 2002).

2.3.5 Gênero *Brachiaria*

O gênero *Brachiaria* abrange cerca de 100 espécies. A *Brachiaria* foi inicialmente descrita por Trinius, em 1834, como uma subdivisão de *Panicum* e, posteriormente, elevada à categoria de gênero por Grisebach, em 1853 (RENVOIZE; CLAYTON; KABUYE, 1998). Esta espécie está distribuída nos trópicos em ambientes como pântanos, florestas sombreadas e áreas semidesérticas, concentrando-se nas savanas africanas. Estas plantas são caracterizadas por alta flexibilidade no seu uso e manejo, e tolerância a diversas restrições ou condições restritivas de muitas espécies forrageiras (SILVA, 2004).

Desta forma, a *Brachiaria* teve um papel extremamente importante no Brasil, pois viabilizou a pecuária de corte nos solos ácidos e de baixa fertilidade, constituindo, ainda hoje, a base das pastagens cultivadas no país, além de ter propiciado um desenvolvimento expressivo na indústria de sementes, colocando o Brasil como o maior exportador desse insumo para o mundo tropical (CORREIA, 2002). Outra aplicação dessa gramínea se refere às ações preventivas dos processos erosivos dos solos, bem como para a recuperação de áreas degradadas (TIMOSSI; DURIGAN; LEITE, 2007).

A formação de pastagens de *Brachiaris* tem sido bastante difundida no Brasil, apresentando um grande aumento em áreas cultivadas em função de sua ampla adaptabilidade aos tipos de solos e climas (EMBRAPA, 2005). Esta adaptabilidade se observa em virtude de que quatro plantas deste gênero – *B. brizantha*, *B. ruziziensis*, *B. decumbens* e *B. humidicola* – são responsáveis por cerca de 80% de toda a área de pastagens cultivadas em nosso meio (HODGSON; SILVA, 2002).

2.3.6 *Brachiaria decumbens*

A *Brachiaria decumbens* é uma espécie perene, originária de Uganda, África, e introduzida no Brasil, na década de 1950, pelo Instituto de Pesquisas e Experimentação Agropecuária Norte (IPEAN), de Belém do Pará, sendo ali reproduzida e difundida para o restante do território nacional como *Brachiaria decumbens* var. IPEAN (SERRÃO; SIMÃO NETO, 1971).

É uma planta altamente aclimatada e muito agressiva, sobretudo nos cerrados. Essa espécie apresenta boa digestibilidade e palatabilidade, e se adapta bem em solo com fertilidade de média a baixa, requerendo práticas simples e adequadas de manejo. Cresce na forma decumbente e possui boa utilização para pastoreio, com alta resistência ao pisoteio e

produção de feno; porém, sua resistência a áreas úmidas é baixa (CRISPIM; BRANCO, 2002).

A *Brachiaria decumbens* var. Basilisk foi introduzida, no Brasil, em 1972 (DRIEMEIR *et al.*, 1999), pela importação de sementes de plantas oriundas da África, mas que tinham passado por um processo de seleção na Austrália. A grande vantagem da var. Basilisk sobre a var. IPEAN é sua propagação mais fácil por meio de sementes, uma vez que esta é a principal forma de propagação da variedade. A IPEAN propagava essa gramínea por meio de mudas, tornando sua implantação mais lenta e onerosa para o produtor (NAZÁRIO *et al.*, 1977).

A *Brachiaria decumbens* var. Basilisk possui um rápido estabelecimento, alta competição com plantas invasoras e eficácia na proteção do solo, características que fazem com que esta planta possua um bom potencial forrageiro. Essas características também a tornam uma boa alternativa para limitar processos erosivos, desde que sejam utilizadas práticas adequadas de uso e manejo visando à conservação do solo nas áreas onde é implantada (CAVALCANTI FILHO *et al.*, 2008).

Entre os motivos que explicam a grande difusão da *B. decumbens*, em todo território nacional, estão a facilidade de aquisição de sementes de boa qualidade, a alta produção de sementes após estabelecimento e a boa tolerância a solos de média a baixa fertilidade, onde pode atingir boas produções (RAMIREZ, 2010).

A cultivar Basilisk possui excelente adaptação aos solos fracos e ácidos do cerrado, tem fácil estabelecimento, com boa produtividade de forragem sobre uso intensivo, possui bom desenvolvimento sob sombra e boa qualidade forrageira, além de elevada persistência (VALLE *et al.*, 2010).

Sotomayor-Rios, Rodriguez-Garcia e Velez-Santiago (1981), avaliando diferentes espécies de *Brachiaria*, obtiveram para a cv. Basilisk produção média de massa seca de 19,2 t/ha/ano, durante 18 meses de avaliação, com intervalos de cortes de 30, 45 e 60 dias.

Mendonça (2012) comenta que, mesmo sendo consideradas altamente produtivas, as forrageiras tropicais concentram, aproximadamente, 80% da sua produção anual de forragem na época do ano em que as precipitações pluviais e temperaturas são maiores, ocorrendo, assim, estacionalidade na produção; essas alterações nas condições ambientais também provocam variações na composição química da forragem. Segundo Euclides *et al.* (2010), como consequência desse fato, as forrageiras tropicais não fornecem quantidades suficientes de nutrientes para a produção máxima dos animais.

As gramíneas tropicais, de modo geral, apresentam no ponto ótimo de corte, teores de PB de 8 a 14%, FDN de 60 a 75% e digestibilidade *in vitro* da MS de 50%. Desta forma,

quando a concentração de proteína bruta na forragem é inferior a 7%, o bom funcionamento do rúmen é comprometido. Ocorre, então, diminuição da atividade dos microrganismos ruminais, das taxas de digestão e passagem, resultando em menor consumo voluntário (EUCLIDES, 1995).

Nos últimos anos, os estudos com capim-braquiária abordaram, em sua maioria, aspectos procurando respostas sobre o desempenho animal, suplementação proteica e/ou energética, taxa de lotação e oferta de forragem, levando à escassez de informações relacionadas à estrutura do dossel forrageiro, valor nutritivo da forragem e massa de forragem (MENDONÇA, 2012).

2.3.7 *Brachiaria brizantha* cv. BRS Piatã

A *Brachiaria brizantha* é uma espécie originária da África, descrita como uma planta perene, cespitosa, muito robusta, lâminas foliares linear-lanceoladas, com colmos iniciais prostrados, mas produzindo perfilhos predominantemente eretos (SOARES FILHO; MONTEIRO; CORSI, 1992).

Esta forrageira foi muito difundida entre os pecuaristas brasileiros por causa da sua boa adaptação e à alta produtividade de matéria seca por área (ZIMMER; SILA; MAURO, 2002). Além disso, Vilela (2005) ressalta sua capacidade de supressão de ervas daninhas, adaptação à condição de baixa luminosidade, tolerância a solos ácidos e altos níveis de alumínio tóxico.

Ressalta-se, também, que a *Brachiaria brizantha* possui um sistema radicular vigoroso e profundo, apresentando elevada tolerância à deficiência hídrica e absorção de nutrientes em camadas mais profundas do solo, desenvolvendo-se em condições ambientais em que a maioria das culturas produtoras de grãos e das espécies utilizadas para cobertura do solo não se desenvolveriam bem (BARDUCCI *et al.*, 2009).

Diante dessas características, uma aplicação para essa gramínea se refere às ações preventivas dos processos erosivos dos solos (TIMOSSI; DURIGAN; LEITE, 2007) e para recuperação de áreas degradadas (PEREIRA, 2006). De acordo com esses autores, a espécie possui capacidade de reestruturar o solo por meio de seu rico sistema radicular, que proporciona condições favoráveis para infiltração, aeração e retenção de água. Além disso, a parte aérea dessas plantas protege o solo, diminuindo sua temperatura e evitando perdas por erosão e evaporação da água, o que proporciona melhores condições para o desenvolvimento de micro e meso-organismos.

O cultivar Piatã foi o resultado de uma seleção de 16 anos realizada pela Embrapa, a partir do material oriundo da região de Welega, Etiópia, na África, coletado na década de 1980, e lançado em maio de 2007. É uma planta de crescimento ereto e cespitoso, de porte médio, com tamanho variando de 0,85 a 1,10 m, apresentando colmos verdes e finos. As bainhas foliares têm poucos pelos e a lâmina foliar é glabra (EMBRAPA, 2010).

A cultivar Piatã é uma importante alternativa para a diversificação de pastagens em função das suas características de floração precoce nos meses de janeiro e fevereiro, permitindo a recuperação das plantas e a produção de forragem de boa qualidade no final do período chuvoso; seus colmos são finos e palatáveis, o que garante seu consumo pelos animais durante a estação seca. É mais resistente às cigarrinhas das pastagens, embora, como outras brizanthas, seja danificada pelas cigarrinhas da cana, e não tão sensível a solos mal drenados quanto o capim-marandu. Ainda, associa-se muito bem com o estilete campo grande e com milho e sorgo na integração lavoura-pecuária (COSTA *et al.*, 2009).

Apresenta boa produção de forragem e, em parcelas sob corte, em solos de média fertilidade e sem adubação de reposição, em Mato Grosso do Sul, produziu, em média, 9,5 t ha⁻¹ de matéria seca com 57% de folhas, sendo 30% dessa produção obtida no período seco. O teor médio de proteína bruta nas folhas foi de 11,3% (ANDRADE; ASSIS, 2010).

Trevisanuto *et al.* (2008), em experimento realizado no Estado de São Paulo, na cidade de Botucatu, comparando os capins marandu, xaraés e piatã quanto à produção de matéria seca, verificaram que a produção de matéria seca para o capim-piatã foi de 15.820 kg ha⁻¹. Já Lima (2013), em trabalho comparando a produção de forragem entre os capins marandu e piatã, sob duas intensidades de pastejo com ovinos, no município de Macaíba, RN, obteve uma produção de massa seca de forragem de 3.676,98 kg ha⁻¹ para o capim-piatã.

Zanine *et al.* (2009), avaliando o desenvolvimento e a composição bromatológica da *Brachiaria brizantha*, obtiveram valores para a matéria seca de 2,21 kg ha⁻¹, proteína bruta de 9,78%, fibra em detergente neutro de 65,09 g.Kg⁻¹ e fibra em detergente ácido de 30,22 g.Kg⁻¹. Botrel, Alvim e Xavier (1999) apresentam que a gramínea *Brachiaria brizantha*, no período da seca, alcançou produção de 3.000 kg.ha⁻¹ de matéria seca, com concentração de proteína bruta, em média, de 6,50% e uma produção de mais de 13.000 kg.ha⁻¹ de matéria seca, no período chuvoso.

2.4 Degradação e atributos relacionados ao solo

O uso do solo, sem a implementação de técnicas adequadas de proteção e manejo, faz com que a degradação seja um processo permanente, especialmente em áreas recém-abertas, onde a erosão é provocada não somente pelo efeito das gotas da chuva, mas também pelo escoamento superficial da água, que promoverá o carreamento de suas partículas. Desta forma, sendo o solo um sistema afetado tanto pela ação humana como pela natural, e suas características variam de acordo com o uso dependendo de fatores externos, como precipitações pluviais, vento, material de partida e outros (VRIES; TIMMER; VRIES, 2013).

Dentre as ações antrópicas que podem levar aos processos de degradação do solo, destacam-se as atividades agropecuária, agronegócio e subsistência, as atividades de mineração e seus diversos ramos de exploração, como a extração de diamantes, vermiculita e caulim (ALMEIDA-FILHO; CARVALHO, 2010). Assim, nos solos degradados pelas atividades antrópicas geralmente são introduzidas alterações em suas propriedades físicas originais, o que propicia uma fragmentação mais fácil e rápida dos agregados do solo (DIAS; GRIFFITH, 1998).

A caracterização do solo pode ser determinada por um conjunto de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, que estão fortemente inter-relacionadas, de modo que a alteração de uma das propriedades traz consequências para todas as outras (FREITAS *et al.*, 2013), não podendo ser utilizadas de maneira isolada para a determinação da qualidade do solo (ROUSSEAU *et al.*, 2012).

Consoante Rousseau *et al.* (2013), a qualidade física pode ser avaliada por meio de análises da estrutura do solo, como densidade, porosidade, estabilidade de agregados, resistência à penetração, infiltração, tamanho e continuidade dos poros, retenção de água, umidade, dentre outros. Já a avaliação da qualidade química dos solos é realizada mediante a utilização de análises tradicionais de fertilidade do solo, como pH, P, bases trocáveis e matéria orgânica (SILVA *et al.*, 2013).

A substituição de áreas nativas para a implementação de pastagens, plantio tradicional e retirada de madeira para combustível, comuns na região de Gilbués-PI, podem acarretar em mudanças nas propriedades físicas e químicas do solo, prejudicando, assim, as condições de manutenção das áreas, fazendo com que os produtores utilizem áreas degradadas de baixo rendimento, o que propicia um aumento da pressão por abertura de novas áreas para produção. Portanto, forma o conhecimento dos processos de degradação do solo, bem como as consequências provocadas por esta degradação, o que pode auxiliar, de maneira satisfatória, na obtenção de sistemas de produção mais sustentáveis para essas áreas.

2.4.1 Densidade do solo

A densidade do solo é um atributo indicador da relação entre o espaço vazio e sólido do solo, podendo ser influenciada por qualquer mudança na disposição das partículas do solo, bem como indicar compactação, alterações estruturais e na porosidade do solo (REICHARDT; TIMM, 2008). Desta forma, os solos agrícolas apresentam grande amplitude de densidade em função de suas características mineralógicas, de textura e do teor de matéria orgânica (MARCOLIN; KLEIN, 2011).

Portanto, a sua densidade pode variar de 0,9 a 1,8 g cm⁻³, sendo fortemente influenciada pela textura e pelo teor de matéria orgânica presente no solo (KLEIN, 2014). Assim, de maneira geral, os solos arenosos apresentam densidade superior aos solos argilosos e os solos siltosos densidade intermediária (LIBARDI, 2005).

Sendo assim, a densidade do solo pode ser utilizada como um indicador do grau de compactação do solo, uma vez que a massa do solo, por compressão, pode ocupar um menor volume (REICHARDT; TIMM, 2008). A compactação, geralmente, é uma das maiores causas da degradação de solos agrícolas, comprometendo a qualidade do solo, pois se caracteriza pela diminuição do volume dos espaços vazios ocupados pela água ou pelo ar, reduzindo as trocas gasosas e a disponibilidade de oxigênio, bem como limitando a infiltração e a redistribuição de água, além de interferir diretamente no desenvolvimento das plantas (VIEIRA; KLEIN, 2007).

Nas áreas agrícolas, a compactação pode ocorrer tanto em virtude dos processos pedogenéticos, como pelas operações mecanizadas realizadas inadequadamente, sem critérios básicos; dentre esses, destaca-se o teor de umidade do solo no ponto de friabilidade (RICHART *et al.*, 2005). Essa compactação também pode ocorrer por causa de tráfego de animais, devido à elevada pressão exercida sobre o solo pelas patas em função da elevada massa corporal aplicada em uma pequena área de contato, destacando-se como a maior causa da degradação dos solos sob pastagem (RIBON; TAVARES FILHO, 2004).

2.4.2 Porosidade do solo

A razão entre o volume dos poros e o volume total do solo é definida como porosidade. Dessa forma, o espaço do solo não ocupado por sólidos, e ocupado por água e ar,

constitui o espaço poroso, definido como a razão entre o volume dos poros e o volume total de um solo, e está sempre próximo de 50%, em média (KLEIN, 2014).

Com relação à parte sólida, pode-se observar que as partículas minerais do solo têm propriedades e comportamentos muito diferentes. O maior tamanho dos poros da fração areia contribui para o aumento da permeabilidade à água e do ar no solo, porém possui baixa capacidade de retenção de água e é considerado não coesivo. A fração de silte é inferior que a areia e possui mais poros, por isso retém mais água e tem uma taxa de drenagem menor. Já a argila possui grande área superficial específica, o que resulta em alta retenção de água e lentos fluxos de ar e água, além de elevada viscosidade no estado úmido e alta coesão no estado seco (BRADY; WEIL, 2008).

Solos com textura ou granulometria fina, como os materiais argilosos, tendem a apresentar uma porosidade maior que aqueles com textura mais grosseira, como as areias. Vale ressaltar, ainda, que a porosidade total nos solos argilosos pode, naturalmente, variar consideravelmente, uma vez que esses solos podem se expandir e contrair com a entrada e saída de água, processo esse que depende, fortemente, da natureza da argila presente no solo (OTONI, 2005). A porosidade total, apesar de expressar os volumes dos poros do solo, nada revela sobre a distribuição dos mesmos, sendo classificada em duas classes principais: microporos e macroporos (HILLEL, 1980).

Os microporos, depois de saturados em água, a retêm contra a gravidade, sendo responsáveis pela retenção e pelo armazenamento de água no solo. Já os macroporos fazem o processo contrário: após serem saturados em água, não a retêm, ou são esvaziados pela ação da gravidade, contribuindo majoritariamente para a infiltração de água no solo. Desta forma, os macroporos são considerados os poros maiores que 0,05 mm, os microporos aqueles entre 0,05 e 0,0002 mm e criptoporos, os poros menores que 0,0002 mm, sendo que o volume de criptoporos é igual ao volume de água retida no ponto de murcha permanente (PMP) (KLEIN, 2014).

Klein e Libardi (2002) avaliaram que, em camadas compactadas, tanto a porosidade total como os macroporos representam redução de volume em relação ao seu estado original, acompanhada pelo aumento da microporosidade e da densidade dos solos. Neste sentido, o aumento da microporosidade favorece a retenção de água no solo ao mesmo tempo em que compromete o transporte de ar e água, bem como o desenvolvimento radicular (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

2.4.3 Água no solo

O conhecimento da umidade do solo é de fundamental importância, uma vez que é um indicador do seu estado hídrico. Desta forma, a umidade do solo é um dos parâmetros básicos para caracterização e quantificação de sua água, influenciando decisivamente outras propriedades físicas e processos que nele ocorrem. O monitoramento da umidade visa determinar a capacidade de armazenamento de água do solo, o que permite um manejo mais eficaz de seu uso.

Deste modo, a água disponível às plantas é aquela situada entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), considerando que nesse intervalo toda a água presente está, total e igualmente, disponível para as plantas. Contudo, essa distribuição não ocorre de maneira homogênea, pois o solo, dependendo de suas características, apresenta uma faixa de variação de volume muito extensa e altamente dependente da condutividade hidráulica quando não saturado (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1949).

Sendo assim, o resultado numérico da estimativa da água disponível é obtido pela diferença entre CC e PMP, multiplicado pela profundidade efetiva do sistema radicular, definindo a “capacidade de água disponível” [$CAD=(CC-PMP).z$]. A acurácia da estimativa da CAD, portanto, é função da acurácia de determinação daqueles limites da água no solo (SILVA, 2014).

A CC é a quantidade de água retida pelo solo depois que o seu excesso tenha sido eliminado, o que, geralmente, ocorre de dois a três dias após uma chuva e/ou irrigação em solos permeáveis de estrutura e textura uniforme. Então, quando o solo se encontra na CC, os macroporos estão livres de água, sendo os mesmos esvaziados no potencial matricial de - 0,006 Mpa (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1949).

O PMP é definido como o teor de umidade, θ , no qual a planta atinge um murchamento irreversível, não retornando a turgidez, nem mesmo quando submetida à condição de atmosfera saturada por 12 h (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1949). Assim, o PMP é uma grandeza física do um solo, estimada pelo teor de água retida no potencial matricial de, aproximadamente, -1,5 MPa (ROMANO; SANTINI, 2002), tendo em vista que o murchamento permanente das folhas, em condições de vasos contidos em estufas, acontece aproximadamente a essa tensão. Entretanto, esse método indireto de determinação do PMP continua aberto à discussão, porque sugere que todas as espécies se comportem similarmente em diferentes solos e climas (WINTER, 1984).

A determinação do PMP é complexa e seu valor é estimado como uma referência, já que o murchamento das plantas ocorre antes que a tensão da água no solo atinja o PMP;

entretanto, a atividade fisiológica só para após atingir esse ponto, podendo variar conforme a espécie de planta em questão (JONG VAN LIER, 2000). Dessa forma, a umidade referente a uma tensão de água de -1,5 MPa, obtida por dessecação de amostras indeformadas em câmara de pressão, tornou-se o método de determinação do PMP mais frequentemente aplicado, apesar de suas limitações (RICHARDS; WEAVER, 1944; ROMANO; SANTINI, 2002). Esse procedimento representa uma metodologia simples, rápida e precisa que independe do comportamento da planta (WINTER, 1984).

Portanto, pode-se concluir que a CC é a água retida por um solo depois que o excesso tenha drenado, ao passo que o PMP é o teor de água de um solo no qual as plantas atingiram um grau de murchamento em que não conseguem se recuperar – sendo essa a mínima quantidade de água disponível no solo para o desenvolvimento das plantas (VIEHMEYER; HENDRICKSON, 1949).

2.4.4 Índice de Estabilidade de Agregados – IEA

A agregação e a estabilidade dos agregados do solo influenciam nos seguintes processos do solo: aeração, infiltração de água, susceptibilidade à erosão, penetração de raízes, movimentação e disponibilidade de nutrientes, dentre outros (ROUSSEAU *et al.*, 2013). Os agregados podem ser classificados quanto ao tamanho, de acordo com a teoria da hierarquização de agregados, em cinco grupos: < 0,2 μm ; de 0,2 a 2 μm ; de 2 a 20 μm , de 20 a 250 μm ; e, > 2000 μm (TISDALL; OADES, 1982).

Segundo Souza *et al.* (2004), a formação e a estabilização dos agregados do solo ocorrem simultaneamente na atuação de processos físicos, químicos e biológicos. Esses processos atuam por mecanismos próprios, em que são envolvidos por substâncias que agem na agregação e na estabilização, sendo as principais: argila, sílica coloidal, compostos orgânicos, metais polivalentes, carbonato de cálcio, óxido e hidróxidos de ferro e alumínio. Desta forma, mudanças no uso e no manejo do solo, ou distúrbios que causem alterações nos agregados e sua estabilidade, influenciam, diretamente, na qualidade do solo (ZHOU *et al.*, 2012).

A matéria orgânica do solo é um dos principais agentes de formação e estabilização de agregados do solo, e a diminuição de seu teor é uma das maiores causas de deterioração de sua estrutura (JOHN *et al.*, 2005). Assim, sistemas que aumentam os teores de matéria orgânica e reduzem ou eliminam o revolvimento do solo favorecem a formação e a

estabilidade de seus agregados, proporcionando a predominância de macroagregados (TISDALL; OADES, 1982).

Juntando-se a esses sistemas, tem-se a vegetação, um fator importante na formação de agregados, que, por ação mecânica das raízes ou pela liberação de matéria orgânica, indiretamente, fornece nutrientes à fauna do solo (KIEHL, 1979). O tipo de vegetação também interfere na estruturação dos solos, ou seja, as gramíneas são mais eficientes em aumentar e manter a estabilidade de agregados do que as leguminosas, por apresentarem um sistema radicular extenso e renovado constantemente (CARPENEDO; MIELNICZUK, 1990).

Portanto, observa-se que a estabilidade do agregado depende das características inerentes ao solo e ao sistema de manejo, pois solos severamente revolvidos levam à destruição de agregados, o que reduz, de maneira drástica, a estabilidade dos agregados. Então, a estabilidade de agregados expressa a resistência à degradação quando os agregados do solo são submetidos a forças que tendem a rompê-los, sendo importante em estudos de qualidade do solo e utilizada como indicador da sustentabilidade de sistemas de uso e manejo do solo (ANDRÉA *et al.*, 2002).

Kemper e Chepil (1965) propuseram a utilização do diâmetro médio ponderado (DMP), do diâmetro médio geométrico (DMG) e do índice de estabilidade de agregados (IEA) como índices para a avaliação da estabilidade de agregados do solo. O DMP é diretamente proporcional à percentagem de agregados grandes, e demonstra a estabilidade da estrutura frente a ação de desagregação da água, podendo indicar o grau de susceptibilidade do solo à erosão hídrica (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998; BERTOL *et al.*, 2004). Já o DMG representa uma estimativa do tamanho dos agregados de maior ocorrência, e o IEA denota uma medida de agregação total do solo e não considera a distribuição por classes de agregados, uma vez que quanto menor for a quantidade de agregados de menor diâmetro, maior será o IEA.

Consoante Mendes, Mellhoni e Mellhoni (2006), crescimento radicular, diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico dos agregados possibilitaram discriminação das áreas naturais e aquelas em recuperação, e apresentaram potencial de aplicação em estudos de avaliação da qualidade dos solos. Ainda, uma maior estabilidade de agregados, estimada pelo diâmetro médio geométrico, foi observada em áreas de mata nativa quando comparada com outros sistemas, visto que o preparo do solo tende a romper sua estrutura, destruindo os agregados (MARTINS *et al.*, 2002).

Corado Neto *et al.* (2015a), trabalhando com a variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico em área de Neossolo Litólico no município de Gilbués, encontraram

elevada correlação entre a DMG e o IEA com os teores de carbono orgânico do solo na área estudada. Contudo, mesmo não se conhecendo números absolutos para a interpretação, por meio da análise de agregados, de quando se pode considerar um solo com boas ou más propriedades físicas, a estabilidade de agregados tem sido usada como indicador da qualidade física do solo, pois é sensível às alterações, conforme o manejo adotado (AGUIAR, 2008).

Assim, a estabilidade dos agregados pode ser utilizada como um indicador da degradação ou recuperação da qualidade do solo, uma vez que a estabilidade dos agregados caracteriza a resistência que eles oferecem à quebra causada por agentes externos, sendo a agregação do solo de grande importância para a produção agrícola. Isso porque, está relacionada à aeração do solo, desenvolvimento da estrutura radicular, fornecimento de nutrientes, resistência mecânica do solo à penetração e retenção e armazenamento de água, tornando-os mais estáveis e menos susceptíveis à erosão (MARIA; KOCSSI; FALCIDECHEN, 2007).

2.4.5 Atributos químicos do solo

Melo (2010), caracterizando diversos níveis de degradação no Núcleo de Desertificação de Gilbués, observou que os valores médios para os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e P, de uma maneira geral, caracterizam os solos da região como de alta fertilidade, de acordo com os critérios de Alvares *et al.* (1999). Tais valores foram encontrados, principalmente, nas áreas mais degradadas, onde para Ca^{2+} e Mg^{2+} ($32,67$ e $3,35 \text{ cmolc.dm}^{-3}$) os valores são considerados muito altos, e os valores de K^+ e P ($0,27 \text{ cmolc.dm}^{-3}$ e $36,50 \text{ mg.dm}^{-3}$) são considerados altos. Já para as áreas mais conservadas, os teores de P e K^+ ($1,35 \text{ mg.dm}^{-3}$ e $0,21 \text{ cmolc.dm}^{-3}$) foram considerados todos muito baixos.

A transformação de áreas florestais para culturas agrícolas representa mudanças drásticas nestes ecossistemas, provocando alterações nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (LIMA *et al.*, 2011), elevando a ocorrência de zonas heterogêneas (PARFITT *et al.*, 2009) e fazendo com que o sistema de amostragem desses atributos seja consideravelmente alterado (CAVALCANTE *et al.*, 2007), devendo-se, então, reconhecer o grau de variabilidade espacial das propriedades do solo para o aperfeiçoamento das tomadas de decisões na utilização dessas áreas (VIEIRA *et al.*, 2009).

Desse modo, pode-se considerar que a dinâmica do carbono, juntamente com os nutrientes minerais, é influenciada por fatores como clima, tipo de solo, cobertura vegetal e práticas de manejo (HAAG, 1985). A matéria orgânica do solo também é um componente

importante de sua fertilidade, especialmente em condições tropicais, contando com a ação microbiana para sua formação e mineralização; conseqüentemente, as práticas de manejo que favoreçam a manutenção do carbono no solo são importantes para a sustentabilidade dos agroecossistemas (KUWANO *et al.*, 2014).

Os atributos químicos do solo são responsáveis por fornecer nutrientes, reter elementos, compostos químicos benéficos e compostos nocivos, bem como aumentar o crescimento vegetal e a matéria orgânica, o pH e os nutrientes disponíveis, os quais são potencialmente utilizados para estabelecer os níveis de qualidade do solo (CARDOSO *et al.*, 2013).

Aquino *et al.* (2014), analisando os valores médios dos atributos químicos do solo em áreas de pastagem e floresta em suas respectivas profundidades, observaram que a área de pastagem apresentava maiores valores dos atributos químicos quando comparada à área de floresta, com exceção de P (4,6 mg.dm⁻³ em pastagem e 6,09 mg.dm⁻³ em floresta). Também afirmaram que o uso do solo com pastagem não trouxe nenhum prejuízo aos atributos químicos.

Dias-Filho (1998) observou que, em áreas com pastagem, o pH, a soma de bases, a CTC efetiva e a V% da camada superficial do solo permaneceram elevados, sugerindo que, evitando-se a erosão por meio do manejo adequado da pastagem, as perdas de cátions podem ser mínimas. Fernandes *et al.* (2013), avaliando os níveis de matéria orgânica em área desertificada revegetada com pinhão manso consorciado com gramíneas no sul do Piauí, obtiveram maiores valores de MO na camada de 0,0-0,10 m de profundidade (1,38%) na área de pinhão manso solteiro.

Leite *et al.* (2015), trabalhando no ano 2009 com a variabilidade espacial das frações da MO em área degradada no município de Gilbués, sul do Piauí, obteve valor médio de carbono orgânico total (COT) de 7,8 g.kg⁻¹ na camada de 0,0-0,05 m. Corado Neto *et al.* (2015a) também, trabalhando na mesma área no ano de 2010, observaram valores médios de COT (0,73 g.kg⁻¹) na mesma camada, significando menos de 10% do valor encontrado no estudo anterior –ambos os valores são considerados muito baixos.

Segundo Benett *et al.* (2011), o carbono orgânico é um dos principais atributos químicos para avaliar a qualidade do solo, e é correlacionado com a produtividade das culturas, além de ser, juntamente com o pH do solo e a capacidade de troca catiônica (CTC), os principais atributos químicos utilizados na avaliação da qualidade do solo (BRANCHER; ROZA-GOMES, 2012). Para Santos *et al.* (2010), o estudo dos atributos físicos e químicos do solo é de suma importância em áreas sujeitas a diferentes usos e práticas de manejo, uma vez

que o conhecimento desses dados podem possibilitar indicativos às melhores práticas de manejo a serem utilizadas em decorrência de suas respostas.

Em resumo, estudos que analisam os efeitos das atividades antrópicas sobre as propriedades do solo são recursos preciosos para avaliar ou prever danos ambientais, subsidiando o debate sobre a manutenção ou a ocupação racional dos ecossistemas, com previsões sobre a extensão dos efeitos desta ocupação (LONGO, 1999).

2.5 Sistemas de Informações Geográficas – SIGs

As transformações tecnológicas são propulsoras das mudanças vivenciadas no mundo moderno, influenciando as relações sociais, econômicas, agrícolas e de produção. Nas Ciências Agrárias, a popularização das geotecnologias, que se iniciou na década de 1980 e dura até os dias de hoje, contribui, sobremaneira, para modificar o modo de produzir conhecimentos (VIEIRA *et al.*, 2007).

Durigon (2011) ressalta que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas que permitem trabalhar com informações espaciais, integrando e sobrepondo vários tipos de informações. Rosendo e Rosa (2007) verificaram que a utilização de produtos e técnicas de sensoriamento remoto e SIG, nas análises ambientais, têm se tornado uma prática cada vez mais frequente entre as diversas áreas de pesquisa. No caso do uso da terra e da vegetação, essas técnicas contribuem para a agilidade, a eficiência e a confiabilidade das análises dos processos de degradação da vegetação natural, monitoramento dos recursos florestais, desenvolvimento de políticas de conservação, dentre diversos outros fatores (ROSENDO; ROSA, 2007).

Os SIGs são definidos como sistemas automatizados utilizados para armazenar, analisar e manipular dados georreferenciados, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para analisá-la (CÂMARA *et al.*, 1996). Os SIGs são, também, tecnologias que oferecem um novo caminho para juntar diferentes áreas do conhecimento, de forma que a interdisciplinaridade esteja presente nos estudos e no manejo dos recursos naturais (GONZALES, 2002).

Diante dessa interdisciplinaridade, esse conjunto instrumental se aplica a diversos campos profissionais, tornando-se imprescindível para projetos que lidam com questões voltadas à organização, ao planejamento e à gestão do espaço geográfico, ou que envolvam análises espaciais em seus estudos (FERREIRA *et al.*, 2011).

Desta forma, mesmo com uma grande funcionalidade, Silva (1999) ressalta que os SIGs não garantem um produto final de boa qualidade, com certeza e segurança necessárias, caso não houver controle de qualidade, e se as informações forem imprecisas e contiverem erros. O autor comenta, ainda, que os SIGs, juntamente com a geoestatística, especialmente a krigagem, como base estatística, seriam necessários para melhor análise, permitindo minimizar as incertezas na representação digital dos fenômenos que possam ser descritos espacialmente.

Goovaerts (1999) cita que as informações espaciais, especificamente sobre a espacialização da variabilidade dos solos, obtidas com técnicas da geoestatística, poderiam ser manejadas, tratadas e analisadas pelos sistemas de informações geográficas, possibilitando melhor entendimento da relação dependência-escala dos processos físicos.

2.6 Geoestatística

A geoestatística é uma ferramenta estatística usada para identificar e calcular a distribuição e o padrão espacial das características naturais estudadas, definindo modelos de semivariogramas que mostram a autocorrelação da variável em diferentes direções e distâncias (DALE *et al.*, 2002). Assim, permite que os dados analisados sejam interpretados de maneira detalhada com base no seu grau de dependência espacial e variabilidade natural, permitindo identificar a influência de cada um nas características do solo e da produção, possibilitando, também, alternativas de uso e manejo (SILVA NETO *et al.*, 2012).

Carvalho *et al.* (2003) referem que a heterogeneidade é uma propriedade inerente do solo em variar com a sua direção, sendo consequência de complexas interações dos fatores de sua formação (material de origem, relevo, organismo, clima e tempo). Além destes, os manejos do solo e da cultura (manejo, rotação de culturas, fertilizações, etc.), e os processos erosivos, são causas adicionais de variabilidade. Então, muitos atributos do solo não variam ao acaso, apresentando dependência espacial e/ou temporal (BERNER *et al.*, 2007).

De acordo com Landim (2006), a geoestatística calcula estimativas dentro de um fenômeno natural com distribuição no espaço e supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados, efetuando estimativas e/ou simulações de pontos intermediários não amostrados.

Portanto, a geoestatística torna-se uma ferramenta que favorece o estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo, uma vez que aborda a análise da teoria das variáveis locais. Este procedimento permite determinar se um atributo apresenta ou não

estrutura espacial e, uma vez conhecido o modelo da dependência espacial, é possível mapear a área estudada (CARVALHO *et al.*, 2011). Esta técnica é conhecida por krigagem, e permite a estimativa de valores de forma não tendenciosa e com variância mínima (GONÇALVES; FOLEGATTI; MATA, 2001).

A krigagem ordinária é o método de interpolação mais utilizado em geoestatística (PEREIRA *et al.*, 2013), e usa um estimador de interpolação linear imparcial e com variância mínima para garantir uma estimativa mais precisa dos dados (AQUINO *et al.*, 2012). Desta forma, Grego, Vieira e Xavier (2010) ressaltam que as construções de mapas com os valores obtidos por meio de krigagem são de suma importância para a análise, verificação e interpretação da variabilidade espacial dos atributos estudados.

No estudo da variabilidade espacial, o resultado é obtido pelo ajuste de um modelo estatístico denominado semivariograma, que estuda o grau de dependência espacial entre os pontos amostrais distribuídos em um esquema sistemático e referenciado de amostras (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Sendo assim, o semivariograma é um gráfico que relaciona a semivariância de uma variável qualquer com uma distância (EQUAÇÃO 1), dependendo, fundamentalmente, do número de pares de pontos encontrados em determinada direção, para diferentes distâncias (WEBSTER; OLIVER, 2001).

$$y(h) = \frac{1}{2} \{Var[Z(t) - (z(t+h))]\}$$

Os semivariogramas (FIGURA 1) apresentam três importantes parâmetros: a distância $X(h)$, a partir da qual $Y(h)$ se torna constante, é denominada alcance (a). O alcance é o valor limite estabelecido no qual existe dependência espacial. Entretanto, em distâncias superiores ao alcance não existe semelhança entre os pontos, e as variações são totalmente ao acaso. O valor de $Y(h)$, em que h se torna constante, é chamado de patamar ($C_0 + C_1$), enquanto que a variabilidade dos dados, na distância em que foi amostrada, é denominada efeito pepita (C_0); portanto, quanto menor for a distância, menor será o efeito pepita.

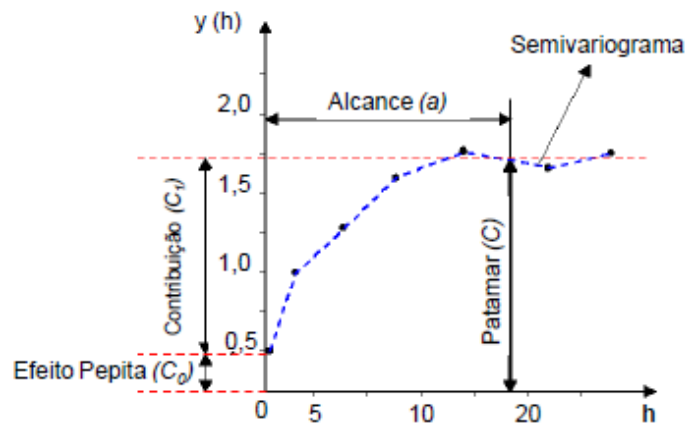


Figura 1 – Parâmetros do ajuste do modelo de semivariograma

Fonte: Oliveira *et al.* (2015).

A função do semivariograma é calcular valores em determinada distância, necessários para o sistema de equações de krigagem expressar a dependência espacial entre as amostras, uma vez que o semivariograma cruzado possibilita avaliar o grau de semelhança de duas variáveis no espaço. O semivariograma, ou semivariograma cruzado, das variáveis também pode usar a krigagem ou a cokrigagem para delinear a disposição e o espaçamento das amostras no campo e, assim, obter um valor prefixado da variância da estimativa (VIEIRA; CARVALHO; GONZALEZ, 2010).

O semivariograma pode assumir diferentes modelos ajustados com diferentes formas, dependendo do conjunto de dados e do espaçamento da amostragem. Existe uma infinidade de funções que se ajustam aos semivariogramas experimentais, porém, a prática tem mostrado que alguns modelos, fundamentados nas suposições teóricas das variáveis regionalizadas de Matheron, têm satisfeito a maioria das suas aplicações. Estes modelos podem ser classificados em modelos com patamar e sem patamar. Entre os com patamar, os principais são: (i) modelo esférico, que é o modelo mais comum da geoestatística e apresenta uma estrutura de dependência espacial que aumenta com a distância até certo ponto (alcance), a partir do qual a semivariância se torna constante; (ii) modelo exponencial, parecido com o esférico, diferindo por atingir o patamar assintoticamente; e, (iii) modelo gaussiano, utilizado para fenômenos extremamente dependentes espacialmente (ANDRIOTTI, 2003).

Consoante Corá e Beraldo (2006), o resultado da análise geoestatística é dependente da intensidade amostral e do formato da grade de amostragem, enquanto que a precisão dos mapas é dependente do método de interpolação utilizado e da qualidade do ajuste do semivariograma na estimativa dos valores em locais não amostrados e da variabilidade local.

Portanto, quando um atributo do solo varia de um lugar para outro com algum grau de continuidade, a geoestatística é a ferramenta que deve ser utilizada, pois permite uma visão com base na dependência espacial, o que é útil para o planejamento adequado do manejo do solo (SOUZA; MARQUES JUNIOR; PEREIRA, 2009).

2.7 Variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo

Na área da ciência do solo, o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo tem como finalidade obter informações que permitam melhor entendimento dos processos que levam à produção, o que possibilita melhoria nas tomadas de decisões sobre o manejo para corrigir os problemas nas práticas agrícolas (TSEGAYE; HILL, 1998).

Para Lima e Silans (1999), mesmo os solos com aparência homogênea apresentam considerável variabilidade, no espaço, de suas propriedades. Desta forma, o conhecimento da variabilidade das propriedades do solo é essencial para produzir seguras interpretações, com o objetivo de produzir eficientes predições do seu desempenho em locais específicos (OVALLES; COLLINS, 1988), uma vez que a variabilidade espacial do solo pode vir a ser um dos maiores fatores adversos em experimentos de campo, os quais envolvem muitos pontos ou muitos tratamentos sob áreas que raramente são uniformes. Neste caso, a heterogeneidade pode propiciar baixa eficiência na completa aleatoriedade dos pontos na área (MULLA; BHATTI; KUNKEL, 1990).

A intensificação do uso das técnicas de geoestatística nas ciências do solo ocorre porque se assumiu que a distribuição espacial de pontos de observação apresenta correlação, ou seja, existe dependência espacial (WEBSTER, 1985). Esta pressuposição não é assumida na estatística clássica, que ignora as consequências da heterogeneidade espacial sobre a representatividade dos valores médios de amostras (CARVALHO *et al.*, 2008), assumindo que os pontos de observação são independentes, o que, na maioria dos casos, não acontece nos estudos envolvendo as ciências da terra (WEBSTER, 1985). Portanto, essas análises têm sido substituídas por análises espaciais, as quais consideram as correlações entre observações vizinhas (GONÇALVES; FOLEGATTI; MATA, 2001).

Nos estudos que visam identificar o comportamento de áreas degradadas, cada vez mais têm sido utilizadas variáveis físicas, químicas e biológicas do solo, e da planta, bem como a correlação com o manejo aplicado, com o intuito de identificar, localizar e mapear as heterogeneidades destas áreas. Neste sentido, o uso da geoestatística tem como finalidade

estudar a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo, assim como o rendimento das culturas nessas áreas (LIMA *et al.*, 2007).

Estudos têm demonstrado a relação da variabilidade espacial de áreas degradadas sob diferentes manejos com os atributos do solo e da planta, tais como: atributos físicos do solo (SANTOS, 2010; LIMA *et al.*, 2015; GUIMARÃES *et al.*, 2016; SOARES *et al.*, 2018), estabilidade de agregados, carbono orgânico e matéria orgânica do solo (FERNANDES *et al.*, 2013; CORADO NETO *et al.*, 2015a; LEITE *et al.*, 2015), densidade do solo e resistência à penetração (LEMOS FILHO *et al.*, 2008; GREGO; VIEIRA; XAVIER, 2010; CORADO NETO *et al.*, 2015b) e atributos químicos do solo (BRANCO *et al.*, 2013; SILVA, 2012). Basicamente, todos utilizam a geoestatística como uma ferramenta para tal propósito, permitindo, assim, detectar e modelar os padrões de dependência espacial dos atributos no espaço, possibilitando melhor avaliação.

Wendling *et al.* (2005) ressaltam que o uso, o manejo, o nível e o tempo de utilização do solo promovem alterações nas suas propriedades, destacando-se, em especial, a estrutura que está relacionada com a agregação e que, na maioria dos casos, o uso intensivo do solo causa redução da estabilidade dos agregados, deixando-os mais suscetíveis aos processos erosivos. Loss *et al.* (2009) também afirmaram que o manejo, o uso e o tempo de utilização do solo promovem diversas alterações em suas propriedades, dentre elas a agregação, que está relacionada à estrutura do solo.

Sanchez *et al.* (2005) aplicaram a geoestatística sobre dados físico-químicos de solos e dados da produtividade de café em duas superfícies geomórficas, em área plana e encosta, com uma malha de coleta de 50 m x 50 m. Os dados de argila, matéria orgânica, CTC, saturação por bases e pH da segunda superfície apresentaram efeito pepita puro, ou seja, ausência de dependência espacial. Para os demais atributos, eles classificaram os diferentes graus de dependência espacial em fraca, média e forte, segundo escala de Cambardella *et al.* (1994).

A geoestatística, portanto, é capaz de representar a variabilidade contínua de atributos físicos, químicos e morfológicos de solos. No entanto, pode determinar a variabilidade dos atributos por meio de amostragem e realização do processamento adequado dos resultados utilizando ferramentas de análise, como a geoestatística, que permite estabelecer distâncias ideais para a coleta de amostras com ou sem dependência espacial e a dependência entre duas ou mais variáveis, levando à redução dos custos de amostragem (MARTINS; MOURA; CAMACHO-TAMAYO, 2011).

Assim sendo, o resultado da análise geoestatística é dependente da densidade da amostragem e do formato da grade de amostragem. Ainda, a precisão dos mapas é dependente do método de interpolação utilizado e da qualidade do ajuste de semivariograma na estimativa dos valores em locais não amostrados, bem como da variabilidade local (CORÁ; BERALDO, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

A área experimental está localizada no município de Gilbués-PI, na microbacia do riacho Sucuruíú, próximo às cabeceiras dos rios Gurguéia, Uruçuí-Vermelho e Parnaíba. Está inserida na área dos Chapadões do Alto Médio Parnaíba, que constituem chapadas com altitudes decrescentes de sul para norte, variando entre 700 e 300 metros (SILVA, 2011).

O estudo foi realizado em uma área cedida à Embrapa Meio-Norte (09° 51' 15" S; 45° 21' 55" W, altitude de 428 m), instalada em novembro de 2009, na Comunidade Vaqueta, localizada à direita da BR 135, sentido Gilbués – Corrente, distando 6 km da sede do município. A área selecionada está inserida em um relevo cuja declividade máxima, no sentido da pendente, é de, aproximadamente, 5%, bem característica da região, conhecida como área de “malhada”. A área, também, é margeada em suas laterais por duas grandes voçorocas, atingindo profundidades maiores que seis metros (FIGURA 2).

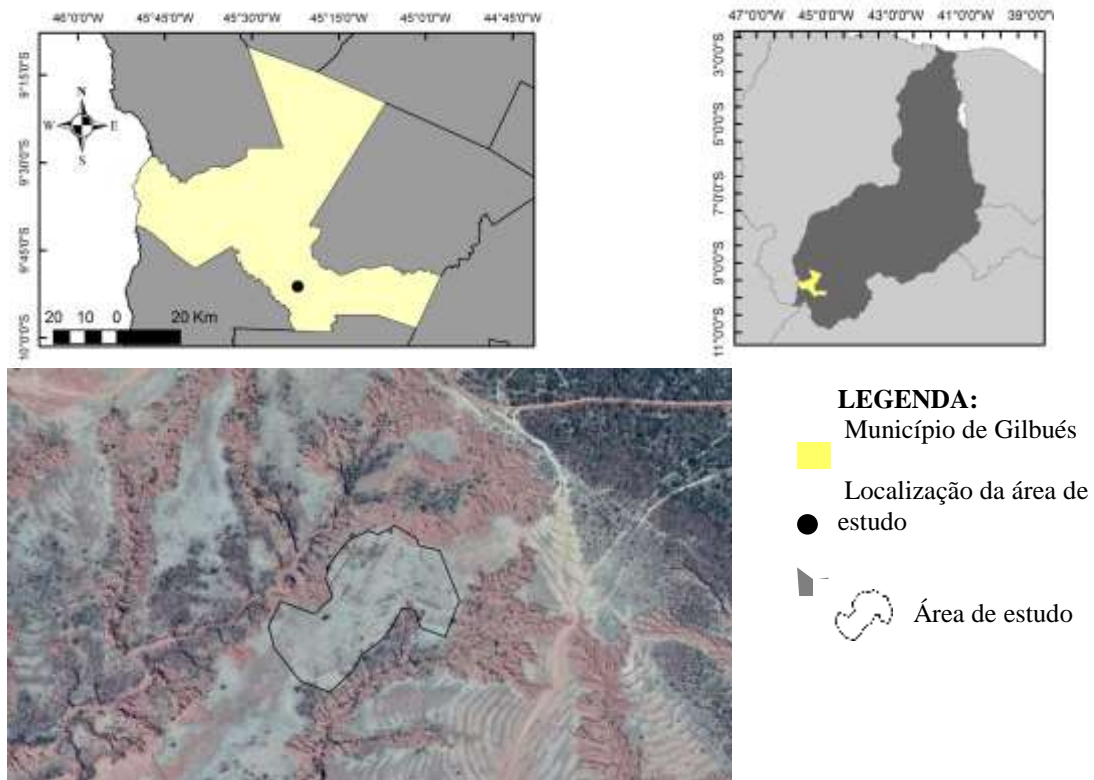


Figura 2 – Mapa de localização e imagem de satélite da área experimental da Embrapa Meio-Norte, no município de Gilbués, PI

O solo foi classificado como Neossolo Litólico eutrófico típico, substrato folhelhos da Formação Poti (FIGURA 3), com argilas expansíveis 2:1 e com altos teores de areia e silte, o que, associado às elevadas intensidades eventuais de precipitações pluviais e baixa cobertura vegetal, o torna muito vulnerável à erosão hídrica. O clima da região, de acordo com a classificação de Koppen, é do tipo Aw, megatérmico (Tropical Chuvoso), com moderada deficiência hídrica no inverno. A temperatura oscila entre a mínima de 25°C e a máxima de 35°C, e o mês mais frio apresenta média superior a 18°C. A precipitação média anual varia de 800 a 1.200 mm. O período chuvoso se estende de outubro a maio, sendo os meses mais chuvosos os de novembro a março (VIEIRA *et al.*, 2007).

As características climáticas da região de Gilbués/PI são definidas pela irregularidade das precipitações pluviométricas, havendo dias de precipitações pluviométricas intensas intercaladas com períodos curtos de estiagem. Esses períodos de estiagem são conhecidos como “veranicos”, que podem variar de 5 a 20 dias (ASSAD, 2001).

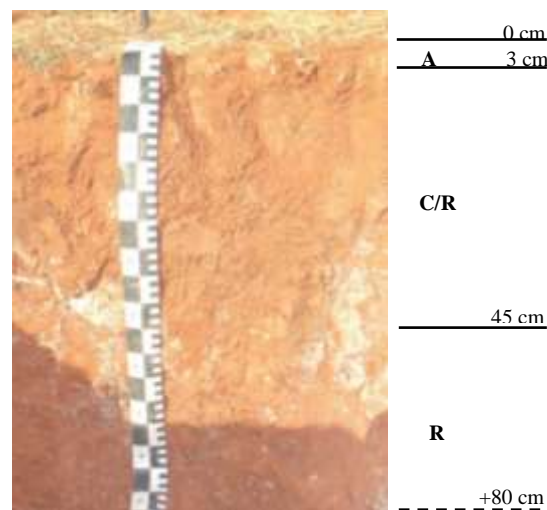


Figura 3 – Perfil do Neossolo Litólico Eutrófico típico, presente na área de teste, comunidade Vaqueta, Gilbués, PI. Coordenadas (9° 51' 17" S e 45° 22' 02" W)

A área total do experimento (FIGURA 2) possuía, aproximadamente, quatro hectares, a qual foi dividida em quatro subáreas com aproximadamente um hectare cada, plantadas com pinhão manso consorciado com gramíneas da seguinte forma: A1 – pinhão manso mais capim nativo (*Andropogon fastigiatus* SW); A2 – pinhão manso mais *Brachiaria decumbens*; A3 – pinhão manso mais *Brachiaria brizantha*, cultivar Piatã; e, A4 – pinhão manso mais capim andropogon (*Andropogon gayanus* L.). Essa área experimental foi utilizada, anteriormente,

para o pastejo extensivo, com destaque para a bovinocultura de corte, especialmente no período chuvoso.

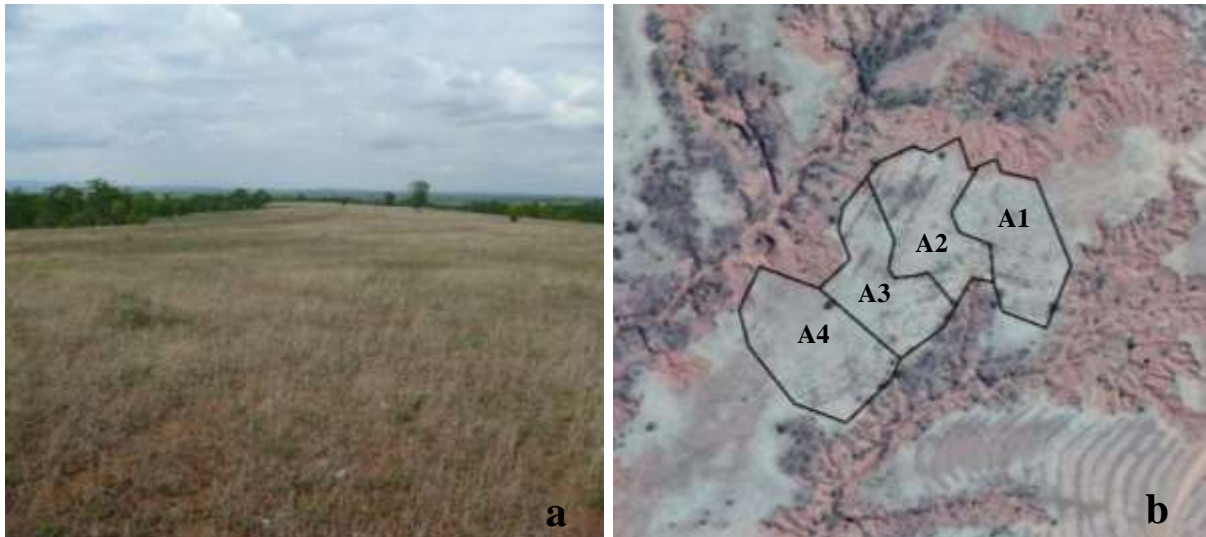


Figura 4 – Aspecto geral da área de estudo antes da implantação do experimento (a) e área de estudo com suas divisões em função dos tratamentos utilizados (b)

Antes do plantio do pinhão manso e das gramíneas, fez-se um levantamento planialtimétrico da área. Em função do maior valor da declividade do terreno e a textura do solo, estimou-se o espaçamento para construção dos terraços, segundo a metodologia de Paraná (1994), citada por Pruski *et al.* (2005). Em seguida, fez-se a construção dos terraços em nível e, posteriormente, o sulcamento da área, obedecendo às curvas de níveis dos terraços, com um metro entre sulcos e profundidade média de 0,10 m, aproximadamente, que foram posteriormente utilizados para os plantios do pinhão manso e sementeiras das gramíneas (FIGURA 5).



Figura 5 – Imagens do preparo da área com a construção dos terraços (a) e sulcamento (b)

As mudas de pinhão manso para a implantação do trabalho foram feitas utilizando a infraestrutura do viveiro da Embrapa Meio-Norte, localizado na cidade de Teresina, PI. O plantio do pinhão manso foi realizado em filas simples utilizando espaçamento de 4,0 x 3,0 m, com uma população de 833 plantas por hectare, em ambas as áreas. Já as gramíneas foram plantadas de forma linear em todos os sulcos feitos.

As adubações do solo na área experimental foram realizadas com base na análise de fertilidade do solo considerando a profundidade de 0-0,20 m (TABELA 1). Utilizou-se a recomendação de adubação para a cultura da mamona para a aplicação de fertilizantes na área com pinhão manso, enquanto as gramíneas receberam adubação de acordo com Sousa e Lobato (2004) e Martha Júnior e Vilela (2007).

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo da área experimental nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m

Camadas	MO	pH	P	K	Ca	Mg	Na	Al	H+Al	S	CTC	Areia total	Silte	Argila
m	g/kg	H ₂ O	mg.dm ⁻³										g.kg ⁻³	
								Cmolc.dm ⁻³						
0,00-0,20	6,9	7,7	131,20	0,25	30,1	3,5	0,2	0,0	0,0	34,1	34,1	519,5	389,5	91,00
0,20-0,40	6,4	8,1	39,65	0,14	31,4	2,8	0,4	0,0	0,0	34,8	34,8	609,5	312,0	78,50

Os tratos culturais e fitossanitários foram realizados sempre que houve necessidade durante o período de condução do experimento. As ervas daninhas foram controladas por roço mecanizado, seguido de pequenos coroamentos feitos com enxadas nas plantas do pinhão manso, especialmente, nos primeiros seis meses.

3.2 A amostragem do solo

A amostragem do solo foi realizada de novembro de 2010 a março de 2013. Em novembro de 2010, foi implantado um *grid* em malha regular de 30 x 30 m e uma transecção com cerca de 150 m de comprimento, no centro da área, com pontos espaçados a cada cinco metros. Dessa forma, a malha experimental constituiu-se de 80 pontos, obedecendo as seguintes disposições no campo: os pontos de 1 ao 21 apresentam espaçamento de 30 x 30 m; do 22 ao 52, distanciados 5 m; do 52 ao 53, com 15 m de espaçamento entre si; e, do 54 ao 80, espaçados a cada 30 m.

Informa-se que quatro pontos da malha amostral foram eliminados por terem apresentado valores discrepantes em relação aos demais amostrados para o ano de 2010. Assim, analisou-se o resultado de uma malha amostral com a mesma quantidade de pontos, onde procedeu-se a retirada dos referidos da malha amostral do ano de 2012. Desta forma, tanto para a análise da estatística descritiva como da geoestatística, os pontos retirados não foram considerados, ficando, então, um total de 76 pontos amostrais analisados.

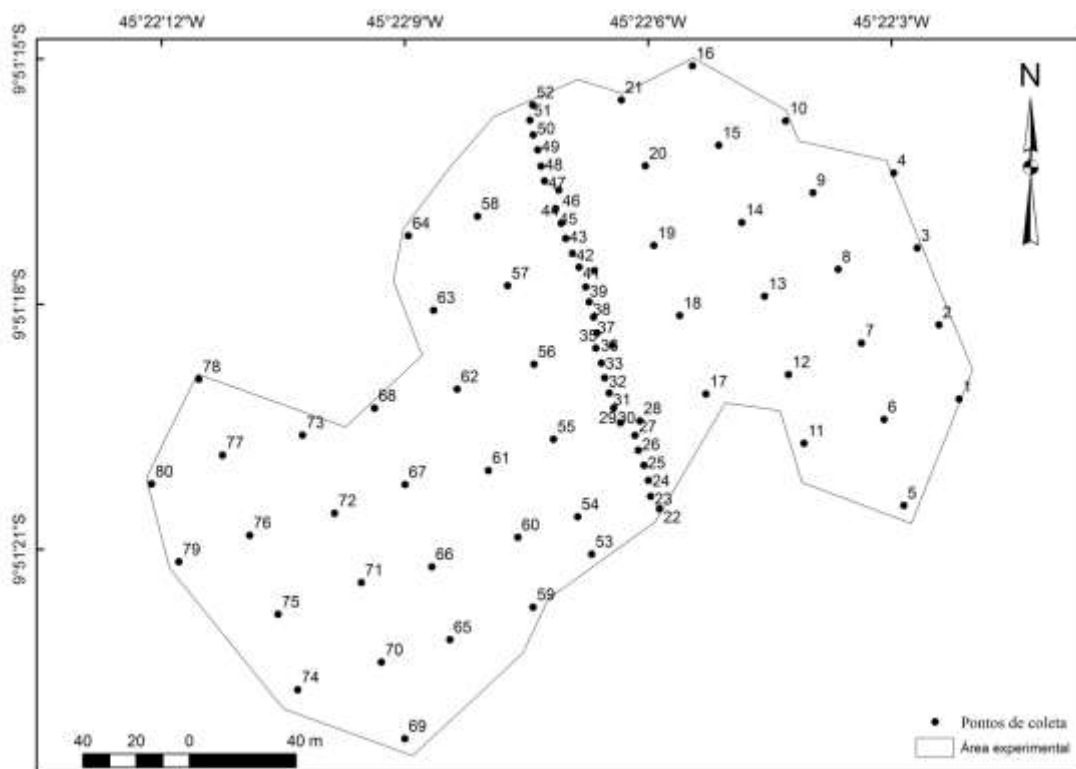


Figura 6 – Área amostral, com *grids* em malha regular e transecção, contendo 80 pontos amostrais, na comunidade de Vaqueta, em Gilbués, PI

3.3 Análises físicas

Para a amostragem das análises físicas do solo, foi aberta uma mini trincheira em cada ponto de coleta com cerca de 0,30 m de comprimento, 0,30 m de largura e 0,20 m de profundidade. As amostras de solo deformadas foram coletadas utilizando-se uma espátula de metal, nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, a fim de se determinar o diâmetro médio geométrico – DMG (mm), diâmetro médio ponderado – DMP (mm) e o índice de estabilidade dos agregados – IEA (%). Após a coleta, as amostras foram identificadas e armazenadas em sacos plásticos e, posteriormente, levadas ao Laboratório de Física do Solo (LFS), do Centro de Ciências Agrárias (CCA), da Universidade Federal do Piauí, em Teresina, PI, onde foram analisadas.

As amostras foram destorroadas e passadas em peneira de 9,51 mm de diâmetro de malha, retidas na peneira de 4,76 mm e secadas à sombra para as análises relativas à estabilidade de agregados. Posteriormente, procedeu-se à distribuição das classes de agregados por meio do tamisamento a úmido, utilizando-se peneiras de 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, sendo o tamisador de oscilação com amplitude de 4-5 cm e uma frequência de 30 vezes por minuto. Os valores obtidos nos peneiramentos foram usados para o cálculo do diâmetro médio ponderado (DMP), do diâmetro médio geométrico (DMG) e do índice de estabilidade de agregados (IEA). Para obter o DMP, DMG e o IEA, foram utilizadas as seguintes equações, segundo indicado por Castro Filho, Muzilli e Podanoschi (1998):

$$DMP = \sum_{i=1}^n X_i \cdot w_i$$

Em que:

w_i = proporção em massa de cada classe em relação ao total; e,

x_i = diâmetro médio das classes (mm).

$$DMG = \left(\exp \sum_{i=1}^n (w_p \cdot \log x_i) \right) / \left(\sum_{i=1}^n w_i \right)$$

Em que:

w_p = massa dos agregados de cada classe (g).

$$IEA = 100[(a - wp_{0,25} - areia) \div (a - areia)]$$

Em que:

a = massa do agregado seca a 105°C (g); e,

$wp_{0,25}$ = massa dos agregados da classe 0,25 mm (g).

Para a caracterização físico-hídrica do solo, foram realizadas as seguintes determinações: umidade volumétrica em solo saturado e não saturado ($\text{cm}^{-3} \text{cm}^{-3}$), densidade do solo (D_s) (g cm^{-3}), água disponível (A_d) (mm), macroporosidade, microporosidade e porosidade total (PT) nos 80 pontos da área, em que a D_s determinada nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m e as demais análises na camada de 0,0-0,20 m.

Para a determinação da densidade do solo – D_s (g cm^{-3}), da umidade volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^3$), da água disponível – A_d (mm) e da porosidade (PT) (macroporosidade e microporosidade) (%), foram coletadas amostras indeformadas de solo utilizando um extrator do tipo Uhland e anéis volumétricos com dimensões aproximadas de 2,5 cm de altura e 5 cm de diâmetro. Contudo, todos os anéis foram medidos em três repetições, utilizando um paquímetro digital.

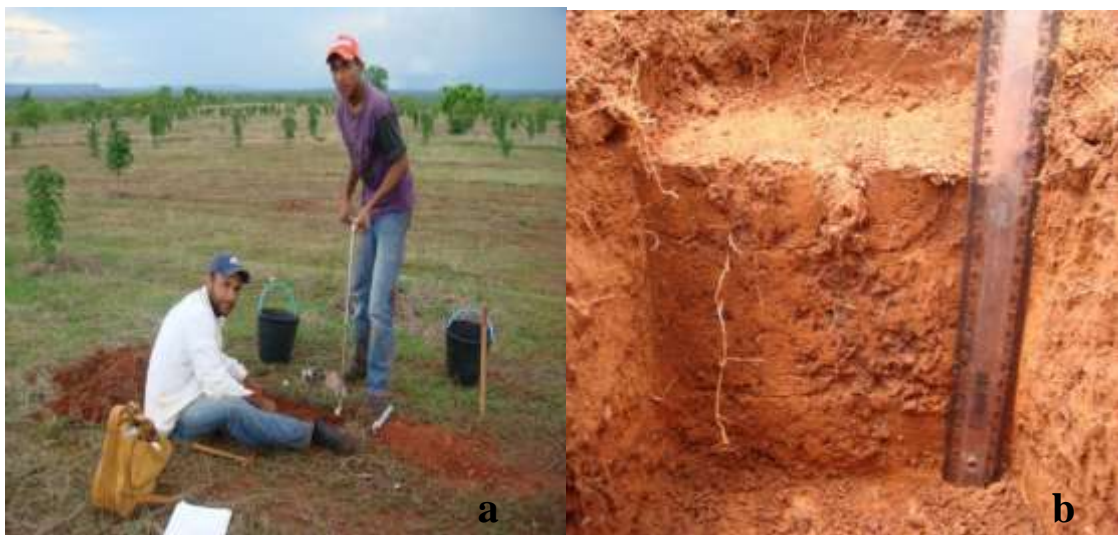


Figura 7 – Amostragem do solo na área experimental (a) e mini trincheira para coleta de amostras indeformadas (b), na comunidade de Vaqueta, Gilbués, PI

3.4 Análises químicas

Para a análise da fertilidade do solo, foram coletadas cinco amostras simples por ponto, com um trado tipo holandês, formando uma amostra composta nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em novembro de 2009 e em novembro de 2012. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em peneira com malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA). As análises foram realizadas no Laboratório de Fertilidade do Solo da Embrapa Meio-Norte em Parnaíba – PI, de acordo com a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

As análises químicas compreenderam análises do complexo sortivo (pH em água, P, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} e H+Al). Desta forma, por meio dos métodos descritos pela EMBRAPA (1997), foi determinado o pH em água na suspensão solo-solução 1:2,5. Também, foram obtidos os teores de Na^+ , K^+ trocáveis e P disponível por meio do uso de extrator “Mehlich 1”, sendo o fósforo determinado por espectroscopia e o sódio e potássio por fotometria de emissão de chama. A acidez trocável (Al^{3+} e H^+) foi obtida com uso do extrator acetato de cálcio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ com pH ajustado para 7,0, e a determinação dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} , feita com uso do extrator KCl 1 mol L^{-1} . Obtidos os teores destes elementos das amostras de solo, foram calculados os valores de soma de bases ($S = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K}$), a capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva ($T = \text{H} + \text{Al} + S$) e o valor de saturação por bases ($V\% = S / T \times 100$).

3.5 Análise das plantas

Para a cultura do pinhão manso, foram avaliadas as seguintes características: diâmetro de caule (mm); altura da planta (m); diâmetro da copa (m); e, produtividade. As medidas de diâmetro de caule foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital com quatro medidas por planta. Para a altura da planta, utilizou-se uma régua graduada, sendo a medição para altura realizada da superfície do solo ao ápice do galho mais alto da planta. Para o diâmetro de copa, utilizou-se uma fita métrica graduada, tomando-se duas medidas, nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste, por plantas. Para tanto, foram consideradas 30 plantas por área de teste, distribuídas de maneira uniforme em cada área, o que totalizou 120 plantas em todo o teste.

Na avaliação da produtividade de produção do pinhão manso, foram analisados o número de frutos por planta (NFPP) e o peso seco de frutos por planta (PSFPP), em gramas

(g). Após os frutos serem secos em estufa de circulação de ar à temperatura de 65°C, durante 72 horas, determinou-se o peso seco de casca (PSC) e o peso seco de sementes (PSS), em gramas, e que, posteriormente, foram transformados em produtividade (kg ha^{-1}).

O acúmulo de forragem foi medido cortando e pesando o material contido em um quadro de metal com área de 0,25 m², em dez pontos por área, realizando o corte a 10 cm acima do solo no capim nativo (C.N), a 20 cm do solo para as *Brachiarias decumbens* e *brizantha* cv Piatã (B.D e B. P), e 40 cm do solo para capim *Andropogon* (C.A). Após o corte, o material era pesado e se retirava uma sub-amostra representativa para posterior análise. Após a separação, o material era levado à estufa de circulação de ar a 65°C até atingir peso constante, sendo pesado novamente para determinação do seu peso seco.

A altura das espécies consorciadas foi avaliada com auxílio de trena graduada, medindo-se dez plantas por parcela antes de cada manejo. A medição foi realizada da superfície do solo ao ápice da planta.

3.6 Análise dos dados

Com os resultados obtidos da caracterização dos solos, foi realizada a sistematização das informações coletadas para posterior análise, utilizando-se técnicas da geoestatística que permitiram analisar espacialmente o comportamento dos atributos do solo, obtendo-se como produto o mapeamento da distribuição espacial de seus valores. Desta forma, realizou-se a análise descritiva e exploratória dos dados com o intuito de confirmar seu ajuste na distribuição normal e para verificar a presença de valores extremos, candidatos a *outliers*.

Os dados foram analisados pela estatística descritiva e também foram calculados: valor mínimo, valor máximo, média, desvio padrão, e os coeficientes de variação (CV%), assimetria e curtose. O grau de variabilidade das variáveis na área de estudo foi classificado por meio do coeficiente de variação (CV%), de acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), que considera: variabilidade baixa, para CV menor que 12%; variabilidade média, para CV entre 12 e 62%; e, variabilidade alta, para CV maior que 62%.

Confirmando a normalidade dos dados, a ausência de valores extremos e as condições de estacionariedade, o semivariograma foi gerado considerando a isotropia dos dados utilizando o *software* GS+ versão 10 (ROBERTSON, 2008). Os dados sem tendência e que apresentaram estabilidade média foram submetidos ao ajuste de modelos esféricos, exponenciais ou gaussianos, conforme as equações 4, 5 e 6 (CORADO NETO *et al.*, 2015a).

Modelo esférico:

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

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

Modelo exponencial:

$$y(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3(h/a))] \quad 0 < h < a$$

Modelo gaussiano:

$$y(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3(h/a)^2)] \quad 0 < h < d$$

O ajuste do modelo de semivariograma escalonado possibilitou definir os seguintes parâmetros: efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$), alcance (a) e índice de dependência espacial (IDE). O efeito pepita é o valor da semivariância para distância zero, e representa o componente da variação ao acaso; o patamar é o valor da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante; e, o alcance é a distância da origem até onde o patamar atinge valores estáveis, expressando a distância além da qual as amostras não são correlacionadas (VIEIRA *et al.*, 1983). O grau de dependência espacial (GDE) foi calculado pela relação $[(C-C_0)/C]*100$.

Na análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella *et al.* (1994), em que: valores de GDE menores que 25% são considerados dependência espacial fraca; valores entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada; e, valores maiores que 75% determinam dependência espacial forte.

A escolha dos modelos teóricos foi realizada observando-se a soma do quadrado dos resíduos (SQR), o coeficiente de determinação (R^2) e, posteriormente, o coeficiente de correlação obtido pela técnica da validação cruzada. Por meio da escolha destes modelos, foi feita a predição de cada atributo em zonas não amostradas mediante krigagem, representados em mapas de contorno utilizando o *software* ArcGis 10.1.

Desta forma, foram obtidos os mapas dos atributos: potencial hidrogeniônico (pH), fósforo (P), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), alumínio (Al^{3+}),

acidez potencial (H+Al), soma por bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases trocáveis (V), matéria orgânica (MO), densidade do solo (Ds), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), água disponível (Ad), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi) e porosidade total (PT).

Para os casos em que tanto a variografia dos valores originais dos atributos, como a variografia do resíduo não forneceram parâmetros enquadrados dentro dos critérios acima escolhidos, optou-se pela interpolação com inverso da distância (IDW). Ressalta-se que foi limitante a utilização deste processo de interpolação, porém, justificável em decorrência de que a metodologia necessitou dos mapas de cada atributo.

Os dados obtidos nas análises feitas nas plantas de pinhão manso (produtividade, altura de planta, diâmetro de caule e copa) foram comparados individualmente por meio de análises de Regressão. Nas gramíneas (produtividade de matéria verde, matéria seca e altura de plantas) foi realizado o teste “t” pareado e as médias estudadas foram comparadas utilizando-se a Análise de Variância de uma via e o teste de Tukey a 0,05 de probabilidade. Os procedimentos estatísticos foram realizados com auxílio do IBM SPSS *Statistics* 20 para teste.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação biométrica e produtividade do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.)

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios para a altura das plantas de pinhão manso em um período de 1.020 dias de avaliação. Observa-se que no primeiro ano (390 DAT), os efeitos dos testes ainda não podem ser evidenciados em função das culturas consorciadas estarem em início de desenvolvimento, não afetando a altura de plantas de pinhão manso. O aumento da altura das plantas de pinhão manso demonstra que os tratamentos não competiram com o pinhão manso, não afetando o seu desenvolvimento por água, luz e nutrientes, o que permite inferir a possibilidade de consorciar com todas as gramíneas estudadas (SILVA, 2011).

Verifica-se que as plantas de pinhão manso apresentam o maior crescimento até os 390 dias após transplântio (DAT), onde, em média, cresceram 105 cm em 12 meses. Observa-se, também, que o consórcio em que o pinhão apresentou o maior crescimento foi o com capim nativo, com 107,5 cm nos primeiros 12 meses. Os consórcios com *B. decumbens* e *C. Andropogon* apresentaram praticamente o mesmo crescimento, com 105,8 e 105,7 cm respectivamente, para o mesmo período. O consórcio com *B. brizantha*-Piatã foi o que apresentou o menor crescimento, com 100,1 cm.

Os resultados obtidos nos primeiros 12 meses estão, em média, 250% (139,3 cm) acima dos valores encontrados por Souto *et al.* (2017) que, em seu trabalho de restauração em área de caatinga no Seridó da Paraíba, obtiveram incremento médio, em 12 meses, de 42,27 cm. Já Horschutz *et al.* (2012) constataram que as plantas de pinhão manso em sequeiro, nas condições de Rio Verde, GO, obtiveram um crescimento médio de 192,76 cm aos 420 DAT.

Observa-se que, nos anos de 2011 e 2012, os incrementos na altura foram de 42,8 e 39,1 cm, respectivamente, resultados que ficaram mais próximos dos encontrados por Souto *et al.* (2017). De acordo com Saturnino *et al.* (2005), o pinhão manso é um arbusto grande e de crescimento rápido, cuja altura normal é de dois a três metros, podendo, porém, alcançar até cinco metros em condições especiais, como com o uso da irrigação e adubação corretas. Observa-se que os resultados obtidos até os 390 DAT estão dentro do padrão normal de crescimento da cultura. Laviola e Dias (2008) comentam que, para facilitar a colheita, quando em plantas adultas, a altura média das plantas não deve ultrapassar dois metros, fato que ocorreu com as plantas da área em todos os consórcios realizados.

Ainda consoante Laviola e Dias (2008), o crescimento vigoroso do pinhão manso não é uma característica desejada, uma vez que pode ocorrer queda de produtividade em razão da demanda de nutrientes pelas partes vegetativas e auto sombreamento, e, também, dificultar a execução dos tratos culturais e fitossanitários, além das operações de colheita.

Quanto ao crescimento das plantas, verifica-se que os períodos que correspondem aos intervalos dos 120 aos 210 DAT, dos 480 aos 570 DAT e dos 840 aos 930 DAT equivalem aos períodos de menor disponibilidade hídrica na região para os anos de 2010, 2011 e 2012, respectivamente. Desta forma, verifica-se que a altura média das plantas de pinhão manso foi crescente até o início de cada período que corresponde ao mês de maio para cada ano, praticamente final do período chuvoso na região. A partir deste, ocorreu uma diminuição ou completa paralisação no crescimento médio das plantas face a escassez hídrica no solo, resultante da não ocorrência de eventos pluviométricos no período de maio a setembro dos anos de 2010, 2011 e 2012 na região. Santos (2008), avaliando a altura de pinhão manso em duas estações do ano (seca e chuvosa), concluiu que os períodos em que a espécie apresentou um crescimento tardio correspondiam ao das estações secas, comportamento observado nos três anos de estudo do presente trabalho.

O incremento médio total em altura do pinhão manso foi de 209,7 cm (FIGURA 8) para os quatro testes realizados. O maior incremento médio ocorreu no mês de janeiro de 2011, com valores de 67,6 e 67,4 cm para o consórcio de pinhão com *Andropogon* e *B. decumbens*, respectivamente. O consórcio de pinhão mais *B. brizantha*-Piatã foi o que teve o segundo maior incremento médio, também para o mês de janeiro de 2013, de 50 cm.

Tabela 2 – Altura de plantas (cm) de pinhão manso cultivado em área degradada consorciado com diferentes gramíneas em Gilbués, PI

Gram.	Altura de Planta (cm)												
	30	120	210	300	390	480	570	660	750	840	930	1020	1110
	(DAT)												
Médias													
C.N	31,7	95,2	98,3	115	139	149,8	149,9	160,3	175,9	186,0	186,3	186,3	217,6
B.D	30,1	97,6	98,3	1	135,9	151,5	151,5	157,0	178,0	187,5	187,4	187,4	220,2
B.P	32,5	98,8	99,2	111,1	132,5	148,0	148,8	154,2	181,2	192,5	192,7	192,7	221,8
C.A	32,4	100,0	100,5	113,7	138,1	150,9	150,9	158,2	181,8	191,4	191,4	191,4	213,7
Intervalo de confiança da Regressão				R ²									
	95% inf.	95% sup.	Média										
C.N	0,106	0,165	0,136	0,902									
B.D	0,107	0,168	0,138	0,901									
B.P	0,115	0,170	0,142	0,922									
C.A	0,107	0,166	0,137	0,903									

DAT: dias após transplântio; C.N: capim nativo; B.D: *Brachiaria decumbens*; B.P: *Brachiaria brizantha* cv Piatã; C.A: capim *Andropogon*; Gram.: gramíneas; inf.: inferior; sup.: superior.

Nos meses de julho de 2011 e 2012 (570 e 930 DAT), foram detectadas as menores taxas de incremento, com valores zerados para ambos os anos. Segundo Singh *et al.* (2013), o pinhão manso tem seu desenvolvimento vegetativo afetado em áreas propensas à seca, requerendo que seja realizada a reposição de água nos períodos mais secos do ano para que, assim, possa otimizar seu desenvolvimento e sua produtividade.

Geralmente, os incrementos são mínimos, na casa dos centímetros. Entretanto, os maiores acréscimos na altura foram observados nos trimestres correspondentes aos meses de novembro, dezembro e janeiro (120, 390, 750 e 1110 DAT) de cada ano, correspondente ao período chuvoso, evidenciando que o pinhão manso tem taxa de crescimento relativo superior quando submetido a condições de disponibilidade hídrica adequada (LAIME *et al.*, 2009).

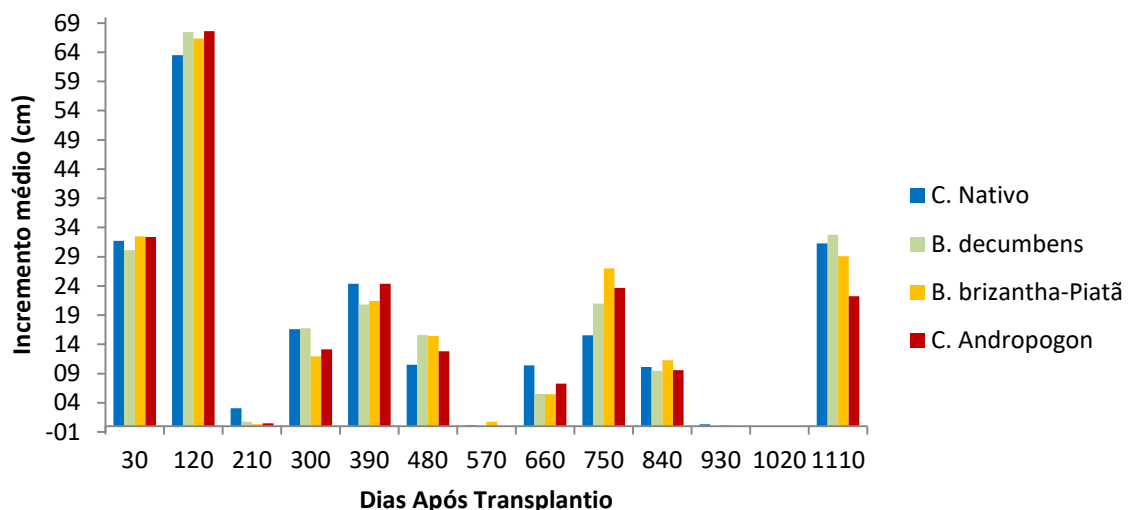


Figura 8 – Incremento médio em altura de plantas de pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI

Albuquerque *et al.* (2009), avaliando o crescimento inicial do pinhão manso em condições de sequeiro, observaram uma altura média de planta de 91,6 cm, aos 210 dias após emergência, confirmando que, apesar de ser relativamente tolerante à seca, a disponibilidade hídrica é um fator limitante para o crescimento e desenvolvimento do pinhão manso. Santos *et al.* (2010) identificaram que o pinhão manso apresentou média de 30 cm de altura aos seis meses de idade, atingindo, aos 21 meses, a altura de 147 cm.

A redução das taxas de crescimento das plantas de pinhão, após o mês de janeiro de cada ano, deve-se ao fato desse período coincidir com a floração e frutificação da cultura (CARVALHO *et al.*, 2013), de modo que a paralização no crescimento vegetativo, decorrente

do desenvolvimento de estruturas produtivas, ocorre pelo maior encaminhamento de energia e assimilados à floração e frutificação. Entretanto, as diminuições nas taxas de crescimento também podem ser relacionadas com o aumento da proximidade com o período de inverno, onde há redução das temperaturas e dos índices pluviométricos, bem como queda total das folhas (LARCHER, 2000).

Apesar da espécie ser considerada perene, o caractere altura de plantas pode ser considerado de importância secundária quando comparado com espécies de importância madeireira, em que a altura de plantas e o diâmetro exercem influência direta no volume de madeira, que não é uma situação de interesse, considerando as características da espécie em estudo (DRUMOND *et al.*, 2010).

Os dados de diâmetro médio de copa das plantas de pinhão manso encontram-se na Tabela 3. Verifica-se que a avaliação do diâmetro da copa, realizada aos 1110 DAT, seguiu a mesma tendência para os dados de altura, com as plantas apresentando períodos de oscilação no desenvolvimento de suas copas. Geralmente, os padrões temporais das taxas de crescimento em diâmetro da copa evidenciam aumentos mais acentuados no diâmetro da copa dos 30 DAT (2010), dos 300 aos 390 DAT (2010/2011), dos 660 aos 750 DAT (2011/2012) e dos 1110 DAT (2013), a partir do final do mês de outubro, iniciando-se a emergência das folhas, conforme relatado por Ghezehei, Everson e Annandale (2015). Esta variação no aumento também pode estar associada aos fatores climáticos ao longo desses períodos de avaliação, os quais apresentaram longos períodos de seca e períodos chuvosos com precipitações abaixo das médias históricas para a região.

Para Larcher (2006), a energia que a planta requer para o desenvolvimento dos brotos e dos primórdios florais provém dos fotoassimilados. Geralmente, o diâmetro da copa é diretamente proporcional à área disponível para a captação de luz, transformando-a em fotoassimilados em função da quantidade de energia disponível; assim, a planta pode apresentar maior potencial de desenvolvimento, resultando em maior produção de grãos.

Verifica-se que o diâmetro médio das copas das plantas de pinhão manso, em geral, foi crescente até o mês de julho, final do período chuvoso, nos anos 2010, 2011 e 2012 (FIGURA 9). Após esse período, ocorreu uma paralisação no crescimento médio das plantas, principalmente nos anos de 2011 e 2012 (570 e 930 DAT), face a escassez hídrica no solo, provavelmente por causa do déficit hídrico, correspondendo ao período sem chuvas na região, que vai de julho a novembro. Após esse período, as plantas de pinhão manso voltaram a aumentar o diâmetro de copa em função do período chuvoso.

Tabela 3 – Diâmetro médio de copa (cm) de plantas de pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI

Gram.	Diâmetro de Copa (cm)												
	30	120	210	300	390	480	570	660	750	840	930	1020	1110
	(DAT)												
Médias													
C.N	37,0	58,0	61,0	75,0	97,0	108,0	108,0	123,0	147,0	159,0	159,0	159,0	217,7
B.D	36,0	56,2	58,9	70,2	98,8	116,5	116,0	134,7	157,1	169,0	169,0	169,0	215,1
B.P	32,2	50,2	51,4	69,2	92,1	106,9	106,9	125,3	150,1	162,8	162,8	162,8	212,8
C.A	32,2	46,8	47,9	66,8	84,4	97,0	96,5	118,6	143,7	159,7	159,7	159,7	194,4
Intervalo de confiança da Regressão				R ²									
	95% inf.	95% sup.	Média										
C.N	0,123	0,163	0,143	0,957									
B.D	0,136	0,171	0,153	0,971									
B.P	0,135	0,171	0,153	0,970									
C.A	0,132	0,162	0,147	0,977									

DAT: dias após transplante; C.N: capim nativo; B.D: *Brachiaria decumbens*; B.P: *Brachiaria brizantha* cv Piatã; C.A: capim *Andropogon*; Gram.: gramíneas; inf.: inferior; sup.: superior.

Outro fator que pode ter contribuído para a redução da altura da planta e do diâmetro de copa, nos períodos de menor disponibilidade hídrica, foi a ocorrência de competição por água, luz e nutrientes dos consórcios realizados com gramíneas (SCHULZ *et al.*, 2014).

Observa-se que, ao se comparar o incremento total do diâmetro de copa do pinhão com os consórcios realizados, o consórcio em que o pinhão manso apresentou o menor incremento (162,3 cm) foi com o capim *Andropogon gaynaus* (C.A). Esse capim apresenta um porte elevado, com rápido crescimento e desenvolvimento, possuindo uma elevada tolerância à seca por causa de um sistema radicular profundo, provavelmente (SERAFIM; GOMES; SEIXAS, 2015). Essa característica agressiva do capim *Andropogon gaynaus* afetou diretamente o desenvolvimento do pinhão.

Arruda *et al.* (2004) apontam que o pinhão manso é uma planta com pouca exigência hídrica, tolerando bem o período de escassez de água, calor ou frio. Sob condições extremas de seca, a planta perde as folhas para conservar a umidade em seus tecidos, resultando na paralisação do crescimento e passando a sobreviver à custa da água e das reservas orgânicas armazenadas em seu caule.

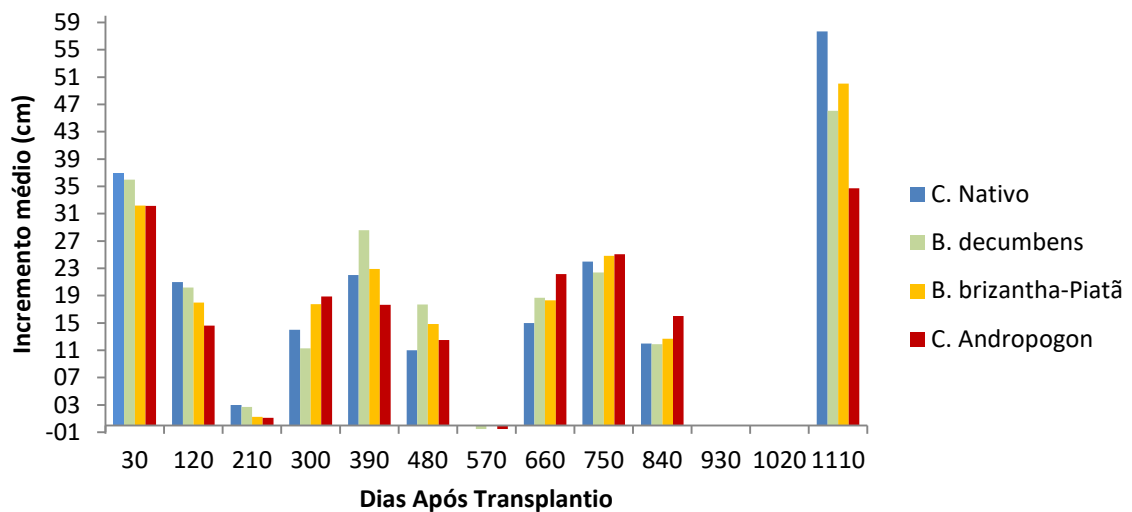


Figura 9 – Incremento médio, em diâmetro, de copa de plantas de pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI

Dentre os consórcios avaliados, verifica-se que o diâmetro de copa não apresentou diferenças entre os incrementos ao longo da avaliação, onde as plantas do consórcio com capim nativo (CN) apresentaram um incremento médio de 180,7 cm no período avaliado. Entretanto, nos consórcios feitos com *Brachiaria decumbens* (B.D) e *Brachiaria brizantha-Piatã* (B.P), o pinhão manso apresentou um incremento de copa com valores próximos, com 179,7 e 179,1 cm respectivamente – essa diferença é insignificante quando se avalia o período de três anos.

Para a característica diâmetro de caule, as plantas consorciadas com C.A e C.N foram aquelas que apresentaram os maiores desenvolvimentos na fase inicial, aos 120 DAT, com um crescimento médio de 26,1 e 23,4 mm, respectivamente (TABELA 4 e FIGURA 10). Os outros dois consórcios também apresentaram crescimento, aos 120 DAT, acima dos 20 mm, com 20,8 mm para o consórcio com B.P e 20,7 mm para o B.D. De acordo com Borges *et al.* (2018), esse comportamento já era esperado, uma vez que a fase inicial das plantas avaliadas coincide com o período de maior disponibilidade hídrica para as plantas, de fevereiro a abril de 2010.

Com relação aos valores de incremento total (FIGURA 10), observa-se que os consórcios B. P (81,1 mm) e C.A (80,8 mm) obtiveram as maiores médias de incremento ao longo do período de avaliação, o que pode indicar que, dentre os testes realizados, são aqueles que apresentam maior capacidade de sustentação da planta e ao tombamento (DIAS *et al.*,

2007). Consoante Moreira e Moreira (1996), essa variável é universalmente reconhecida como indicador do padrão de qualidade de mudas de diversas espécies.

O aumento do diâmetro do caule está diretamente relacionado ao aumento do sistema radicular (CARNEIRO, 1976). Assim, espera-se que plantas que apresentam maior diâmetro de caule tenham possibilidade de melhor nutrição e maior resistência ao déficit hídrico, pelo maior volume de solo explorado pelas raízes. Segundo Guimarães (2008), o diâmetro do caule é uma característica importante, pois quanto maior o seu valor, maior o vigor, a robustez e a resistência da planta.

Observa-se, também, que a média da característica avaliada aumentou ao longo da primeira e da segunda medições em cada ano (primeiras medições), e estabilizou-se entre a terceira e a quarta medições, indício de que há comportamento cíclico das plantas de pinhão manso, o que vem ao encontro das afirmações já mencionadas por Singh *et al.* (2013).

Tabela 4 – Diâmetro de caule (mm) de plantas pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI

Gram.	Diâmetro de Caule (mm)												
	30	120	210	300	390	480	570	660	750	840	930	1020	1110
	(DAT)												
Médias													
C.N	19,7	43,0	45,7	48,9	57,1	70,3	73,8	77,1	84,0	91,9	91,8	92,1	99,5
B.D	20,3	41,0	43,1	46,9	56,5	69,5	74,6	76,1	85,2	92,8	92,3	92,7	98,8
B.P	19,9	40,1	43,8	47,5	55,8	68,9	72,0	72,4	86,8	91,9	92,9	95,39	101,1
C.A	19,7	45,8	49,9	52,1	59,8	68,2	70,8	74,4	84,6	93,0	94,1	94,47	100,6
Intervalo de confiança da Regressão													
	95% inf.		95% sup.		Média		R ²						
C.N	0,056		0,078		0,067		0,944						
B.D	0,058		0,079		0,069		0,948						
B.P	0,061		0,080		0,071		0,962						
C.A	0,056		0,077		0,066		0,946						

DAT: dias após transplantio; C.N: capim nativo; B.D: *Brachiaria decumbens*; B.P: *Brachiaria brizantha* cv Piatã; C.A: capim Andropogon; Gram.: gramíneas; inf.: inferior; sup.: superior.

Para Trovão *et al.* (2007), na região semiárida brasileira, a vegetação está sujeita ao déficit hídrico relacionado à seca em decorrência de vários fatores, como chuvas irregulares. Nota-se que não só a baixa precipitação provoca o déficit hídrico, mas, também, outros fatores característicos da região, como altas temperaturas associadas a alta intensidade luminosa, que provocam uma demanda evaporativa excessiva e, conseqüentemente, a dessecação do solo. Tais características podem ter contribuído, ainda mais, para o comportamento cíclico do pinhão manso no município de Gilbués, PI.

Os resultados do presente trabalho ficaram, em média, 19% menores que os valores encontrados por Santos *et al.* (2010), que verificaram, em seu experimento, que o pinhão manso apresentou média de 23 mm de diâmetro do caule aos seis meses de idade e, aos 21 meses de idade, o diâmetro do caule atingiu uma média de 80 mm, obtendo para o mesmo período um diâmetro médio de 65,2 mm. Ressalta-se que o diâmetro médio de 80 mm, no presente trabalho, foi obtido aos 36 meses (1110 DAT).

Com base nos três parâmetros biométricos analisados no presente trabalho, pode-se notar que, na região em estudo, a cultura do pinhão manso apresenta uma fase de crescimento acelerado a partir do mês de outubro de cada ano até o mês de abril do ano seguinte, e uma fase de redução do crescimento nos meses de maio a setembro de cada ano.

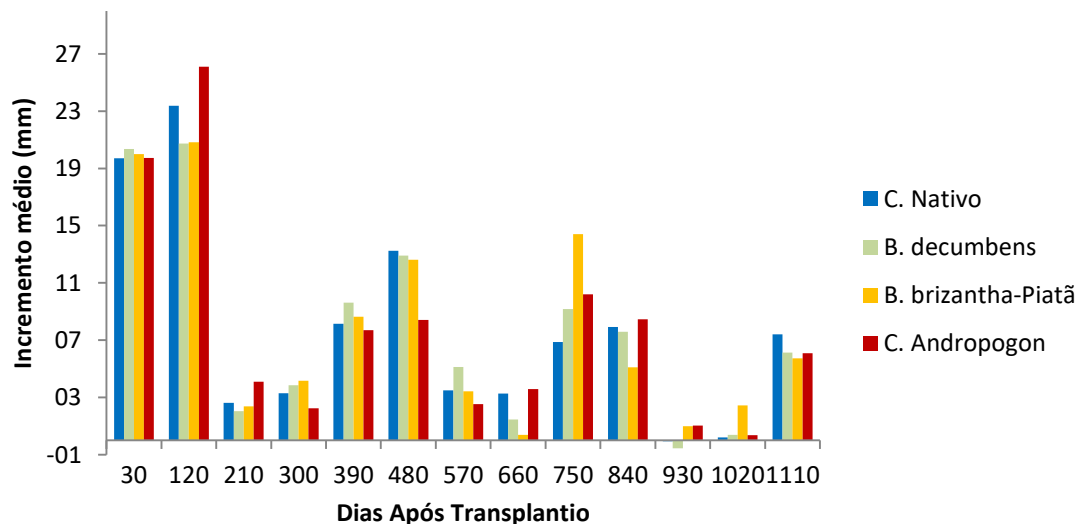


Figura 10 – Incremento médio do diâmetro de caule de plantas de pinhão manso cultivadas em área degradada consorciadas com diferentes gramíneas em Gilbués, PI

A produtividade do pinhão manso varia muito em função da região de plantio, da técnica de cultivo, dos tratamentos culturais e da idade da cultura, tendo o potencial de produtividade em sementes entre 6.373 e 6.468 kg ha⁻¹, das melhores plantas, no primeiro ciclo de colheita (ARRUDA *et al.*, 2004). Tais valores diferem dos encontrados neste trabalho, em que as máximas produtividades obtidas foram de 5,8 kg ha⁻¹ na produção acumulada do ano de 2010 (120 DAT), para a área de pinhão manso consorciado com B.D, enquanto que na colheita realizada no ano de 2012 (840 DAT) a produção foi de 220,9 kg ha⁻¹, no consórcio de pinhão manso mais C.A, resultando em uma produção de 6,9 e 265,1 g por planta, respectivamente. Esta baixa produtividade também foi encontrada por outros autores

(ALBUQUERQUE *et al.*, 2008; FRANDOLOSO, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2012). Já Carnielli (2003) ressalta que baixas produtividades, em cultivo de sequeiro, são esperadas nos primeiros três anos após implantação, pois, geralmente, o pinhão manso apresenta produção satisfatória a partir do quarto ano após o plantio.

A produtividade média, nesse trabalho, variou de 5,1 kg ha⁻¹ no primeiro ano, de 21,25 kg ha⁻¹ no segundo ano e de 195,1 kg ha⁻¹ no terceiro ano. Ressalta-se que mesmo com o aumento significativo de 3.825% no primeiro ano, os valores de produtividade foram relativamente inferiores aos alcançados por Purcino e Drummond (1986), que observaram que o pinhão manso iniciou a produzir no segundo ano, atingindo 2.000 kg ha⁻¹ de sementes. Drummond *et al.* (2007) obtiveram produtividade de 330 kg ha⁻¹, em condições de sequeiro, já no primeiro ano de cultivo, em Petrolina, PE, e Drummond *et al.* (2010) identificaram produtividades variando de 2.853 a 3.542 kg ha⁻¹ em Santa Maria da Boa Vista, PE.

Mesmo apresentando uma baixa produtividade, os resultados obtidos ficaram, em média, 47% maior que os resultados obtidos por Frandoloso (2012), que encontrou 155 kg ha⁻¹ em seu trabalho com pinhão manso no Oeste do Paraná, bem como 25% maior que os resultados de Oliveira *et al.* (2012), com 132,5 kg ha⁻¹ trabalhando com pinhão manso em sequeiro no município de Lavras, MG.

Em Nunes *et al.* (2008), no primeiro ano de cultivo, no Oeste da Bahia, a produtividade ficou em torno de 713,82 kg ha⁻¹, próximo do mínimo recomendado para a mamona. Já Lima *et al.* (2009) afirmam que se pode alcançar produtividade de 500 kg ha⁻¹ de semente na primeira colheita e citam, ainda, que na segunda colheita se pode obter produtividade de 975 kg ha⁻¹.

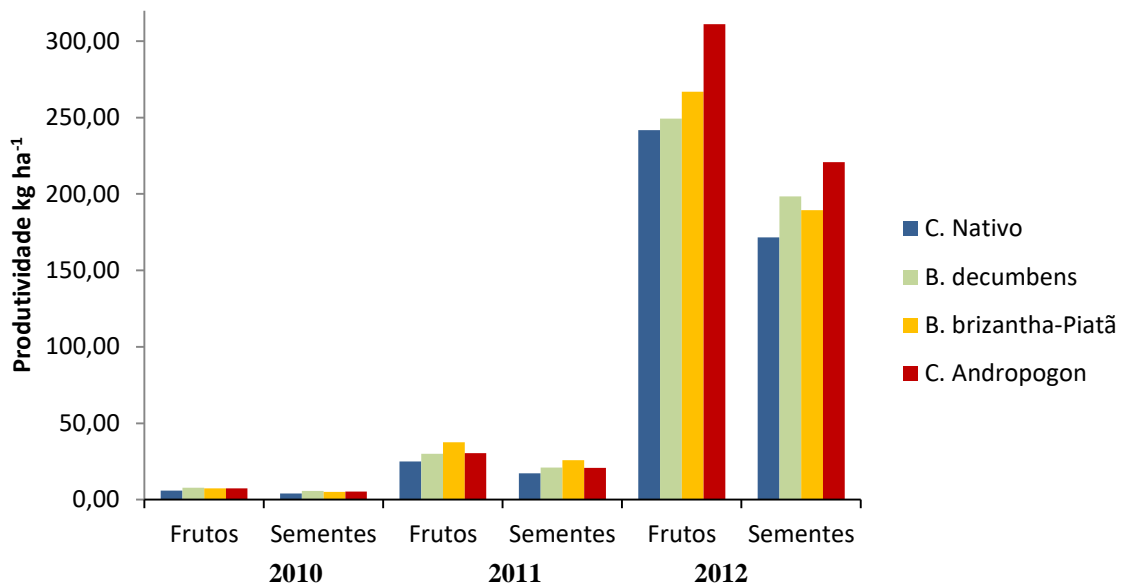


Figura 11 – Produtividade de frutos e sementes de pinhão manso cultivado em área degradada consorciado com diferentes gramíneas em Gilbués, PI

Observa-se que a produtividade do pinhão manso foi superior em todos os consórcios no ano de 2012, destacando-se a área consorciada com capim Andropogon. Verifica-se, ainda, uma interação entre as espécies consorciadas com o pinhão manso e um melhor aproveitamento de pequenas áreas sem afetar o desempenho da cultura principal.

Sánchez, Hernández e Simón (2003) ressaltam que esse fato tem sido observado em várias regiões, e ocorre em razão do aproveitamento de nutrientes pelos arbustos de grande porte de camadas do solo que estão fora do alcance das raízes de plantas forrageiras e anuais produtoras de grãos, assim como à incorporação gradativa de biomassa destas espécies (folhas, flores, etc.) às plantas anuais.

4.2 Atributos físicos do solo e carbono orgânico

Dentre os quatro atributos apresentados na Tabela 6, verificou-se que somente o COT e o DMG apresentaram distribuição de frequência com assimetria positiva para as profundidades estudadas nos dois anos analisados. Identificou-se, também, que a mediana apresenta valores menores que a média, revelando, então, a tendência de concentração de valores menores que a média, sendo um indicativo de que as medidas de tendência central são dominadas por valores típicos na distribuição (CAMBARDELA *et al.*, 1994).

Entretanto, esta tendência também foi observada no IEA nas profundidades de 0,05-0,10 m, no ano de 2010, e na profundidade de 0,0-0,05 m em 2012. De acordo com Cajazeira e Assis Júnior (2011) e Campos *et al.* (2013), quando uma distribuição é simétrica, os valores da média e da mediana são coincidentes.

Verifica-se que a assimetria apresentou valores próximos a zero, com exceção do DMG em todas as profundidades analisadas no ano de 2010, e na profundidade de 0,0-0,05 m no ano de 2012, corroborando com os dados obtidos por Corado Neto *et al.* (2015a). Para as demais profundidades, os atributos IEA e DMP apresentaram distribuição de frequência com assimetria negativa, mostrando que, nestes casos, houve tendência para concentração de valores maiores que a média, uma vez que a mediana foi maior que a média. Alguns atributos apresentaram esses valores afastados de zero, indicando distribuição assimétrica, sendo estes confirmados pelos maiores valores de assimetria, o que evidencia que são influenciados por valores extremos (OLIVEIRA *et al.*, 2015a).

Observa-se, nos dados, que a maior parte dos atributos apresenta valores de curtose maiores que zero, tendo, assim, uma distribuição de frequência leptocúrtica, o que demonstra uma maior concentração dos dados em torno da média, com tendência a uma maior homogeneidade dos dados, com exceção dos valores de curtose para COT (0,05-0,10 m em 2010 e 0,10-0,20 m em 2012), IEA (0,0-0,05 m em 2012) e DMG (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em 2012), que obtiveram valores menores que zero, apresentando distribuição de frequência planicúrtica; nestes casos, existe a tendência desses atributos apresentarem maior variabilidade. Desta forma, os resultados obtidos para os atributos mencionados concordam com os valores encontrados por Azevedo (2004), com assimetria variando entre -1,03 e 6,75 e de curtose entre -1,04 e 56,11, assim como de Lima (2013), com assimetria de -1,34, sugerindo uma grande variabilidade dos atributos com relação a sua frequência de distribuição.

A normalidade dos dados não é uma exigência para a aplicação de técnicas geoestatísticas, portanto, realizou-se o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, com a finalidade de se verificar a aceitação ou não da distribuição normal dos valores dos atributos. A normalidade, geralmente, permite observar maior precisão das estimativas da krigagem (CRESSIE, 1991; CRUZ *et al.*, 2011).

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov (TABELA 6) indicaram normalidade para, aproximadamente, 41,6% dos resultados obtidos, mostrando, também, que a maior parte destes resultados de distribuição normal foi obtida com os dados do ano de 2012. Observou-se que os atributos apresentaram distribuição de frequência com pequenos

desvios da assimetria e da curtose em relação à distribuição normal. Porém, nos casos onde a distribuição de frequência teve assimetria e a curtose com grande desvio em relação à distribuição normal, o teste de normalidade acusou a não aceitação.

De acordo com Cajazeira e Assis Júnior (2011), a medida estatística CV permite comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, mas não permite avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo e nem seu padrão espacial. Desta forma, seu emprego não pode ser generalizado, devendo-se apreciar esses resultados segundo as finalidades às quais o trabalho se destina.

O IEA da camada superficial é um parâmetro físico de importância, especialmente para o estudo do processo erosivo do solo. Neste sentido, quando os valores do IEA são superiores a 80%, é um indicativo de que esse solo tende a ser mais resistente à desagregação (OLIVEIRA *et al.*, 2015a). Portanto, o IEA representa uma medida da agregação total do solo, semelhante ao diâmetro médio geométrico (DMG) e ao diâmetro médio ponderado (DMP); mas, o IEA não considera a distribuição por classes de agregados (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998).

Os maiores teores de COT foram observados no ano de 2012, na camada de 0,0-0,05 m e variaram de 0,29 a 3,22 g kg⁻¹, com uma média de 1,24 g kg⁻¹ para essa camada, e 1,12 g kg⁻¹ na camada de 0,05-0,10 m. Esses teores são considerados muito baixos dentro dos valores para caracterizar o horizonte superficial como A fraco (SANTOS *et al.*, 2018).

Corado Neto *et al.* (2015a) observaram, em Neossolo Litólico no município de Gilbués/PI, teores médios de 0,73 e 0,75 g kg⁻¹, respectivamente nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m, significando teores 58,7% e 66,9% menores que os obtidos no estudo em questão. Entretanto, Leite *et al.* (2015), em Argissolo Vermelho-Amarelo em Gilbués/PI, obtiveram teores de COT mais elevados que no presente estudo, com 7,8 e 8,1 g kg⁻¹ nas camadas de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m, respectivamente. Desta forma, o aumento deste atributo é de fundamental importância para os processos de recuperação de áreas degradadas, uma vez que o mesmo está diretamente ligado ao aumento da disponibilidade de nutrientes e à estabilidade de agregados que geram um aumento direto da qualidade de solos em processo de recuperação.

Segundo Melloni, Melloni e Vieira (2013), o teor de carbono orgânico no solo influencia diretamente a estabilidade dos agregados, sendo que a dimensão destes agregados no solo dá uma ideia da sua suscetibilidade à erosão; assim, quanto maior esse teor de carbono orgânico, maior o DMG e, conseqüentemente, o DMP. Tal afirmação pode ser observada nos resultados obtidos neste trabalho (TABELA 3), pois, à medida que os teores de COT

aumentaram entre os anos de 2010 e 2012, foi verificado um acentuado aumento dos valores de IEA, com uma média de, aproximadamente, 20% para as primeiras duas camadas e de 6,5% para a camada mais profunda, ficando os mesmos bem próximos do valor descrito por Oliveira *et al.* (2015b), mostrando-se um bom indicativo de resistência à degradação (80%). Esse resultado também foi observado no DMP, apresentando um aumento médio de 7% para as duas camadas superficiais e de 1,8% para a mais profunda. Com relação ao DMG, também foi observado um aumento no tamanho das partículas ao longo do perfil do solo, com um aumento gradativo médio, de uma camada para outra, de 0,182 mm.

No entanto, pode-se afirmar que o aporte de matéria orgânica gerado pelas culturas implantadas na área de estudo foi preponderante para a melhora significativa dos atributos estudados, confirmando, assim, as afirmações de Franco (1991) com relação aos tipos de espécies a serem implantadas em processos de recuperação de áreas degradadas. Resende *et al.* (2007) também encontraram melhorias nos processos de recuperação de áreas degradadas com a implementação de processos de revegetação.

Consoante a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), o coeficiente de variação (CV) de todas as variáveis, com exceção dos valores de CV para o IEA no ano de 2010 na camada de 0,10-0,20 m e de 2012 nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, obtiveram coeficiente de variação médio $12 < CV < 62$, sendo que o IEA na profundidade de 0,10-0,20 m, em 2012, apresentou o menor coeficiente de variação (8,2%) e o DMG na profundidade de 0,0-0,05 m, em 2010, mostrou o maior coeficiente de variação (46,7%). O estudo de variabilidade de IEA e COT em Neossolo Litólico, realizado por Corado Neto *et al.* (2015a), encontrou valores de coeficiente de variação próximos dos identificados no presente trabalho para IEA e DMG: 13,7% e 46 mm, respectivamente. Para Carvalho, Takeda e Freddi (2003), os resultados de análises de atributos do solo costumam apresentar elevados valores de CV, indicando uma maior heterogeneidade e variabilidade dos mesmos.

A classificação proposta por Nogueira (2007) estabeleceu que: CV maior que 35% indica que a série de dados é heterogênea e a média tem pouco significado; se for maior que 65%, a série é muito heterogênea e a média não tem significado algum; porém, se for menor que 35%, a série será homogênea e a média terá significado, podendo ser utilizada como representativa da série de onde foi obtida. Considerando esta classificação, observa-se que 75% dos resultados de CV obtidos para os atributos (TABELA 5) estão abaixo de 35%, demonstrando que as suas médias representam bem os resultados obtidos. Contudo, 25% dos resultados apresentam pouca representatividade, sendo os dados de COT os que menos apresentaram representatividade.

Verifica-se que, no ano de 2010, os coeficientes de variação para os atributos avaliados foram maiores que no ano de 2012; portanto, as médias do ano de 2012 representaram melhor o conjunto de dados obtidos do que as do ano de 2010. Isso demonstra uma homogeneização dos dados, que, provavelmente, se explica pelo manejo utilizado na área, no qual, durante os três anos de estudo, foi utilizada apenas para o estabelecimento da pastagem e do pinhão manso. Neste período, não houve uso de prática mecânica de revolvimento do solo, tornando, assim, a utilização da área mais homogênea, o que permitiu uma melhor recuperação, em especial, nas camadas mais superficiais.

Tabela 5 – Análise descritiva dos atributos do solo, nos anos de 2010 e 2012, nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Carbono Orgânico Total – COT (g kg ⁻¹)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	TN*
2010	0,0 - 0,05	0,167	1,546	0,736	0,705	0,299	40,647	0,674	0,559	NS
	0,05 - 0,10	0,093	1,525	0,744	0,716	0,337	45,334	0,398	-0,271	*
	0,10 - 0,20	0,102	1,491	0,673	0,629	0,313	46,461	0,610	0,127	*
2012	0,0 - 0,05	0,296	3,227	1,244	1,155	0,520	41,779	0,846	1,735	*
	0,05 - 0,10	0,426	2,397	1,126	1,090	0,388	34,489	0,558	0,441	*
	0,10 - 0,20	0,116	1,622	0,875	0,864	0,338	38,659	0,069	-0,655	*
Índice de Estabilidade de Agregados – IEA (%)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	TN*
2010	0,0 - 0,05	40,130	84,600	63,682	63,965	8,948	14,051	-0,380	0,515	*
	0,05 - 0,10	36,200	97,550	65,696	65,385	10,520	16,013	0,119	1,485	NS
	0,10 - 0,20	40,130	99,698	73,288	73,535	8,461	11,544	-0,091	3,981	NS
2012	0,0 - 0,05	58,910	99,220	77,843	77,391	8,235	10,579	0,012	-0,135	*
	0,05 - 0,10	51,641	93,978	77,940	77,501	7,739	9,929	-0,472	0,641	*
	0,10 - 0,20	56,871	98,663	78,256	78,800	6,444	8,235	-0,118	1,892	*
Diâmetro Médio Ponderado – DMP (mm)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	TN*
2010	0,0 - 0,05	0,063	3,771	2,256	2,336	0,760	33,675	-1,216	1,663	NS
	0,05 - 0,10	0,063	3,268	2,391	2,566	0,782	32,686	-1,757	2,898	NS

	0,10 - 0,20	0,063	3,528	2,436	2,594	0,742	30,435	-1,784	3,518	NS
	0,0 - 0,05	0,133	3,097	2,406	2,471	0,487	20,234	-1,794	5,312	NS
2012	0,05 - 0,10	0,860	3,146	2,569	2,663	0,423	16,475	-1,412	2,740	NS
	0,10 - 0,20	1,094	3,103	2,482	2,624	0,479	19,308	-1,038	0,538	NS
Diâmetro Médio Geométrico – DMG (mm)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	TN*
	0,0 - 0,05	1,018	3,081	1,294	1,267	0,254	19,661	4,448	30,519	NS
2010	0,05 - 0,10	1,009	1,885	1,337	1,363	0,186	13,929	0,013	-0,329	NS
	0,10 - 0,20	1,009	1,619	1,322	1,330	0,167	12,635	-0,121	-1,083	*
	0,0 - 0,05	1,001	5,752	1,475	1,298	0,689	46,715	4,053	20,08	NS
2012	0,05 - 0,10	1,012	3,334	1,521	1,407	0,500	32,869	2,628	7,251	NS
	0,10 - 0,20	1,011	3,334	1,505	1,440	0,482	32,017	2,701	8,413	NS

Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; \bar{X} : valor médio; Md: mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Ass.: assimetria; Cur.: curtose; TN*: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (5% de significância) não significativo ^{NS}.

Segundo Carvalho, Vilas Boas e Fadigas (2010), o instrumento mais indicado para demonstrar a estimativa de dependência entre as amostras é a análise de autocorrelação. O semivariograma é a função que traduz a semivariância em função das distâncias entre os pontos amostrais. Portanto, as avaliações de dependências espaciais, bem como os dados de COT, IEA, DMP e DMG foram utilizados para a geração de semivariogramas, considerando o conjunto de dados representado em cada profundidade do solo (TABELA 6).

Todos os semivariogramas apresentaram ajustes aos modelos teóricos, com exceção do COT (0,05-0,10 m, em 2012), IEA (0,05-0,10 m, em 2010), DMP e DMG (0,0-0,05 e 0,05-0,10, e 0,10-0,20 m, em 2010), os quais tiveram efeito pepita puro (FIGURA 12). Esse efeito representa ausência de dependência espacial entre os pontos amostrados, o que indica que na distribuição aleatória na zona de estudo das variáveis ocorreram erros de medidas ou microvariações não detectadas na escala de separação adotada entre os pontos de amostragem, provavelmente (SOARES, 2006).

Para Corado Neto *et al.* (2015a), uma das prováveis causas está relacionada com a degradação do solo por processos erosivos, contribuindo para as alterações na estrutura de dependência espacial, o que ocasiona a aleatoriedade das variáveis, tendo como uma provável solução a adoção de subgrids no interior do grid original, de modo a estimar semivariâncias para distâncias de separação inferiores às adotadas no presente estudo. Os trabalhos de Tsegaye e Hill (1998), Azevedo (2004) e Ruiz (2016) mostraram que a escala de variação pode mudar em função da variável e do uso da terra.

Portanto, pode-se observar que os dados se ajustaram mais adequadamente ao modelo de semivariograma exponencial, com 25% dos resultados obtidos, sendo seguido pelo modelo esférico que se ajustou a 25% dos resultados; entretanto, o modelo esférico é o que melhor se ajusta aos atributos do solo, geralmente (GUEDES FILHO *et al.*, 2010). Esses resultados corroboram com McBratney e Webster (1983) e Siqueira, Marques Junior e Pereira (2010), que destacam os modelos esférico e exponencial como aqueles mais utilizados em ciências do solo e ambiental. Esses são os modelos exponenciais mais ajustados a fenômenos erráticos na pequena escala, enquanto os modelos esféricos descrevem propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos à curta distância (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

De acordo com Ruiz (2016), o alcance é um parâmetro importante na análise geoestatística, pois expressa a dependência espacial ou a distância em que uma variável pode apresentar o mesmo efeito. Observa-se que os valores de alcance para os atributos tendem a diminuir à medida que se avança no perfil do solo, indicando menor continuidade na distribuição espacial das propriedades do solo em profundidade, com exceção do COT, que apresentou uma redução de 67,5% no seu teor da camada de 0,0-0,05 m para a camada de 0,05-0,10 m e, em seguida, na camada de 0,10-0,20 m, que apresentou um aumento de 3,85% com relação à primeira. Isso indica que a distribuição deste atributo é mais homogênea, uma vez que ocorre em uma área de maior raio.

A maior continuidade do COT na camada de 0,10-0,20 m foi no ano de 2010, provavelmente em função das coletas amostrais de solo terem sido feitas antes de a área ter sofrido as intervenções para a implementação do estudo; nesse período, a área apresentava uma pequena quantidade de cobertura vegetal, sendo que esses maiores teores podem ser oriundos da matéria orgânica fornecida pelas raízes nas camadas subsuperficiais. Isto não foi observado no ano de 2012, no qual foi verificado que os alcances diminuíram de maneira contínua ao longo do perfil, possivelmente influenciadas pelo manejo que proporcionou uma elevação na cobertura vegetal da área e, conseqüentemente, maiores quantidades de matéria orgânica. Estes resultados corroboram com os obtidos por Leite *et al.* (2015), em que os maiores valores de COT foram obtidos na camada subsuperficial.

Os atributos apresentaram diferentes valores de alcance, variando de 5,5 a 296,3 m. Verifica-se que, no ano de 2012, os atributos apresentaram os menores valores de alcance, tendo COT (0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), IEA (0,0-0,05 e 0,05-0,10 m), DMP (0,10-0,20 m) e DMG (0,10-0,20 m) com alcances de 5,5, 4,8, 5,8, 28,6, 42,2, 24,7 e 6,5 m, respectivamente – esses atributos tiveram maior descontinuidade na sua distribuição espacial. Portanto, além da variabilidade vertical, há a variabilidade horizontal, confirmada pelos

diferentes valores de alcance das variáveis em função das diferentes profundidades, o que permitiria uma amostragem em menores intervalos com o intuito de não perder a dependência espacial. Assim, o alcance, que é a distância limite da dependência espacial, é diretamente proporcional à dependência entre as amostras obtidas. De acordo com Corado Neto *et al.* (2015b), em solos em processo de degradação, o alcance é reduzido, geralmente, porque as fontes de variabilidade são extrínsecas.

Os maiores alcances encontrados foram o DMP nas profundidades de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m, no ano de 2012, o IEA (0,10-0,20 m), em 2010, e o DMG (0,0-0,05 m), com 215,8, 121,9, 296,3 e 165,0 m, respectivamente, mostrando variação de escala conforme o atributo estudado. Observa-se, também, que dentre todas as variáveis analisadas, a correlação existente entre os pontos foi superior aos 30 m (LIMA *et al.*, 2015). Esses resultados vêm ao encontro dos obtidos por Carvalho *et al.* (2011), Corado Neto *et al.* (2015a) e Lima *et al.* (2015), os quais trabalharam com variabilidade espacial de atributos físicos em áreas degradadas. Sendo assim, é possível explicar a variação no alcance da dependência espacial das variáveis estudadas observando-se diversas fontes de variação, tais como: o tempo, a intensidade de uso do solo e as condições naturais atuantes no solo sob acelerado processo de degradação.

A partir do grau de dependência espacial (GDE) proposto por Cambardella *et al.* (1994), classificou-se em forte, moderado e fraco o grau de dependência espacial. Desta forma, as análises mostraram que 41,6% das variáveis apresentaram forte dependência espacial, indicando que a variação do acaso foi pequena e que a contribuição do efeito pepita na variância total foi baixa. Ainda segundo Cambardella *et al.* (1994), variáveis que apresentam grau forte de dependência espacial são influenciadas por propriedades intrínsecas do solo.

As variáveis COT (0,0-0,05 m), em 2010, IEA (0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), em 2012, e DMP (0,10-0,20 m) e DMG (0,05-0,10 m), em 2012, apresentaram moderada dependência espacial, representando 25% dos resultados obtidos. As variáveis que apresentaram maiores contribuições do efeito pepita na variância total, tiveram essa influência nas análises do ano de 2010, em especial na camada de 0,05-0,10 m, com exceção de DMP e DMG, que apresentaram contribuição para todas as camadas avaliadas no ano de 2010. A classificação utilizada para essas variáveis, em suas respectivas profundidades, mostra que sofrem influências ocasionadas pelo relevo, pela falta de manejo e pelo pisoteio animal, do que as demais (CAMBARDELA *et al.*, 1994).

Em relação aos valores de patamar ($C_0 + C_1$), verifica-se que as variáveis apresentaram uma amplitude de variância de 0,028 para DMG (0,10-0,20 m), em 2012, e de 286,3 para IEA

(0,10-0,20 m), em 2010. Para Corado Neto *et al.* (2010), essa amplitude evidencia que, dentre esses valores, a estacionariedade é real e contribui para a definição da variabilidade espacial dos pontos amostrados.

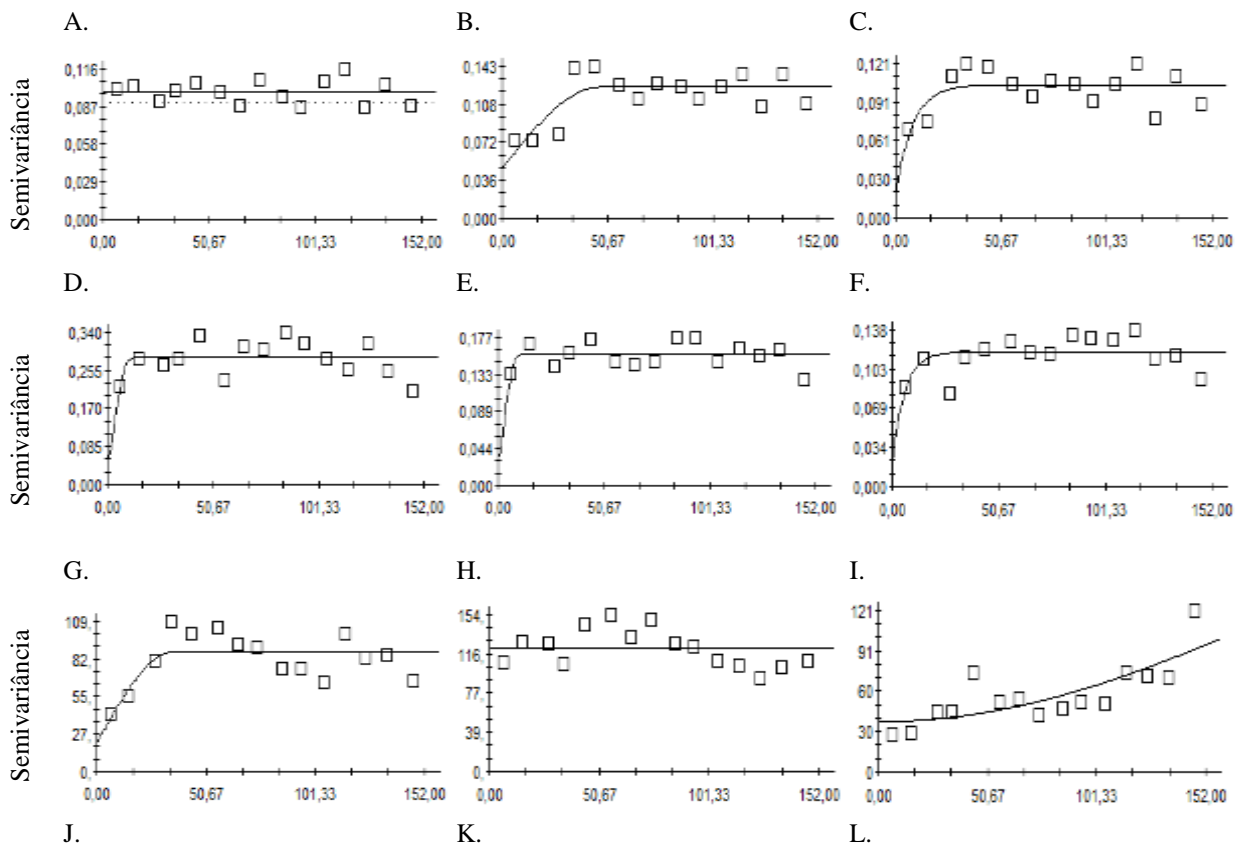
Consoante Camargo, Marques Júnior e Pereira (2010), esses resultados são importantes, uma vez que permitem um planejamento experimental da área estudada, e devem ser levados em consideração em termos de proposta para seu manejo e posteriores pesquisas, assim como na determinação do número de pontos que precisam ser amostrados para se obter uma melhor representatividade.

Tabela 6 – Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Carbono Orgânico Total – COT (g kg ⁻¹)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	A	r ²	C ₀ /C ₀ +C ₁	GDE
2010	0,0 - 0,05	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,05 - 0,10	ESF	0,0474	0,1238	46,8	59,10	0,382	Moderado
	0,10 - 0,20	EXP	0,0178	0,1046	8,10	38,70	0,170	Forte
2012	0,0 - 0,05	GAU	0,0575	0,284	5,50	16,90	0,202	Forte
	0,05 - 0,10	GAU	0,0333	0,1576	4,80	15,30	0,211	Forte
	0,10 - 0,20	EXP	0,0197	0,1184	5,80	24,40	0,166	Forte
Índice de Estabilidade de Agregados – IEA (%)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	A	r ²	C ₀ /C ₀ +C ₁	GDE
2010	0,0 - 0,05	ESF	20,7	87,0	35,40	50,9	0,237	Forte
	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,10 - 0,20	ESF	37,7	286,3	296,3	61,30	0,131	Forte
2012	0,0 - 0,05	EXP	20,9	73,45	28,6	84,0	0,281	Moderado
	0,05 - 0,10	EXP	17,1	66,43	42,2	83,60	0,257	Moderado
	0,10 - 0,20	ESF	23,4	48,44	73,00	84,20	0,485	Moderado
Diâmetro Médio Ponderado – DMP (mm)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	A	r ²	C ₀ /C ₀ +C ₁	GDE

2010	0,0 - 0,05	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
2012	0,0 - 0,05	ESF	0,055	0,320	215,80	84,40	0,171	Forte
	0,05 - 0,10	ESF	0,033	0,186	121,90	79,40	0,177	Forte
	0,10 - 0,20	EXP	0,101	0,246	24,7	47,60	0,410	Moderado
Diâmetro Médio Geométrico – DMG (mm)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	A	r ²	C ₀ /C ₀ +C ₁	GDE
2010	0,0 - 0,05	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
2012	0,0 - 0,05	GAU	0,182	0,1417	165,0	78,80	1,28	Fraca
	0,05 - 0,10	GAU	0,0137	0,0343	73,90	35,8	0,399	Moderado
	0,10 - 0,20	EXP	0,004	0,0286	6,50	29,50	0,142	Forte

C₀: efeito pepita; C₀+C₁: patamar; R²: coeficiente de determinação do modelo; EPP: efeito pepita puro; GDE: grau de dependência espacial; Efeito pepita: 100 % do patamar; GDE: moderada quando estão entre 25% e 75%, fraca > 75% e forte < 25%.



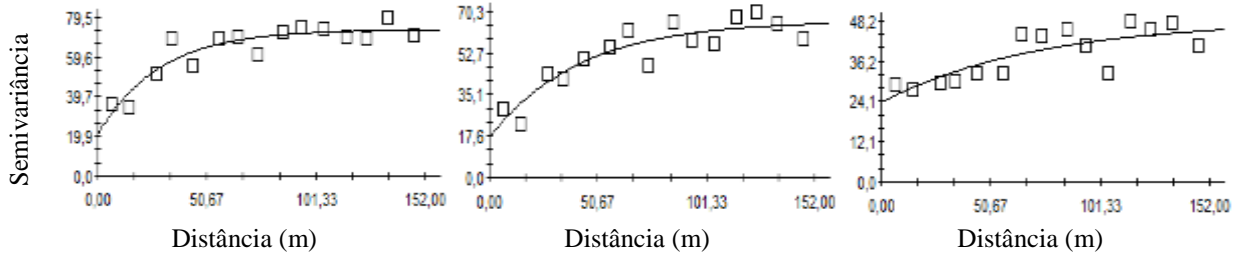
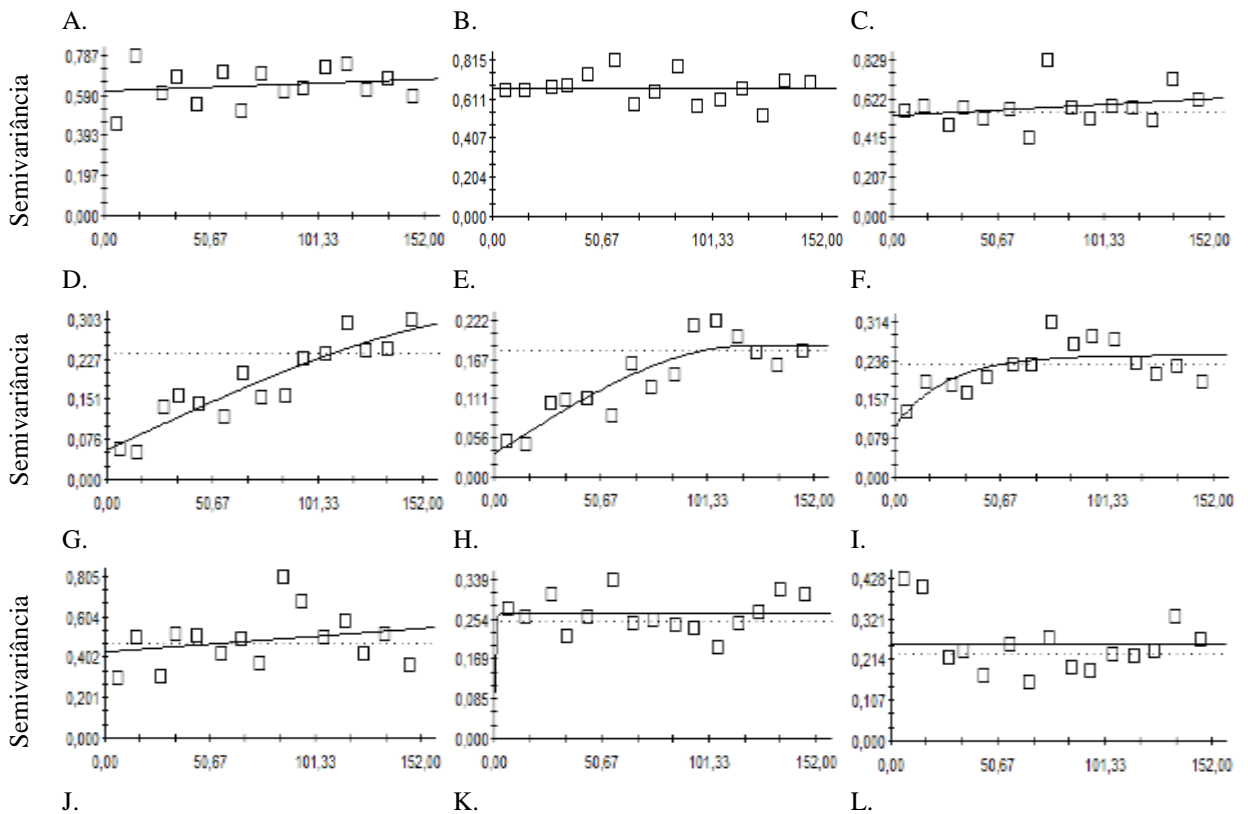


Figura 12 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para carbono orgânico total (A, B e C, em 2010, e D, E e F, em 2012), e Índice de Estabilidade de Agregados (G, H e I, em 2010, e J, K e L, em 2012)



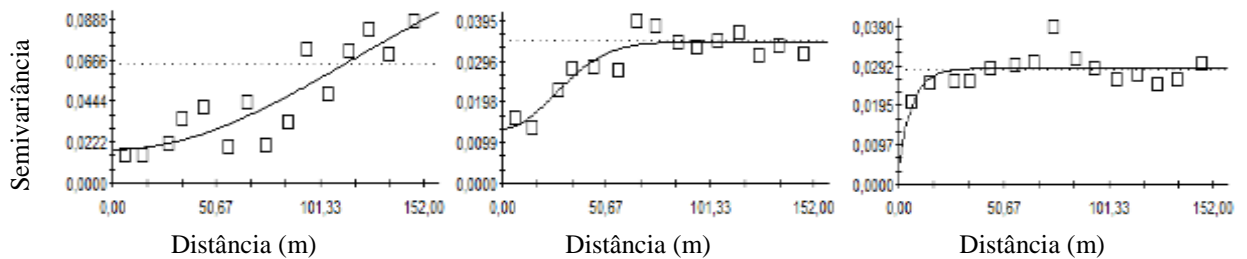


Figura 13 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para Diâmetro Médio Ponderado (A, B e C, em 2010, e D, E e F, em 2012) e Diâmetro Médio Geométrico (G, H e I, em 2010, e J e K, em 2012), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

A partir dos modelos aceitos, realizou-se a krigagem dos dados para a obtenção dos mapas de cada variável, que se encontram nas figuras de 14 a 17. A partir da confecção dos mapas temáticos, foi possível localizar geograficamente as áreas mais problemáticas, ou seja, sítios específicos com maiores ou menores teores para cada atributo, bem como a variação de cada um ao longo do tempo estudado. Biblio *et al.* (2003) comentam que os mapas de variabilidade espacial permitem localizar as áreas com problemas e testar a eficiência das práticas utilizadas em solucioná-los, indicando que podem, eficientemente, ajudar na identificação e no estabelecimento de zonas de manejo de áreas agrícolas, possibilitando a adoção de tratamentos diferenciados de acordo com as necessidades específicas do solo.

Portanto, verifica-se que a geoestatística foi eficiente para a obtenção dos mapas temáticos para as variáveis avaliadas, com exceção das variáveis COT (0,05-0,10 m, em 2012), IEA (0,05-0,10 m, em 2010), DMP e DMG (0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, em 2010), as quais apresentaram efeito pepita puro e ausência de ajuste a um modelo de distribuição espacial. Desta forma, em decorrência da necessidade de se demonstrar a distribuição espacial de cada atributo, optou-se, para estas variáveis, a confecção de mapas pelo método de interpolação do inverso do quadrado das distâncias (IDW), mesmo sendo limitada a utilização desses mapas. Ressalta-se, ainda, que para as variáveis que apresentaram ajustes com o modelo de distribuição, seus mapas foram obtidos a partir dos dados originais, sem a utilização de nenhum tipo de transformação, obtendo-se, assim, os seus respectivos mapas.

Verificou-se que as estruturas das distribuições espaciais das variáveis foram diferentes quando se comparou as características do solo no ano de 2010, com as de 2012; uma explicação para a ocorrência dessas diferenças pode ser em virtude do manejo e uso do solo realizados durante o período estudado, provavelmente. Assim, observou-se, também, que

as culturas instaladas na área implementaram uma melhora significativa nos atributos analisados, como pode ser visualizado nas imagens (FIGURA 14).

Com base nos mapas temáticos gerados, identificou-se que os teores de COT diminuíram ao longo do perfil do solo, apresentando valores muito próximos e uma grande semelhança na distribuição dos dados, especialmente no ano de 2010 (FIGURA 13). Verificou-se, ainda, que o COT, no ano de 2010, apresentou valores baixos na totalidade de sua área. Esses valores se devem, possivelmente, à quase inexistência de cobertura vegetal na área no ano em questão, como também ao acentuado grau de degradação da área, evidenciado pelos diferentes níveis de erosão presentes, confirmada pela grande quantidade de voçorocas em volta da área em análise. No ano de 2012, observou-se um ligeiro aumento nos teores de COT, comprovados pela presença das cores amarelo e verde, bem como sem o predomínio da cor rosa. Os mapas temáticos também mostram um aumento na variabilidade vertical, com teores aumentando, em média, $0,14 \text{ g kg}^{-1}$ entre as profundidades.

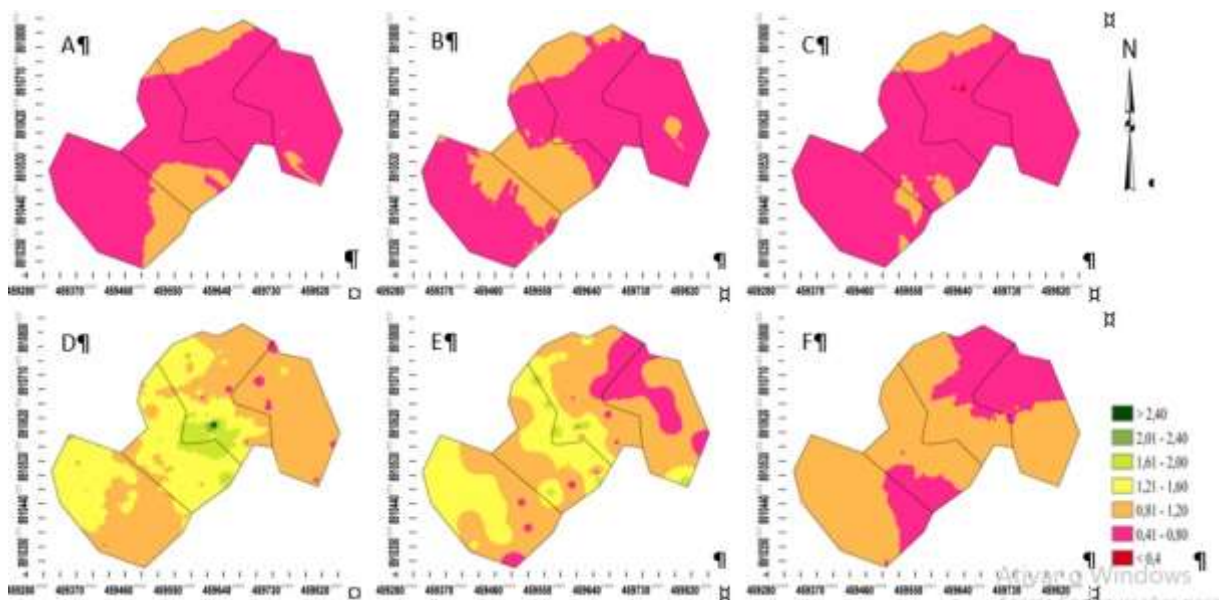


Figura 14 – Mapa de distribuição espacial para Carbono Orgânico Total (COT), nos anos de 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico, em Gilbués, PI

Nos mapas de distribuição espacial gerados para o IEA (FIGURA 15), identificou-se um aumento significativo, tanto de um ano para o outro como com a profundidade, em especial nas duas primeiras camadas (0,0-0,05 e 0,05-0,10 m). Observou-se, ainda, que o IEA apresentou seus maiores aumentos nas mesmas camadas em que foram verificadas as elevações dos teores de COT, reforçando o relato de Matos *et al.* (2008) com relação à importância do COT para a estabilização dos agregados. Esse comportamento corrobora com o observado por Corado Neto *et al.* (2015a) e Montanari *et al.* (2015), em estudos, respectivamente, em área degradada e em área na região do ecótono.

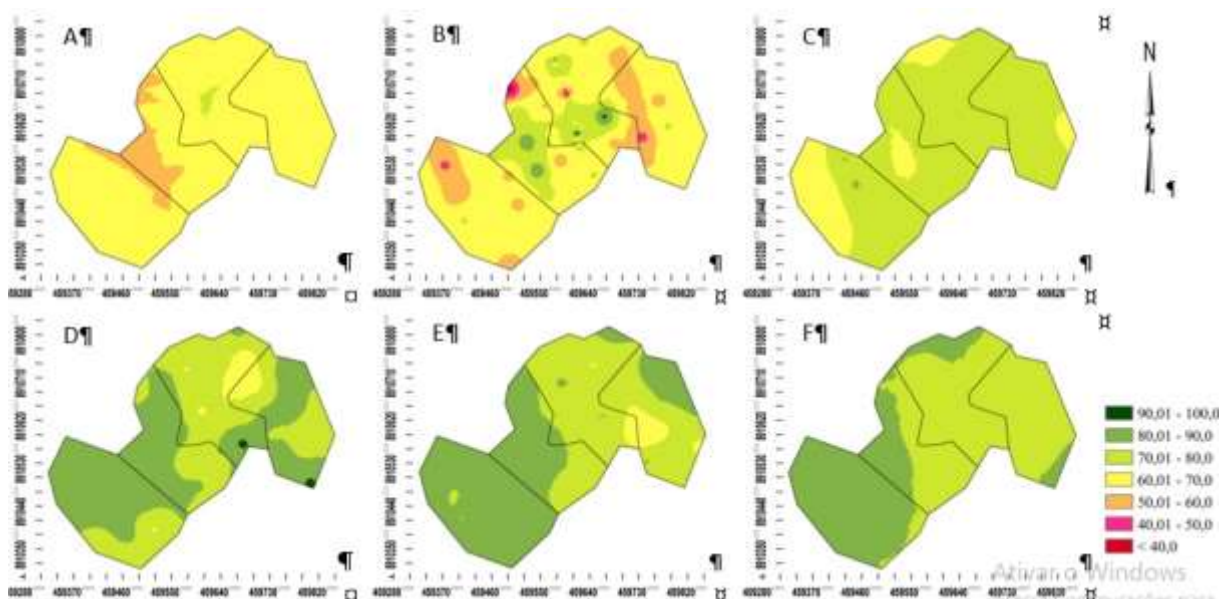


Figura 15 – Mapa de distribuição espacial para o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA), nos anos de 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico, no município de Gilbués, PI

Consoante Castro Filho, Muzilli e Podanoschi (1998), o COT do solo apresenta relação direta com o DMP e DMG desse solo. Assim, havendo incremento de resíduos vegetais na superfície, há aumento do teor de carbono orgânico, melhorando, sobretudo, o estado de agregação do solo. Essa afirmação vem ao encontro dos resultados obtidos no presente trabalho, uma vez que o incremento, ao longo do período analisado, é considerado baixo, com menos de 1%. Desta forma, um fator que pode ser preponderante para o aumento do DMP, DMG e IEA é o aumento considerável na quantidade de raízes nas áreas, pois os maiores aumentos dos atributos foram verificados, principalmente, na área em que foi implantado o capim *Andropogon*, que apresentou capacidade de produção de matéria seca e raízes.

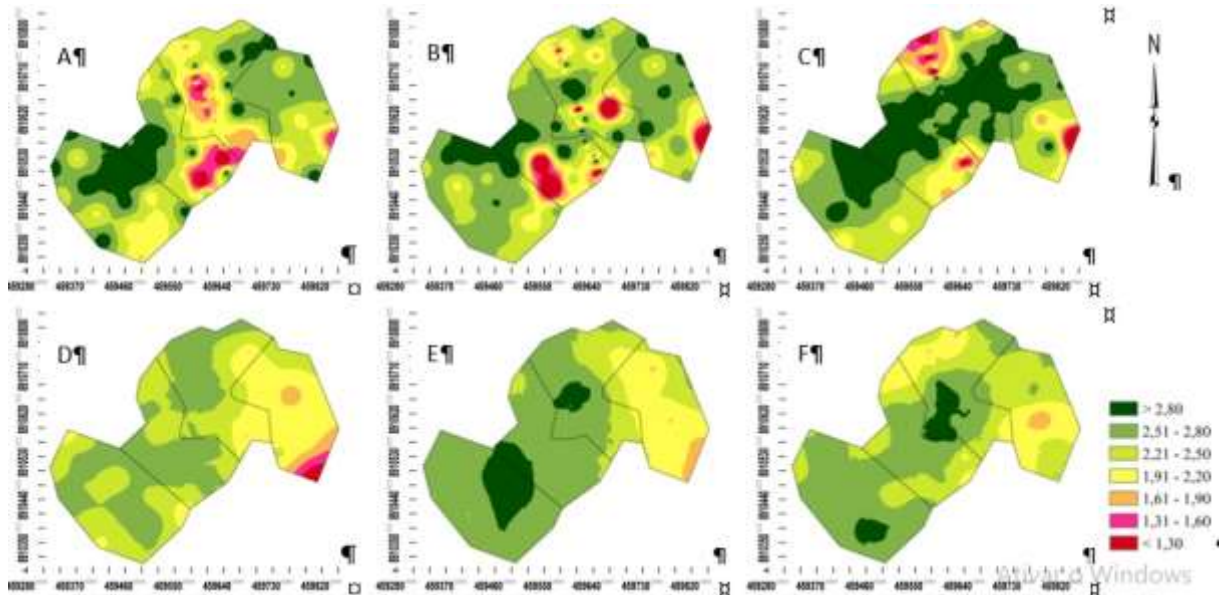


Figura 16 – Mapa de distribuição espacial para o Diâmetro Médio Ponderado (DMP), nos anos de 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico, no município de Gilbués, PI

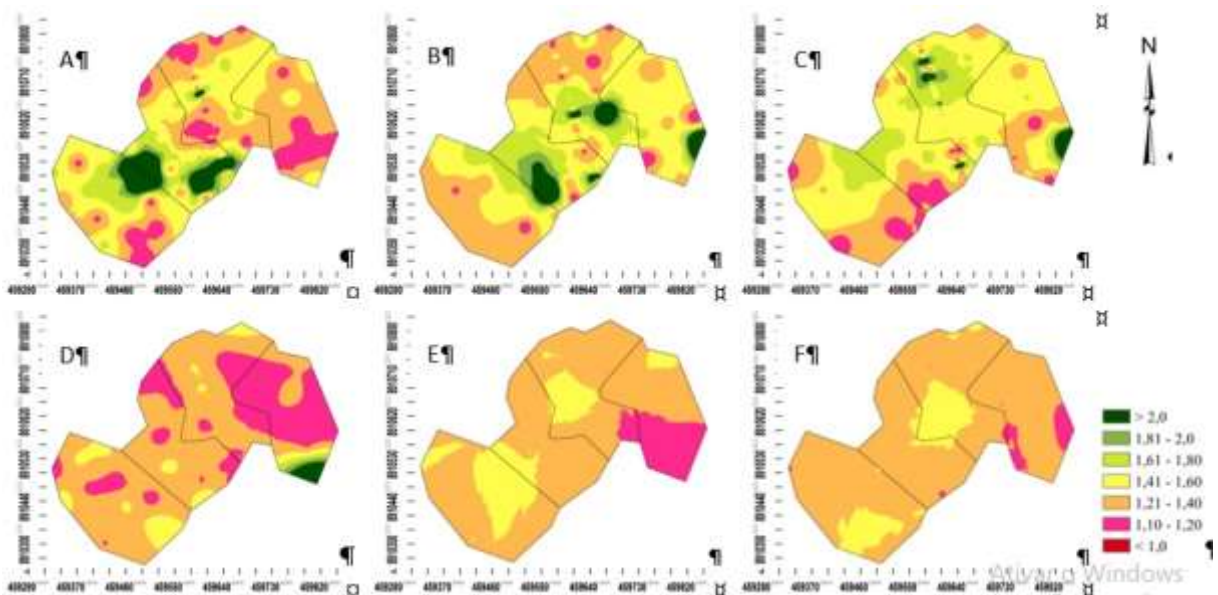


Figura 17 – Mapa de distribuição espacial para o Diâmetro Médio Geométrico (DMG), nos anos de 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico, no município de Gilbués, PI

Dos atributos apresentados na Tabela 8, verificou-se que os valores de média e mediana para os dados de densidade do solo apresentaram valores bem próximos uns dos outros, indicando, então, uma distribuição próxima à normal, e estão de acordo com as afirmações de Little e Hills (1978). Os valores de assimetria e curtose, para a mesma variável, encontraram-se bem próximos de 0 e 3, o que sugere normalidade dos dados, com exceção da profundidade de 0,05-0,10 m, no ano de 2010, que apresentou valor de assimetria bem afastado de zero (5,90), sinalizando uma distribuição assimétrica influenciada por valores extremos (OLIVEIRA *et al.*, 2015a). Neste sentido, o coeficiente de assimetria é mais sensível aos valores extremos que a média e o desvio padrão, já que um único valor pode influenciar fortemente esse coeficiente (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Dentre os atributos estudados, identificou-se que 55,5% dos resultados obtidos tiveram distribuição de frequência leptocúrtica, indicando, assim, uma homogeneidade dos dados, o que sugere maior concentração desses dados em torno da média. Já os 44,5% restantes, apresentaram distribuição de frequência planicúrtica, mostrando uma tendência de maior variabilidade dos dados. Desta forma, pode-se compreender que o presente trabalho tem uma grande variação na distribuição de frequência dos atributos citados.

Apesar de os atributos apresentarem assimetria, observa-se que os dados não mostraram assimetria acentuada, parecidos com o resultado encontrado para a densidade do solo na profundidade de 0,05-0,10 m, no ano de 2010, que apresentou valores de média e mediana, em sua maioria, próximos ao banco de dados, atendendo à condição de normalidade. Ou seja, os valores não são dominados por valores atípicos de distribuição, e são mais adequados para o uso da geoestatística (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

Verificou-se que, para todas as profundidades avaliadas nos dois períodos de estudo, a maior densidade encontrada ($1,73 \text{ g cm}^{-3}$) foi para a profundidade de 0,05-0,10 m, no ano de 2010, época em que a área apresentava menor quantidade de cobertura vegetal e um elevado nível de degradação, tanto do solo quanto da pastagem. Sendo assim, a densidade do solo é um importante indicativo das condições de seu manejo, pois reflete o arranjo das partículas do solo que, por sua vez, define as características do sistema poroso (LIMA, 2010).

Para Bowen e Kratky (1985), o valor crítico para a densidade do solo de textura argilosa é de $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$, enquanto que Arshad, Lowery e Grossman (1996) referem que o valor de densidade do solo, geralmente aceito como crítico, é de $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$; Sturmer (2008), por sua vez, indica que os valores de DS podem variar de 1,0 a $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ para solos argilosos. Desta forma, demonstrou-se que todos os valores médios encontrados para DS, com exceção

do valor para a profundidade 0,0-0,05 m, no ano de 2010, foram maiores que o valor considerado como crítico por Arshad, Lowery e Grossman (1996). Esses resultados corroboram com os obtidos por Pedron *et al.* (2011) que, estudando Neossolos Litólicos e Neossolos Regolíticos, identificaram características físico-hídricas atípicas, com DS elevada ($1,83 \text{ Mg m}^{-3}$). Ainda, faz-se relevante destacar que todos os valores médios encontrados estão dentro do intervalo proposto por Sturmer (2008) como valores intermediários.

Aferiu-se que, dentre os atributos citados, a macroporosidade apresenta-se como atributo sensível às alterações impostas ao solo, contribuindo para os baixos valores da porosidade total (GOMIDE; SILVA; SOARES, 2011).

Analisando os dados de macroporosidade, microporosidade e porosidade total, observou-se que os mesmos foram maiores no ano de 2010, com $9,6 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $45,58 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para macroporosidade e porosidade total; já para a microporosidade, o maior valor obtido foi para o ano de 2012 ($35,98 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Pode-se perceber que a microporosidade corresponde a, aproximadamente, 74,3% e 83,1% da porosidade total para os anos de 2010 e 2012, respectivamente. Para Kiehl (1979), o solo ideal deveria possuir a proporção de 1/3 de macroporos e 2/3 de microporos. Essa proporção não é observada nos resultados obtidos neste trabalho, uma vez que se obteve uma proporção aproximada de 1/5 e de 4/5 para a macroporosidade e microporosidade, respectivamente, nos dois anos analisados – resultados esses bem distantes do considerado ideal.

Esse aumento pode ter sido ocasionado das eluviações da argila e do silte presentes na área e/ou pelo aumento da infiltração da água no solo, como consequência inicial da perturbação do solo promovida pelas práticas de conservação aplicadas, uma vez que, principalmente, a estrutura de agregação do solo da área foi alterada. Em estudos realizados em regiões de cultivo em Planossolo Háplico, com sistema de preparo do solo convencional, tem-se observado a redução da macroporosidade do solo em virtude das eluviações de argila e silte, e de microagregados do solo (LIMA *et al.*, 2008).

Verificou-se, também, uma pequena diminuição do volume da macroporosidade de 2010 para 2012 ($9,6$ e $9,3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), tendo valores abaixo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o que é definido por Bonini *et al.* (2013) como sendo crítico para o desenvolvimento e crescimento do sistema radicular das culturas, e como inadequado por Gioia (2011), por ser menor que $0,17 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. A área em estudo, nos dois anos, apresentou macroporosidade abaixo da adequada, sendo considerada, portanto, como compactada. Pode-se ressaltar, ainda, uma provável influência do manejo do solo, de acordo com Gomide, Silva e Soares (2011), ao comprovarem a

sensibilidade da macroporosidade às alterações impostas ao solo, o que contribui para os baixos valores da porosidade total.

Souza e Alves (2003) citam que os valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ tornam-se críticos para o crescimento e o desenvolvimento radicular das plantas, contribuindo com o aumento da erosão hídrica, principalmente pela vulnerabilidade do solo ao impacto das gotas das chuvas. Bertol *et al.* (2004) encontraram pequena variação no volume de microporos em relação à variação ocorrida no volume de macroporos, demonstrando maior efeito de alterações da densidade nos macroporos, o que pode estar associado ao processo de gênese e formação do solo no caso dos microporos e ao manejo no caso dos macroporos.

A redução na P_T está associada à redução da macroporosidade e a um conseqüente incremento da microporosidade. A transformação de macroporos em microporos pode estar relacionada ao manejo adotado em função do tempo, o que pode ter modificado a estrutura do solo (MATIAS *et al.*, 2009). Esses efeitos são incrementados, provavelmente, pela água retida nos microporos, reduzindo a percolação de água no perfil e afetando a disponibilidade de água no solo (AGUIAR, 2008).

Os valores de P_T apresentaram comportamento inverso aos da DS , ou seja, à medida que a densidade aumenta, a porosidade total diminui. Essa influência é promovida pela maior aproximação das partículas do solo, com a conseqüente diminuição do seu espaço poroso. Esses resultados corroboram com os trabalhos de Jorge *et al.* (2012) e de Broch (2016).

A umidade volumétrica do solo da área em estudo na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), quando comparada aos resultados de 2010 e 2012, apresentou um aumento nos valores de ambas as variáveis, diferentemente da água disponível (AD), que teve uma diminuição de seu valor. Essa diminuição pode estar associada às alterações verificadas nos valores de DS , de macro e de microporosidade deste solo.

A umidade do solo na CC variou de $35,77$ a $36,62 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, em valores médios, para os anos de 2010 e 2012, respectivamente, obtendo um aumento de 2,45%. Essa menor retenção de água no potencial equivalente a capacidade de campo, no ano de 2012, pode estar ligado, possivelmente, ao aumento da camada de cobertura vegetal na área, ocasionado pela implantação das gramíneas, que pode ter promovido um melhor arranjo da agregação do solo, com um conseqüente aumento dos poros de drenagem. Os resultados indicam que, neste potencial, a água retida diminuiu à medida que se intensificou o uso do solo na área. Esse resultado diverge dos dados obtidos por Aguiar (2008) que, trabalhando em solos sob diferentes sistemas de cultivo, quando comparados com o solo sob vegetação natural de

cerrado, apresentou maior retenção de água em toda a faixa de potencial correspondente à capacidade de campo.

Identificou-se, na área avaliada, ano de 2012, que o uso do solo promoveu um aumento na capacidade de retenção de sua umidade, resultado que pode estar associado ao aumento dos valores de microporosidade (TABELA 7). Considerando o potencial de -1,5 MPa, correspondente ao ponto de murcha permanente, pode-se observar um aumento dos valores do PMP de 13,1% na região estudada para o ano de 2012, o que indica uma maior umidade na área quando comparada ao ano de 2010.

As variações observadas do ano de 2010 para 2012, referentes ao PMP, estão relacionadas, provavelmente, ao aumento da matéria orgânica, as quais podem ter determinadas alterações significativas na quantidade e na distribuição dos poros (SILVA *et al.*, 2004). Esse aumento ocorreu em função da reestruturação das partículas do solo após o manejo aplicado na área experimental, com revolvimento do mesmo, o que provocou uma perturbação nessas estruturas e resultou em um processo de agregação do solo e rearranjo interno de sua estrutura ao longo dos anos em função dos ciclos de umedecimento e secagem, de acordo com Reichert *et al.* (2009). Os efeitos decorrentes, embora possam incrementar a água retida nos microporos, frequentemente reduzem drasticamente a percolação de água no perfil, afetando, sobremaneira, a disponibilidade de água no solo (AGUIAR *et al.*, 2010).

Os resultados para a água disponível no solo apresentaram uma redução média de, aproximadamente, 36,42% do ano de 2010 para 2012, observando-se, ainda, um aumento nos valores de CC e PMP no mesmo intervalo de tempo. A área, por se tratar de um Neossolo Litólico, é um solo incipiente com propriedades físicas de retenção de água limitada (LIMA, 2013). Desta forma, a redução da porosidade foi o principal fator de variação do conteúdo de água disponível no solo.

Os resultados do teste de normalidade mostraram que a área, tanto no ano de 2010 como em 2012, apresentou mais de 70% dos atributos com distribuição normal dos dados. Nos casos em que a assimetria e a curtose tiveram grande variação, como no caso da densidade na profundidade de 0,05-0,10 m, em 2010, o teste de normalidade não aceitou a distribuição destes dados. Observou-se, então, que a normalidade da distribuição de frequência foi obtida em maior quantidade dentre os atributos no ano de 2012, com cerca de 39% dos resultados dentre as profundidades e os atributos analisados.

A análise dos dados demonstrou que não existem grandes modificações na distribuição de frequência quando se considera o conjunto dos atributos. Entretanto, identificou-se que houve alterações na distribuição, com aumento da variabilidade dos atributos DS nas

profundidades de 0,0-0,05 e 0,05-0,10 m, em 2010, e de 0,05-0,10 e 0,10-0,20, em 2012, e de AD e macroporosidade em 2012 e 2010, respectivamente.

Tabela 7 – Análise descritiva dos atributos do solo, nos anos de 2010 e 2012, nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Densidade do Solo										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.*
2010	0,0 - 0,05	1,049	1,577	1,391	1,388	0,097	6,952	-0,734	1,698	NS
	0,05 - 0,10	1,278	1,732	1,575	1,560	0,163	10,373	5,903	46,105	NS
	0,10 - 0,20	1,166	1,767	1,487	1,479	0,140	9,386	-0,196	-0,508	*
2012	0,0 - 0,05	1,236	1,599	1,415	1,408	0,081	5,736	0,133	-0,408	*
	0,05 - 0,10	1,098	1,697	1,423	1,452	0,126	8,880	-0,429	-0,379	NS
	0,10 - 0,20	1,271	1,807	1,559	1,564	0,118	7,581	-0,087	-0,727	NS
Capacidade de Campo (cm ³ cm ⁻³)										
2010	0,0 - 0,20	29,890	46,123	35,772	35,570	3,140	8,777	0,478	0,419	*
2012	0,0 - 0,20	28,373	45,251	36,385	36,622	3,897	10,711	0,191	-0,281	*
Ponto de Murcha (cm ³ cm ⁻³)										
2010	0,0 - 0,20	18,783	35,183	26,558	26,574	3,111	11,713	-0,110	0,140	*
2012	0,0 - 0,20	21,799	38,735	30,526	30,187	3,577	11,718	0,054	-0,333	*
Água Disponível (mm)										
2010	0,0 - 0,20	7,660	28,073	18,428	18,906	3,896	21,141	-0,510	1,050	*
2012	0,0 - 0,20	1,908	25,300	11,718	11,249	4,698	40,095	0,529	0,704	*
Macroporosidade (cm ³ cm ⁻³)										
2010	0,0 - 0,20	4,462	17,011	9,608	9,025	3,460	36,013	0,613	-0,490	NS
2012	0,0 - 0,20	3,708	14,729	9,382	9,575	2,632	28,056	-0,218	-0,366	*
Microporosidade (cm ³ cm ⁻³)										
2010	0,0 - 0,20	27,768	40,058	33,900	34,249	2,359	6,957	-0,112	0,181	*
2012	0,0 - 0,20	30,559	46,123	35,987	35,886	3,190	8,863	0,469	0,209	*
Porosidade Total (cm ³ cm ⁻³)										
2010	0,0 - 0,20	37,180	55,882	45,583	45,431	3,964	8,697	0,166	0,270	*
2012	0,0 - 0,20	34,403	51,773	43,282	43,678	3,390	7,832	-0,189	0,593	*

Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; \bar{X} : valor médio; Md: Mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Ass.: assimetria; Cur.: curtose; TN*: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (5% de significância) não significativo ^{NS}.

Em relação aos resultados do coeficiente de variação, pode-se entender que foram quase sempre superiores no ano de 2012, com exceção dos resultados para CC, PMP e AD. Isso mostra que houve uma maior homogeneização dos atributos analisados dentro da área,

provavelmente em virtude do tipo de sua utilização ao longo do experimento. Mesmo que os valores de CV tenham sido maiores no ano de 2012, aproximadamente 78% dos resultados apresentaram valores menores que 12%, sendo classificados como CV baixo de acordo com a classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980). As variáveis AD e macroporosidade, ambas em 2010 e 2012, apresentaram CV médio ($12\% < CV < 62\%$), o que demonstra que a dispersão dos valores em torno da média foram baixos. Em geral, a DS foi o atributo que apresentou o menor CV, corroborando com Warrick e Nielsen (1980) que apontaram a DS como o atributo que menos apresenta variação dentre os atributos físicos do solo.

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam que a degradação das propriedades físicas do solo, da área estudada, ocorreu em maior intensidade em função de suas condições iniciais antes da implantação do experimento, aliadas ao superpastejo e aos elevados teores de areia fina e silte no solo, com a presença de um Neossolo Litólico, ocasionando um aumento na DS e na microporosidade, e uma diminuição de PT e AD. Entretanto, Azevedo (2004) recomenda a descompactação do solo aliado ao manejo do gado e da pastagem, a fim de se corrigir os problemas decorrentes da degradação das propriedades físicas do solo ao longo do tempo.

Os ajustes dos semivariogramas experimentais e a análise de dependência espacial são apresentados na Tabela 9. Todas as variáveis apresentaram dependência espacial, com exceção de: DS, em 2010, na profundidade de 0,10-0,20 m; CC e macroporosidade, em 2012; microporosidade, em 2010; e, PMP, nos anos de 2010 e 2012, os quais produziram efeito pepita puro. Este fato afirma a ausência da dependência espacial, considerando que a distância utilizada entre os pontos amostrados não detectou a dependência espacial para essas variáveis.

Na análise dos semivariogramas, o modelo exponencial ocorreu em 44,4% das variáveis, o esférico em 22,3% e o efeito pepita puro em 33,3%. Os dois primeiros modelos citados foram os que melhor se ajustaram às variáveis analisadas nas profundidades avaliadas. Siqueira, Marques Junior e Pereira (2010) destacam os modelos esférico e exponencial como aqueles mais utilizados em ciências do solo e ambiental, demonstrando que não existe uma regra de qual modelo consegue explicar melhor a correlação ou a dependência espacial dos atributos do solo.

A razão entre o efeito pepita e o patamar (GDE) dos semivariogramas se configura como um indicativo da quantidade de variação ao acaso de um ponto para o outro, ou o grau de dependência espacial. Dessa forma, ao se estudar pontos adjacentes, quanto menor o seu valor, maior será a semelhança entre eles (CORADO NETO *et al.*, 2015b).

A análise da relação do grau de dependência espacial mostrou que as variáveis em estudo, na sua maioria, tiveram forte dependência espacial, com exceção da AD, em 2010, e da microporosidade, em 2012, apresentando moderada dependência de acordo com a classificação proposta por Cambardella *et al.* (1994). Observa-se, ainda, que a continuidade espacial da DS vai diminuindo à medida que avança o perfil do solo, o que resulta na possibilidade de amostragens em intervalos menores na profundidade inferior, com o intuito de não perder a dependência espacial. Sendo assim, os resultados mostraram que, em geral, os valores de dependências espaciais das variáveis do solo possibilitaram, segundo Gutjahr (1985), melhores estimativas pela krigagem.

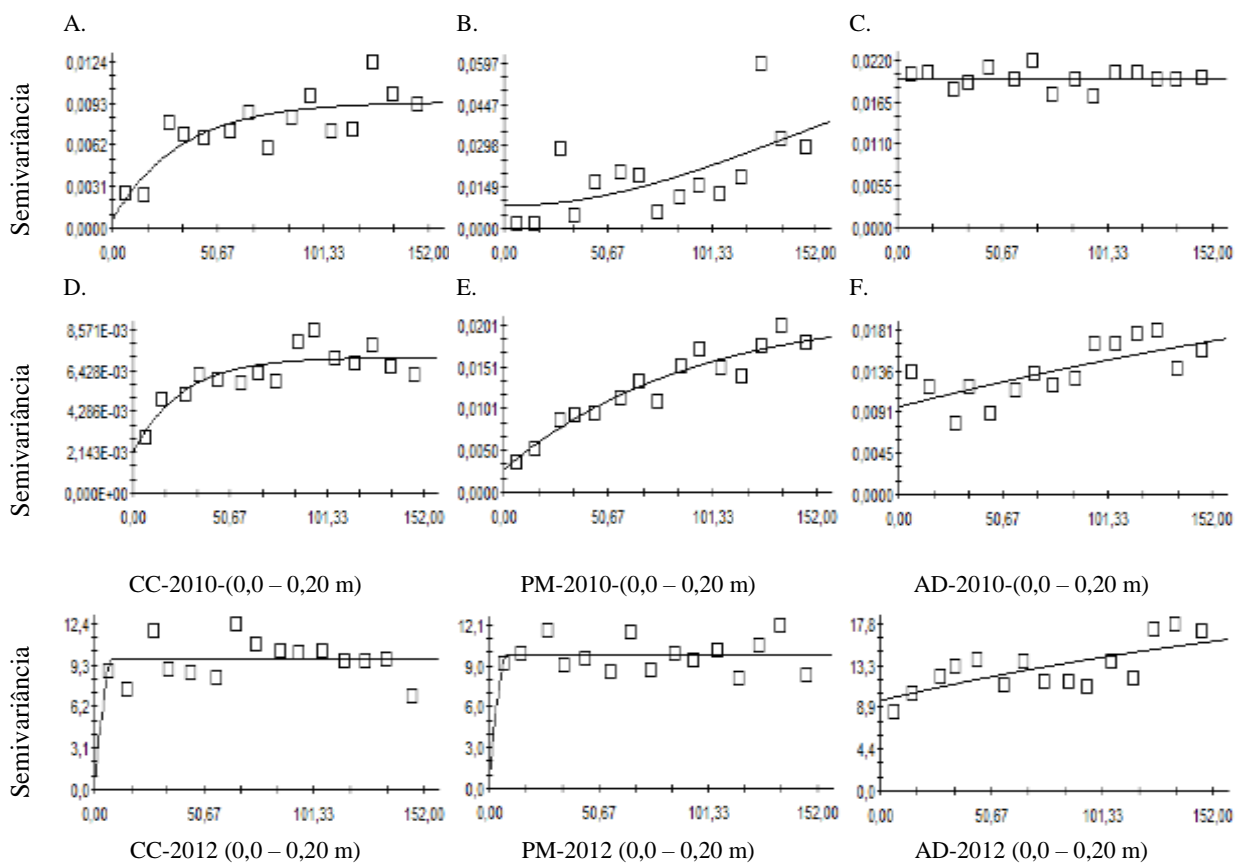
Tabela 8 – Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados para os dados de Densidade do Solo – DS (g cm^{-3}), Capacidade de Campo – CC ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ponto de Murcha Permanente – PMP ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Água Disponível – AD (mm), Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Porosidade Total – PT ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e valores de efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A), r^2 e dependência espacial, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Densidade do Solo								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	EXP	0,002850	0,0144	127,4	72,5	0,198	Forte
	0,05 - 0,10	ESF	0,0011	0,0366	200,60	63,10	0,030	Forte
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
2012	0,0 - 0,05	EXP	0,00143	0,00693	19,70	53,00	0,206	Forte
	0,05 - 0,10	ESF	0,00438	0,0232	31,80	97,60	0,189	Forte
	0,10 - 0,20	EXP	0,00226	0,01332	9,60	6,10	0,170	Forte
Capacidade de Campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)								
2010	0,0 - 0,20	ESF	1,79	9,6	22,6	17,9	0,186	Forte
2012		EPP	-	-	-	-	-	-
Ponto de Murcha ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)								
2010	0,0 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
2012		EPP	-	-	-	-	-	-
Água Disponível (mm)								
2010	0,0 - 0,20	EXP	9,18	21,43	163,4	67,5	0,428	Moderado
2012		ESF	2,19	22,04	41,2	64,9	0,099	Forte
Macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)								
2010	0,0 - 0,20	EXP	2,5	12,4	10,2	14,8	0,202	Forte
2012		EPP	-	-	-	-	-	-
Microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)								
2010	0,0 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-

2012		EXP	2,75	7,36	100,4	61,1	0,374	Moderado
Porosidade Total (cm ³ cm ³)								
2010	0,0 - 0,20	EXP	3	17,08	17,6	19,7	0,176	Forte
2012		EXP	2,42	11,55	9,1	15,2	0,210	Forte

C₀: efeito pepita; C₀+C₁: patamar; R²: coeficiente de determinação do modelo; EPP: efeito pepita puro; GDE: grau de dependência espacial; Efeito pepita: 100% do patamar; GDE: moderada quando estão entre 25% e 75%, fraca > 75% e forte < 25%.

O alcance é um parâmetro importante na análise geoestatística, uma vez que expressa a dependência espacial ou a distância em que uma variável pode apresentar ao mesmo efeito (SOARES *et al.*, 2018). Os atributos estudados exibiram diferentes valores de alcance, variando de 9,1 a 200,6 m, os quais, em sua maioria, são menores que o valor de espaçamento (30 m) utilizado na malha de amostragem para as variáveis, indicando que as amostras, em grande parte, não estão espacialmente relacionadas, não havendo continuidade na distribuição espacial dos dados. No entanto, a obtenção desses valores de alcance menores que o valor da malha amostral utilizada não significa, necessariamente, que não exista estrutura de variância, em função, provavelmente, da dependência espacial, que ocorre em menores distâncias entre os pontos de amostragem utilizadas (VIEIRA, 2000).



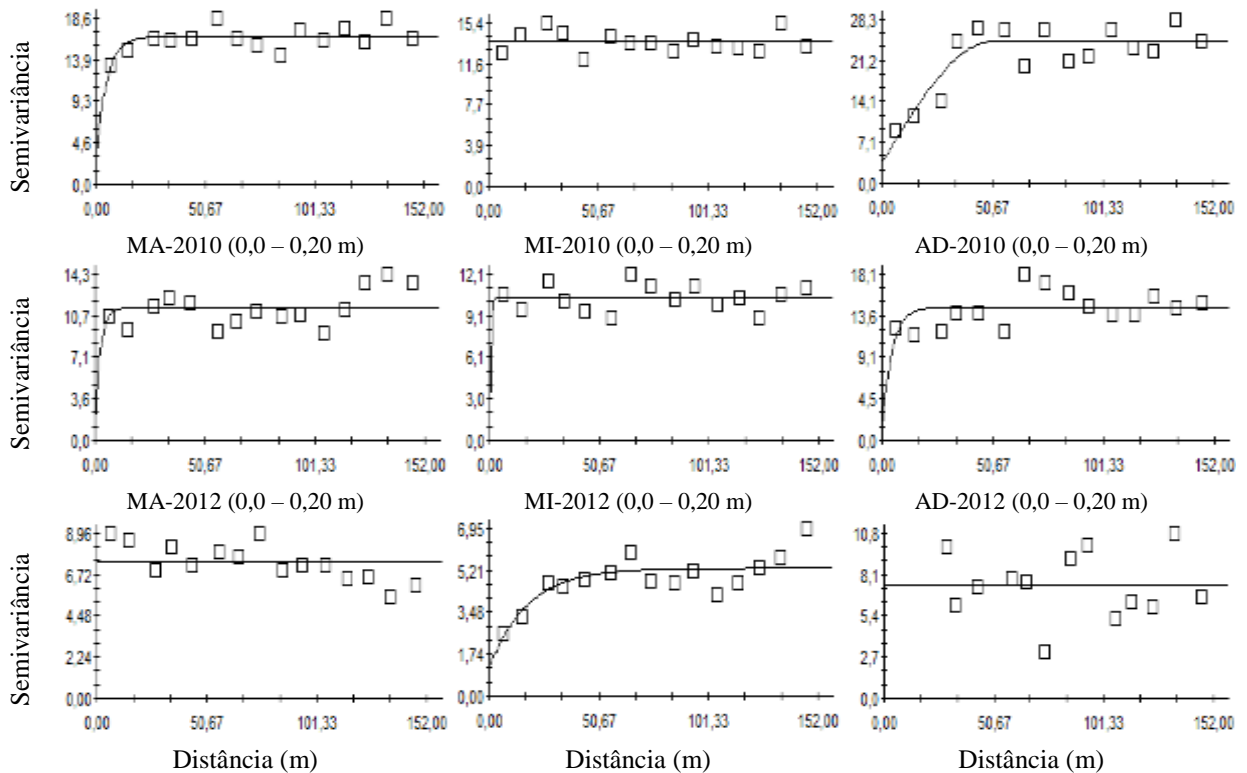


Figura 18 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente para: densidade do solo (A, B e C, em 2010, e D, E e F, em 2012); capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível (0,0-0,20 m, em 2010 e 2012); macroporosidade, microporosidade e porosidade total (0,0-0,20 m, em 2010 e 2012), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

Pode-se afirmar que quanto maior o alcance menor é a variabilidade, pois, consoante Marques Júnior *et al.* (2008), o alcance representa a distância em que os pontos amostrais estão correlacionados entre si, ou seja, os pontos localizados numa área de raio igual ao alcance são mais homogêneos entre si. Observou-se, também, que os valores de alcance e patamar variaram para cada atributo do solo. Estes valores, quando analisados no semivariograma, indicam o ponto em que a curva estabiliza, significando que, além destes valores, não possui mais correlação e não serão considerados na predição (SANCHEZ *et al.*, 2005).

A partir dos modelos aceitos, realizou-se a krigagem dos dados para a obtenção dos mapas de cada variável, que são demonstrados nas figuras 19, 20 e 21. As cores das imagens mais próximas ao verde escuro indicam maiores concentrações dos atributos, e as mais próximas do róseo menores concentrações.

A partir dos mapas foi possível identificar as áreas problemáticas do terreno e, no caso da DS, essas áreas (2010) se concentram na parte central e mais ao sul do terreno, parte que

apresenta maior declividade, solo mais raso, baixa cobertura vegetal e elevada presença de erosão laminar, comprovada pela presença de grandes voçorocas no perímetro da área. Essas maiores concentrações são comprovadas pelos mapas das figuras A, B, D, E e F; para o mapa C, optou-se pela interpolação com o inverso da distância (IDW). Porém, ressalta-se que foi limitante a utilização dos mapas obtidos por este processo de interpolação, sendo justificável em decorrência de que os procedimentos utilizados necessitavam dos mapas de cada atributo.

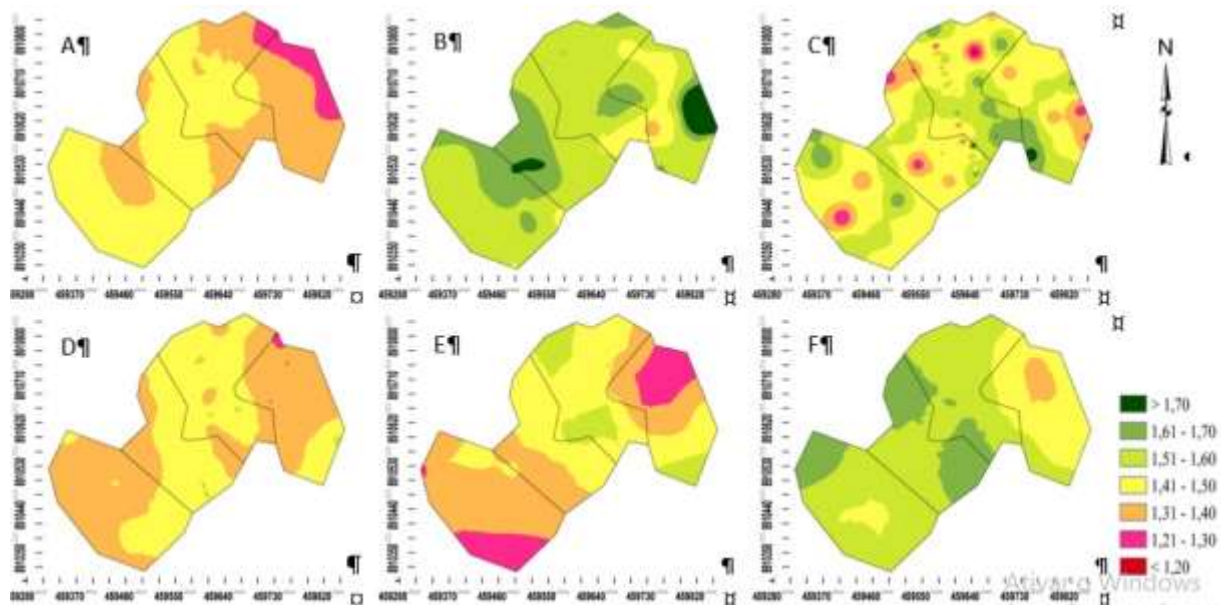


Figura 19 – Mapa de distribuição espacial para Densidade do solo (Ds), nos anos de 2010 (A, B e C) e de 2012 (D, E e F), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

Comparando os mapas de DS nos anos de 2010 e 2012, verificou-se que os pontos onde a densidade do solo foi menor no ano de 2012, coincidiram com os pontos onde o teor de carbono orgânico (CO) foi mais elevado, mostrando a interferência direta da CO na melhoria física do solo. Portanto, com o aumento do teor de CO houve uma diminuição da densidade do solo e um aumento da porosidade, e, conseqüentemente, maior capacidade de infiltração, retenção e armazenamento de água no solo, de acordo com os mapas de macro e microporos.

Ainda segundo os mapas, observou-se que houve um aumento nos valores de CC e PMP, o qual é evidenciado pelo aumento das áreas com as tonalidades em verde. Esse aumento ocorreu em pequenas áreas e de maneira isolada, onde se pode inferir que os tratamentos aplicados promoveram um aumento desses valores ao longo do tempo, provavelmente.

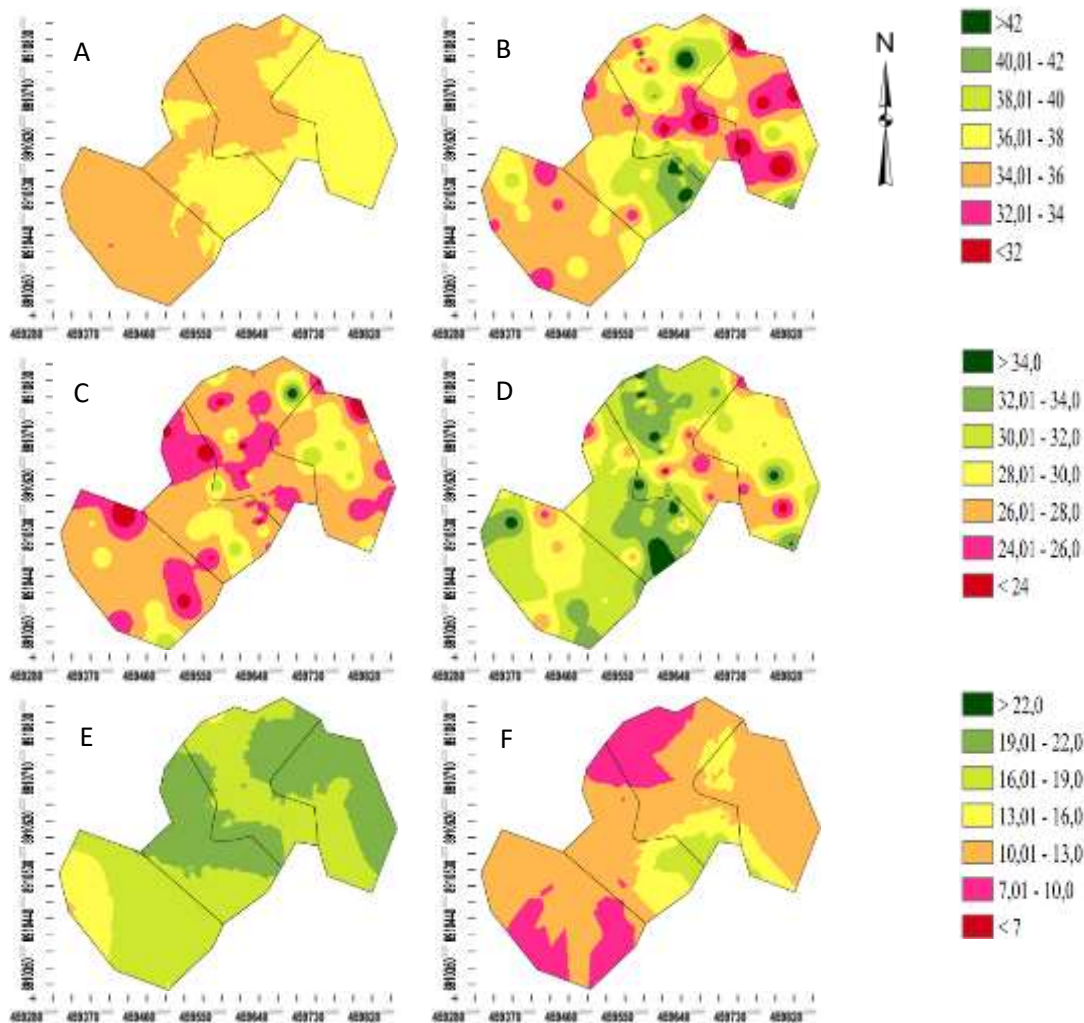


Figura 20 – Mapa de distribuição espacial para Capacidade de Campo – CC ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ponto de Murcha Permanente – PMP ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Água Disponível – AD (mm), nos anos de 2010 (A, C e E) e de 2012 (B, D e F), na camada de 0,0-0,20 m, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

O aumento dos valores de PMP indicaram um aumento da umidade do solo, requerendo uma atenção sobre as culturas a serem implantadas nestas áreas, uma vez que esse aumento pode promover uma maior concentração das raízes nas camadas mais superficiais, diminuindo, assim, a profundidade efetiva das raízes. Partelli *et al.* (2014) evidenciaram, em seu trabalho com cafeeiros em área irrigada, que houve uma concentração mais elevada das raízes na camada superior do solo (0-10 cm), as quais diminuiram com a profundidade, tendo concentrações mais baixas nas camadas inferiores a 40 cm.

A redução dos macroporos é acompanhada pelo aumento da microporosidade, atributo esse que apresenta interação significativa entre o uso do solo e a profundidade (FIGURA 21),

sendo a quantidade de microporos mais variável temporal que espacialmente. O aumento dos microporos ocorreu, principalmente, na parte central da área experimental, onde também foram observados os maiores aumentos de DS.

A ocorrência de pequenas áreas com concentrações de cores de contorno fechado sugere o acontecimento de variações nos valores da macroporosidade e microporosidade nos anos de 2012 e 2010, respectivamente. Essa ocorrência de flutuações nos valores, em intervalo de espaço amostral, demonstram que, na maioria dos pontos, a macroporosidade se encontra no intervalo de 8 a 10,9 cm cm^{-3} e a microporosidade de 34 a 37 cm cm^{-3} . Verificou-se que a ocorrência dos maiores valores é constatada em pontos mais isolados e distantes entre si, representados pela cor verde mais escura no mapa.

O volume total de poros tem relação inversamente proporcional com a densidade do solo, portanto, a distribuição para essa variável apresentou-se de modo inverso à observada na densidade do solo. Segundo Fernandes, Corá e Braz (2006), a PT pode não aportar as informações necessárias para estudos sobre a qualidade do solo, uma vez que as mudanças de uso do solo podem alterar o tamanho e a continuidade entre os poros, sem, no entanto, refletir nos dados de PT.

Fazendo-se uma correlação entre os mapas da PT (figuras 21E e 21F), com os valores de DS (figuras 19C e 19F), e os mapas de microporosidade (figuras 21C e 21D), detecta-se forte relação entre esses atributos, sendo os maiores valores de microporosidade e os menores valores de PT, decorrente do menor arejamento proporcionado pelo arranjo físico das partículas do solo, o qual permite uma menor passagem de água, ilustrando, com isso, a precisão da técnica de geoestatística e da krigagem na confecção dos mapas.

Os problemas causados pelo pisoteio animal, associados à intensificação do relevo do solo, foram os que contribuíram para as mudanças em sua estrutura física, provavelmente. Essa combinação, associada à ausência de um manejo adequado para essas áreas antropizadas, com a conformação e o tipo de uso, possivelmente, foram os fatores que mais auxiliaram para a degradação do solo ao longo do tempo.

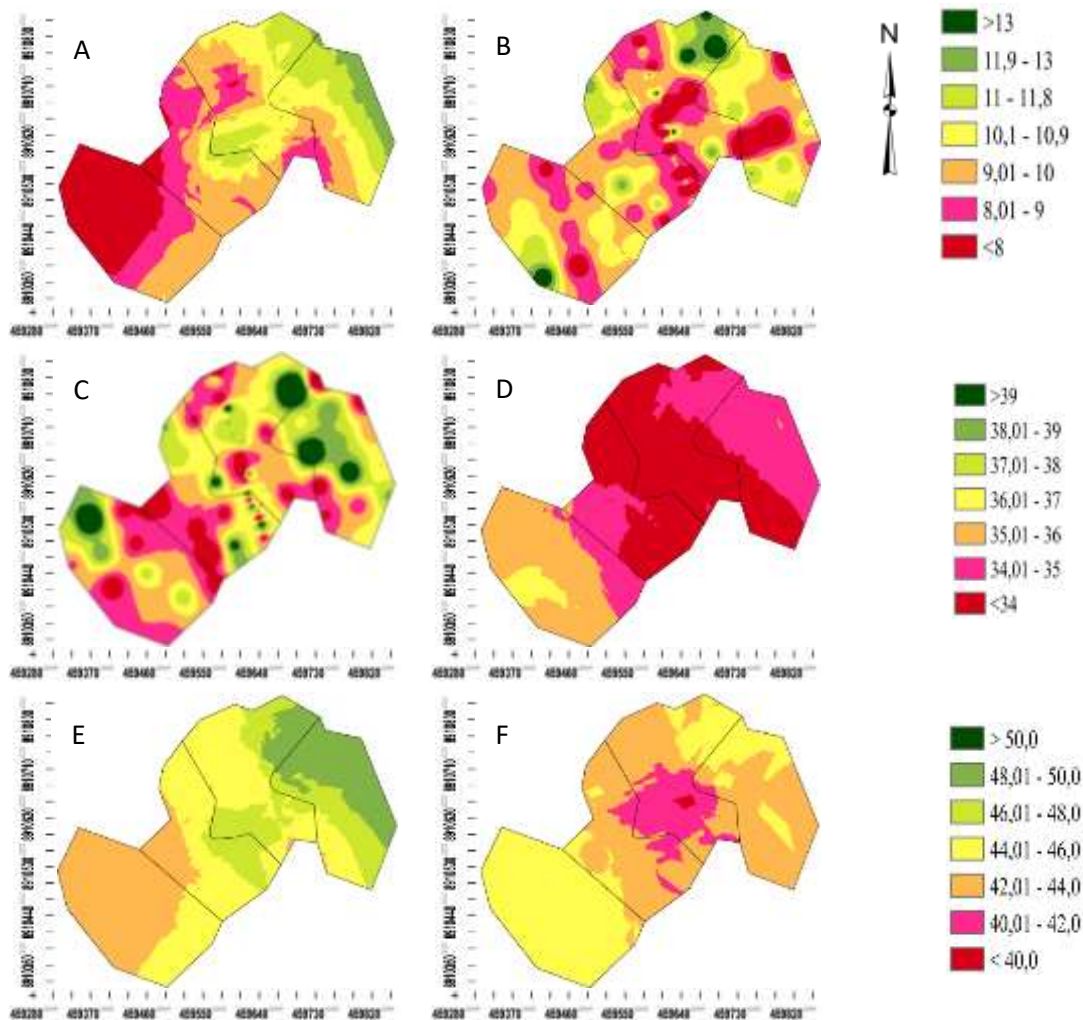


Figura 21 – Mapa de distribuição espacial para macroporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), microporosidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) e Porosidade Total – PT ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), em 2010 (A, C e E) e 2012 (B, D e F), nas camadas de 0,0-0,20 m de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

3.4 Atributos químicos do solo

Nas tabelas 9 e 10, observa-se que a maior parte dos seus atributos apresentou valores de média e mediana próximos, indicando, com isso, distribuição próxima à normal, com exceção dos valores de P, os quais se mostraram variáveis.

Na análise dos valores de assimetria e curtose das variáveis pH, P, K e Mg, nos anos de 2010 e 2012, em ambas as profundidades, com a MO, em 2012, nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, e o Ca nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, em 2010, e de 0-0,05 m, em 2012, não apresentaram valores de assimetria próximos de zero e de curtose próximos de três, apontando uma distribuição não normal de frequência, de acordo com os resultados do

teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância. A MO de 0,05-0,10 m (em 2010) e 0-0,05 e 0,10-0,20 m (em 2012), o Ca em 0,10-0,20 m (em 2010) e 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m (em 2012) e o Mg em 0-0,05 m (em 2010) apresentaram distribuição normal de frequência, sinalizando que a média e a mediana possuem valores próximos.

Para Cambardella *et al.* (1994), os valores de medidas de tendência central apresentam-se relativamente semelhantes para a maioria dos atributos, demonstrando que as mesmas não são dominadas por valores atípicos em sua distribuição, o que evidencia que a maior parte das medidas de tendência dos atributos não é dominada por valores atípicos.

Ainda, todas as variáveis apresentadas nas tabelas 10 e 11, com exceção do pH (em 2010) e do P, apresentaram CV médio ($12 < CV < 62$), enquanto que o CV do pH (em 2010) foi baixo e o do P alto. Warrick e Nielsen (1980) ressaltaram que o atributo P, em ambas as profundidades nos dois anos analisados, apresentou alto valor de CV, indicando que este atributo apresenta elevada variabilidade, podendo não ser detectada por causa da distância da coleta de solo das áreas.

Os valores elevados nos CV são considerados como indicadores de heterogeneidade dos dados avaliados e suas variações, nos quais se mostram diferentes graus de heterogeneidade entre os atributos do solo na área amostrada. Esta heterogeneidade pode ser atribuída aos processos de formação inerentes a esses solos, que ocorrem pela acumulação e distribuição desuniformes de sucessivos depósitos de materiais provenientes de outros lugares, proporcionados pela posição topográfica que ocupam, provavelmente (SANCHEZ *et al.*, 2009).

Em relação a matéria orgânica, os valores médios variaram entre $12,83 \text{ g dm}^{-3}$, na camada de 0,05-0,10 m, no ano de 2010, e $21,44 \text{ g dm}^{-3}$, no ano de 2012, na camada de 0-0,05 m; esses valores se mostraram superiores nas camadas superficiais, o que também foi observado por Alves (2010). Segundo Mafra *et al.* (2008), em culturas perenes, a MO acumulada na superfície do solo é constituída de material vegetal, transferido pela contínua deposição de serapilheira.

Alves (2010) ainda avaliou os teores de MO do solo sob diferentes coberturas vegetais (pinhão manso, espécies nativas e pinhão manso mais espécies nativas), e obteve como resultados que a área de pinhão manso foi a que continha maior teor de MO nas camadas superficiais do solo. Esses resultados são confirmados pelos obtidos por Veloso *et al.* (2011) que, avaliando as características químicas de um Neossolo Litólico cultivado com pinhão manso, em Gilbués/PI, encontraram os maiores teores de MO nas camadas superficiais do solo.

Os valores médios de pH variaram de 6,64 a 6,85, em 2010, e de 6,61 a 6,71, em 2012, nas camadas de 0-0,05 e 0,10-0,20 m, para os dois anos respectivamente, sendo que essa variação indicou que as áreas não necessitavam de calagem. Tais valores ficaram acima, em média, 51% dos valores encontrados no mesmo município (CARNEIRO *et al.*, 2017).

Tabela 9 – Análise descritiva dos atributos do solo matéria orgânica (g.kg^{-1}) e pH (H_2O) nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Matéria Orgânica (g.kg^{-1})										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.*
2010	0,0 - 0,05	2,873	26,657	12,69	12,16	5,16	40,65	0,67	0,56	NS
	0,05 - 0,10	1,606	26,289	12,83	12,35	5,81	45,33	0,40	-0,27	*
	0,10 - 0,20	1,755	25,696	11,55	10,85	5,48	47,46	0,49	0,26	NS
2012	0,0 - 0,05	5,106	55,632	21,44	19,91	8,96	41,78	0,85	1,73	*
	0,05 - 0,10	7,344	41,331	19,41	18,79	6,69	34,49	0,56	0,44	NS
	0,10 - 0,20	1,995	27,969	15,08	14,89	5,83	38,66	0,07	-0,66	*
pH (H_2O)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	5,51	8,27	6,64	6,43	0,76	11,49	0,70	-0,55	NS
	0,05 - 0,10	5,41	8,46	6,65	6,43	0,79	11,84	0,74	-0,52	NS
	0,10 - 0,20	5,57	8,47	6,85	6,56	0,79	11,52	0,76	-0,58	NS
2012	0,0 - 0,05	5,19	8,71	6,61	6,34	0,89	13,47	0,88	-0,27	NS
	0,05 - 0,10	5,39	8,78	6,53	6,24	0,88	13,47	0,99	-0,09	NS
	0,10 - 0,20	5,64	8,76	6,71	6,30	0,89	13,33	0,91	-0,57	NS

Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; \bar{X} : valor médio; Md: Mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Ass.: assimetria; Cur.: curtose; TN*: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (5% de significância) não significativo ^{NS}.

Considerando os valores médios observados para os teores de P, K, Ca e Mg, de uma maneira geral, pode-se afirmar que os teores caracterizam os solos da área como de alta fertilidade, consoante a classificação constante da tabela de referência para interpretação dos resultados de análise do solo proposta por Alvares *et al.* (1999).

Os valores mais elevados desses nutrientes, no ano de 2010, podem estar relacionados ao grau de exposição do material de origem do solo da região, provocado pela erosão. Desta forma, à medida que os sedimentos das camadas superficiais vão sendo carreados, os horizontes mais próximos à rocha de origem dos solos são expostos – essas matrizes, por ainda não terem sofrido intemperismo, preservam os nutrientes da época de sua formação. Os altos teores de nutrientes identificados na pesquisa podem ser justificados pela composição

mineralógica do material de origem, que determina a maior ou menor disponibilidade dos elementos minerais no solo (MEURER, 2012).

Observa-se que os valores médios de P apresentaram amplitudes de seus valores mínimos e máximos, variando de 0,6 mg dm³, na camada de 0,10-0,20 m, em 2012, a 483 mg dm³, na camada de 0,05-0,10 m, em 2010, variação que foi de 805%. Comparando-se os dois anos, identificou-se que as maiores amplitudes encontradas foram nas camadas de 0,05-0,10 m, em 2010 (3,30 a 483 mg.dm³), e de 0,10-0,20 m, em 2012 (0,6 a 390 mg.dm³), que equivalem a uma diferença de 146,4% e 650%, respectivamente. Portanto, os valores de P, em todas as profundidades avaliadas, nos dois anos, variaram de muito baixo (≤ 10 mg.dm⁻³) a muito bom (> 45 mg.dm⁻³), segundo a classificação do teor de P no solo citada por Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999).

Dentre os valores de P e K existe uma diminuição de seus teores entre os anos de 2010 e 2012, sendo mais acentuada no P, onde, em média, foi observado que seus valores diminuíram 18,2%, 7,46% e 28,10%, entre os dois anos, nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente. Por outro lado, o K apresentou menor queda, diminuindo 7,54% e 5,26% nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, e se mantendo estável na profundidade de 0,10-0,20 m.

Observa-se que a diminuição dos teores de P e K está ligada à implantação do pinhão manso em consórcio com as gramíneas, momento em que as culturas extraem parte destes nutrientes para seu crescimento e desenvolvimento. Laviola e Dias (2008), avaliando a composição e o acúmulo de NPK em folhas e frutos de pinhão manso, estimaram que a cultura do pinhão pode exportar, em seu terceiro ano de cultivo, com uma produção esperada de 2.000 g por planta, as quantidades de 11,42 e 41,47 gramas de P e K por planta.

Com base no trabalho de Laviola e Dias (2008), e considerando o espaçamento do pinhão manso de 4 x 3 m, correspondendo a uma população de 833 plantas por hectare, e uma produtividade média obtida no terceiro ano de trabalho de 232,8 g por planta, tem-se que a extração de nutrientes corresponde a uma retirada de 0,368 e 1,341 mg dm⁻³ de P e K, respectivamente. Portanto, os valores encontrados representam apenas uma fração do quantitativo a ser exportado pela cultura, uma vez que também se deve levar em consideração a quantidade de nutrientes alocados nas outras partes da planta. Ainda a este respeito, Freiburger *et al.* (2013) identificaram valores de extração de P e K, pelos frutos, de 1902,1% (7 mg dm⁻³) e de 1865,6% (25 mg dm⁻³).

O teor de P do solo é importante nas regiões em processo de desertificação, pois a sua deficiência reduz a taxa de crescimento inicial e o estabelecimento das plantas forrageiras,

limitando, assim, a capacidade produtiva das culturas (CECATO *et al.*, 2004). Embora os valores encontrados sejam altos, não significam disponibilidade para as plantas, uma vez que o P é um elemento de baixa mobilidade no solo, sendo, em geral, o pH que proporciona sua maior disponibilidade para as plantas (FAQUIN, 2005).

Observa-se que o K, sendo mais exigido pela cultura do pinhão manso do que o P, apresenta uma menor diminuição em seus teores, entre os anos estudados, do que o P, pois teve uma diminuição média de 6,4% contra uma redução de 17,91% do P. Neste sentido, faz-se importante adubações potássicas realizadas todos os anos no início do período chuvoso da região.

Com relação ao Ca, observa-se que seus valores médios variaram de 19,9 a 16,64 $\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ na camada de 0-0,05 m e de 24,25 a 22,58 $\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ na camada de 0,10-0,20 m, nos anos de 2010 e 2012 respectivamente. Portanto, mesmo que os quantitativos estejam diminuindo ao longo do tempo, continuam sendo considerados muito bons com essas concentrações encontradas, as quais são aceitáveis dentro da faixa de um crescimento adequado para a espécie. Desta forma, para um bom crescimento do sistema radicular é preciso que o Ca esteja presente no volume de solo nas profundidades superficiais de 0-0,20 m, que são ocupadas pela maior parte das raízes efetivas para que consigam ficar em contato com o nutriente.

Tabela 10 – Análise descritiva dos atributos do solo fósforo ($\text{mg} \cdot \text{dm}^3$), potássio ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^3$), cálcio ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^3$) e magnésio ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^3$), nos anos de 2010 e 2012, nas profundidades 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Fósforo ($\text{mg} \cdot \text{dm}^3$)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	3,00	400,00	131,92	102,10	95,86	72,67	1,00	0,61	NS
	0,05 - 0,10	3,30	483,00	108,00	86,50	98,66	91,35	1,63	3,43	NS
	0,10 - 0,20	1,30	434,00	106,34	76,50	100,19	94,21	1,02	0,50	NS
2012	0,0 - 0,05	1,90	357,00	107,91	90,60	83,46	77,34	0,91	0,23	NS
	0,05 - 0,10	2,30	306,36	99,94	82,05	75,73	75,78	0,97	0,50	NS
	0,10 - 0,20	0,60	390,00	76,46	59,15	80,58	105,39	1,74	3,28	NS
Potássio ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^3$)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	0,21	8,00	0,53	0,39	0,89	169,63	7,76	64,06	NS
	0,05 - 0,10	0,14	3,90	0,38	0,30	0,42	114,89	7,93	67,57	NS
	0,10 - 0,20	0,10	0,70	0,29	0,28	0,12	41,74	1,28	2,40	NS
2012	0,0 - 0,05	0,06	1,13	0,49	0,45	0,25	50,60	0,62	-0,20	NS

	0,05 - 0,10	0,17	0,90	0,36	0,35	0,15	38,96	0,96	1,06	NS
	0,10 - 0,20	0,11	0,74	0,29	0,28	0,12	39,94	1,05	1,65	NS
Cálcio ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	10,47	36,12	19,19	17,21	6,68	34,79	0,76	-0,41	NS
	0,05 - 0,10	8,19	36,71	21,86	20,50	6,72	30,75	0,32	-0,81	NS
	0,10 - 0,20	11,75	38,70	24,25	23,50	6,19	25,52	0,07	-0,66	*
2012	0,0 - 0,05	5,54	35,47	16,64	15,14	5,95	35,73	0,93	0,83	NS
	0,05 - 0,10	0,28	36,10	19,03	17,97	7,17	37,66	0,25	-0,05	*
	0,10 - 0,20	7,50	36,13	22,58	22,40	7,34	32,52	0,17	-0,71	*
Magnésio ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	1,41	10,08	4,27	4,08	1,91	44,80	0,79	0,31	*
	0,05 - 0,10	1,30	9,97	4,22	3,85	1,97	46,71	1,07	1,05	NS
	0,10 - 0,20	0,96	10,74	4,21	3,71	2,14	50,81	1,25	1,36	NS
2012	0,0 - 0,05	0,22	1,87	0,76	0,66	0,36	47,54	1,15	1,22	NS
	0,05 - 0,10	0,01	2,41	0,77	0,69	0,45	58,21	1,57	3,46	NS
	0,10 - 0,20	0,21	2,26	0,77	0,67	0,42	53,97	1,42	2,59	NS

Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; \bar{X} : valor médio; Md: Mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Ass.: assimetria; Cur.: curtose; TN*: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (5% de significância) não significativo ^{NS}.

Os teores médios de Mg demonstraram que não houve tendência de diminuição em função da profundidade do solo, com predominância de teores muito altos nas três camadas estudadas para o ano de 2010, e médio teor nas três camadas no ano de 2012. Observou-se, ainda, que existe uma variação de, aproximadamente, três unidades entre os anos, nas três profundidades avaliadas, alterando de 4,27 (em 2010) a 0,76 $\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ (em 2012), com uma tendência de diminuição em função da profundidade do solo em 2010 e de aumento em 2012. Resultados similares, quanto aos teores obtidos em 2012, foram encontrados por Sanchez *et al.* (2009) em trabalho com área degradada no Rio Grande do Norte, com valores de Ca e Mg com tendência de aumento em função da profundidade.

Os resultados analíticos dos atributos químicos avaliados foram utilizados para a geração de semivariogramas, com a finalidade de estimar suas dependências espaciais. Assim, as variáveis foram analisadas a partir dos semivariogramas e dos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais, considerando-se individualmente cada atributo e, também, o conjunto de dados representado para cada profundidade de solo. Os modelos de ajuste para os semivariogramas, com seus respectivos parâmetros, nas três profundidades avaliadas, são apresentados nas tabelas 11 e 12.

Identificou-se que a distribuição no espaço da maioria dos atributos não é aleatória, uma vez que todos apresentaram dependência espacial, o que demonstra que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais. As exceções foram os dados de MO nas profundidades de 0-0,05 e 0,10-0,20 m, em 2010, e de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, em 2012, do pH na camada de 0,10-0,20 m, em 2012, e do P na camada de 0,05-0,10 m, em 2010, e de 0-0,05 e 0,10-0,20 m, em 2012.

Com relação aos semivariogramas obtidos para os atributos químicos, observou-se que 75% apresentaram-se bem ajustados aos modelos teóricos, com valor de coeficiente de determinação (R^2) médio de 81,1%, ou seja, no mínimo 81,1% da variabilidade existente nos valores da semivariância estimada são explicadas pelos modelos ajustados (CAMPOS *et al.*, 2007). Os modelos esféricos e Gaussianos foram aqueles que melhor se ajustaram aos dados dos semivariogramas dos atributos do solo nas três profundidades avaliadas (tabelas 12 e 13 e figuras 22, 23 e 24). As exceções foram os semivariogramas obtidos para o teor de K, nas profundidades de 0-0,05 e 0,10-0,20 m (em 2010) e de 0-0,05 m (em 2012), e de Ca, nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m (em 2010), uma vez que se ajustaram melhor ao modelo exponencial.

Para os atributos químicos analisados (tabelas 12 e 13), verificou-se que o modelo do tipo esférico foi o que permitiu o melhor ajuste dos dados dos semivariogramas da maioria dos atributos, apresentando, em média, R^2 igual a 70%. O modelo Gaussiano se ajustou melhor a 27,7% dos dados nas três profundidades estudadas, com R^2 médio igual a 79%. Já o modelo exponencial se ajustou melhor a 13,8% dos dados, com R^2 médio de 73,9%. Estes resultados estão em concordância com os obtidos em trabalhos de variabilidade espacial de atributos do solo, que indicam o modelo esférico como predominante nos trabalhos em ciência do solo (SIQUEIRA; VIEIRA; CEDDIA, 2008; GUEDES FILHO *et al.*, 2010; SANCHEZ *et al.*, 2009).

Tabela 11 – Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados para os dados de matéria orgânica (g.kg^{-1}) e pH (H_2O) nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Ano	Prof. (m)	Modelo	Matéria Orgânica (g.kg^{-1})					
			C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,05 - 0,10	ESF	7,19	34,62	36,20	64,20	0,21	Forte
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
2012	0,0 - 0,05	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-

pH (H ₂ O)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	A	r ²	C ₀ /C ₀ +C ₁	GDE
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
2010	0,0 - 0,05	GAU	0,24	1,35	170,20	92,30	0,18	Forte
	0,05 - 0,10	ESF	0,22	1,40	410,90	88,00	0,16	Forte
	0,10 - 0,20	GAU	0,32	2,65	275,60	90,40	0,12	Forte
	0,0 - 0,05	ESF	0,24	1,35	242,30	93,20	0,30	Moderado
	0,05 - 0,10	GAU	0,32	2,13	165,90	80,10	0,15	Forte
2012	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-

C₀: efeito pepita; C₀+C₁: patamar; R²: coeficiente de determinação do modelo; EPP: efeito pepita puro; GDE: grau de dependência espacial; Efeito pepita: 100% do patamar; GDE: moderada quando estão entre 25% e 75%, fraca > 75% e forte < 25%.

Os atributos do solo foram classificados de acordo com a magnitude da sua dependência espacial, considerando o efeito pepita observado (C₀). Quando a contribuição do efeito pepita para a variância total da população é elevada, é possível a ocorrência de erro analítico. Assim sendo, a variabilidade não explicada pode ser em virtude da descontinuidade da variação dos dados a distâncias menores que as amostradas (SANCHEZ *et al.*, 2009). Por esse critério, quanto menor a proporção do C₀ em relação ao patamar (C₀+C₁), maior a continuidade e maior a dependência espacial apresentada pelo atributo (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

Desta forma, de acordo com a relação C₀/(C₀+C₁) (tabelas 11 e 12), há de moderada a forte dependência espacial para todos os atributos estudados, sem exceção. Isso indica uma significativa variabilidade do solo da área de estudo, sendo que uma amostragem mais intensiva poderia revelar ainda maior continuidade espacial dos atributos avaliados.

Dentre os atributos apresentados nas tabelas 12 e 13, verifica-se que 50% dos dados apresentaram forte dependência e 22,2% tiveram moderada dependência espacial, sendo que os teores de: MO (0,05-0,10 m), em 2010; pH em todas as profundidades para 2010 em (0,05-0,10 m); P (0-0,05 m), em 2010, e (0,05-0,10 m), em 2012; K (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), em 2010 e 2012; Ca (0,0-0,05 e 0,05-0,10 m), em 2010; Mg (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), em 2010; e, todas as profundidades em 2012 apresentaram forte dependência espacial. Já em pH (0,0-0,05 m), em P (0,10-0,20 m), em 2010, e em Ca (0,10-0,20 m), em 2010, com todas as profundidades de 2012, e em Mg (0,0-0,05), em 2010, foi observada a moderada dependência espacial.

Tabela 12 – Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados para os dados de fósforo ($\text{mg}\cdot\text{dm}^3$), potássio ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^3$), cálcio ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^3$) e magnésio ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^3$), e valores de efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A), r^2 e dependência espacial, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Fósforo ($\text{mg}\cdot\text{dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	GAU	480	7830	111,00	62,20	0,06	Forte
	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,10 - 0,20	GAU	3730	10220	18,40	44,40	0,36	Moderado
2012	0,0 - 0,05	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,05 - 0,10	ESF	830	10160,00	40,80	61,40	0,08	Forte
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
Potássio ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	EXP	0,001	1,76	150,90	68,5	0,005	-
	0,05 - 0,10	ESF	0,018	0,198	13,400	55,800	0,093	Forte
	0,10 - 0,20	EXP	0,016	0,164	17,800	48,900	0,097	Forte
2012	0,0 - 0,05	EXP	0,040	0,101	178,40	89,200	0,391	Moderado
	0,05 - 0,10	ESF	0,001	0,024	13,500	61,200	0,026	Forte
	0,10 - 0,20	GAU	0,000	0,012	11,200	67,000	0,003	Forte
Cálcio ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	GAU	17,800	86,600	131,900	97,500	0,206	Forte
	0,05 - 0,10	ESF	15,400	68,450	244,700	94,900	0,225	Forte
	0,10 - 0,20	GAU	24,000	65,520	156,400	88,900	0,366	Moderado
2012	0,0 - 0,05	EXP	22,700	74,340	108,600	71,800	0,305	Moderado
	0,05 - 0,10	EXP	31,100	64,900	87,500	91,100	0,479	Moderado
	0,10 - 0,20	ESF	22,600	59,150	88,800	84,900	0,382	Moderado
Magnésio ($\text{cmol}_c\cdot\text{dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	GAU	0,069	0,218	52,800	85,300	0,314	Moderado
	0,05 - 0,10	GAU	0,049	0,223	22,200	82,800	0,222	Forte
	0,10 - 0,20	ESF	0,012	0,244	61,700	88,400	0,047	Forte
2012	0,0 - 0,05	ESF	0,001	0,134	72,200	51,300	0,001	Forte
	0,05 - 0,10	ESF	0,001	0,207	71,800	47,600	0,001	Forte

0,10 - 0,20	ESF	0,007	0,182	69,400	47,900	0,036	Forte
-------------	-----	-------	-------	--------	--------	-------	-------

C₀: efeito pepita; C₀+C₁: patamar; r²: coeficiente de determinação do modelo; EPP: efeito pepita puro; GDE: grau de dependência espacial; Efeito pepita: 100% do patamar; GDE: moderada quando estão entre 25% e 75%; fraca > 75% e forte < 25%.

Conforme Cambardella *et al.* (1994), quanto mais forte for a dependência espacial apresentada pelos atributos do solo, mais influenciados eles serão pelas propriedades intrínsecas do solo, como textura e mineralogia; já aqueles atributos com dependência fraca são mais influenciados por fatores externos, como o manejo do solo, por exemplo. Adicionalmente, o fato de os atributos apresentarem distintos graus de dependência espacial com a profundidade evidencia, também, a presença de características intrínsecas de heterogeneidade na área de estudo.

Neste sentido, pode-se considerar que os altos valores de dependência espacial devem estar relacionados com a variabilidade natural intrínseca do solo dos atributos pH, K e Mg. Além disso, os atributos apresentaram diferentes graus de dependência espacial com a profundidade, além de estarem ligados aos fatores intrínsecos do solo, com exceção do K e Mg nas profundidades de 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, nos dois anos de estudo.

Outro fator que elucidada a representatividade espacial da área e que está ligado a dependência é o alcance (A), o qual é referente a distância total de semelhança entre os pontos (LIMA *et al.*, 2015). Neste estudo, foi possível verificar que para as variáveis químicas analisadas, cerca de 80% da correlação existente entre os pontos foi muito além dos 30 m, estabelecendo-se, com isso, que o intervalo entre os pontos poderia ter sido maior, o que serve de referência para trabalhos futuros na mesma área e na região.

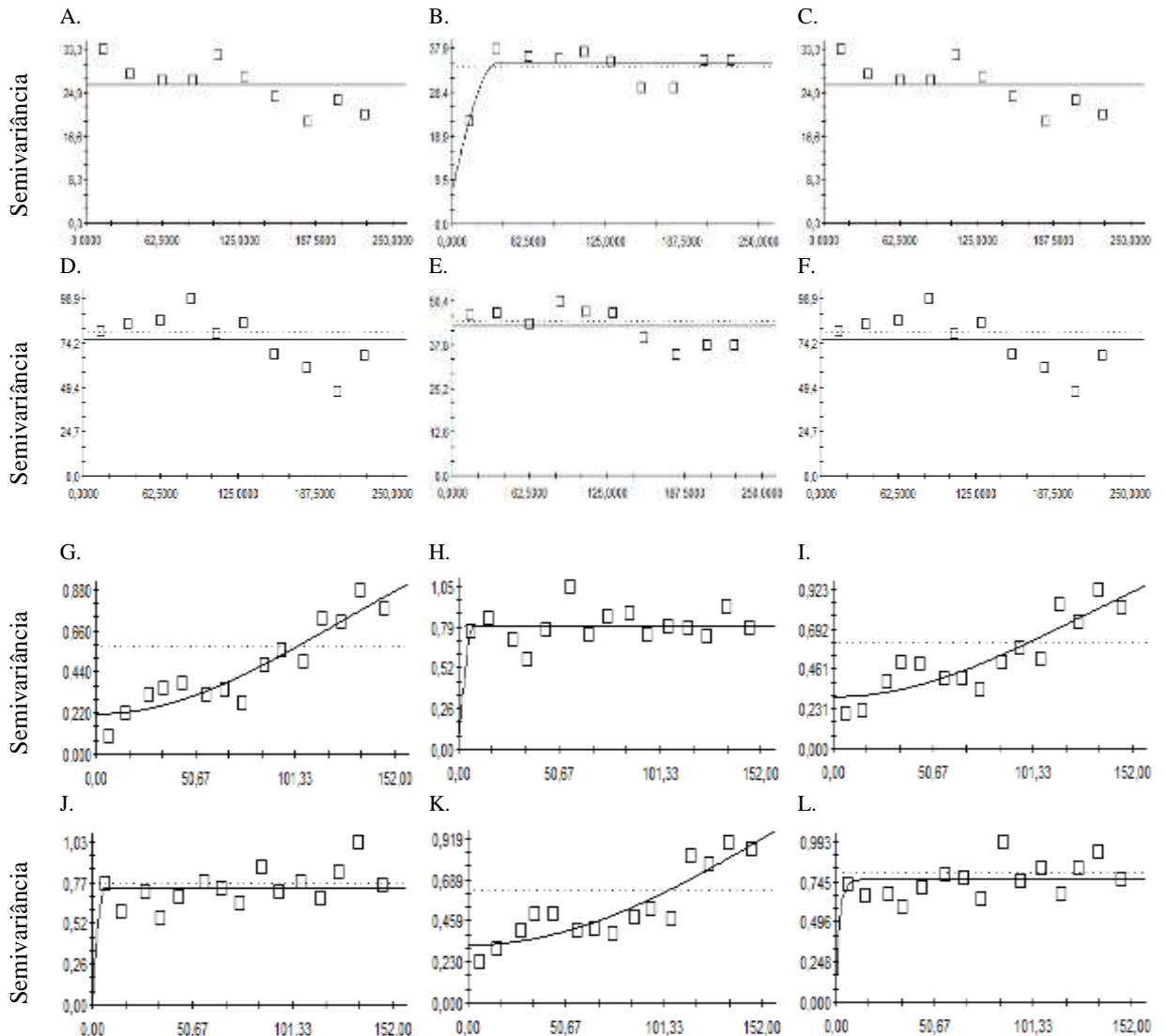


Figura 22 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para matéria orgânica (g.kg^{-1}), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), pH (H_2O), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

Os atributos do solo apresentaram diferentes alcances, sendo que a média observada, dentre todos os atributos, foi de 112,7 m. Ainda, observou-se um aumento dos valores de alcance de um ano estudado para o outro e, em sua maioria, na profundidade de 0-0,05 m. Esses maiores valores em superfície sugerem que a continuidade da dependência espacial é maior pelo efeito de carreamento via escoamento superficial por influência do relevo, fator intrínseco (BURAK; PASSOS; ANDRADE, 2012). Nas demais profundidades, o que se

observa é uma diminuição progressiva dos teores em profundidade, bem como de um ano para o outro. Dentre os atributos e as profundidades estudadas, a de 0,05-0,10 m para o pH foi a que apresentou o maior alcance (410,9 m). Esse resultado está, em média, 1.350% acima daqueles obtidos por Sousa *et al.* (2013) na mesma região do município de Gilbués/PI. Para as profundidades de 0-0,05 e 0,10-0,20 m, o pH também foi o atributo que teve os maiores alcances (242,3 e 275,6 m) em 2010 e 2012, respectivamente.

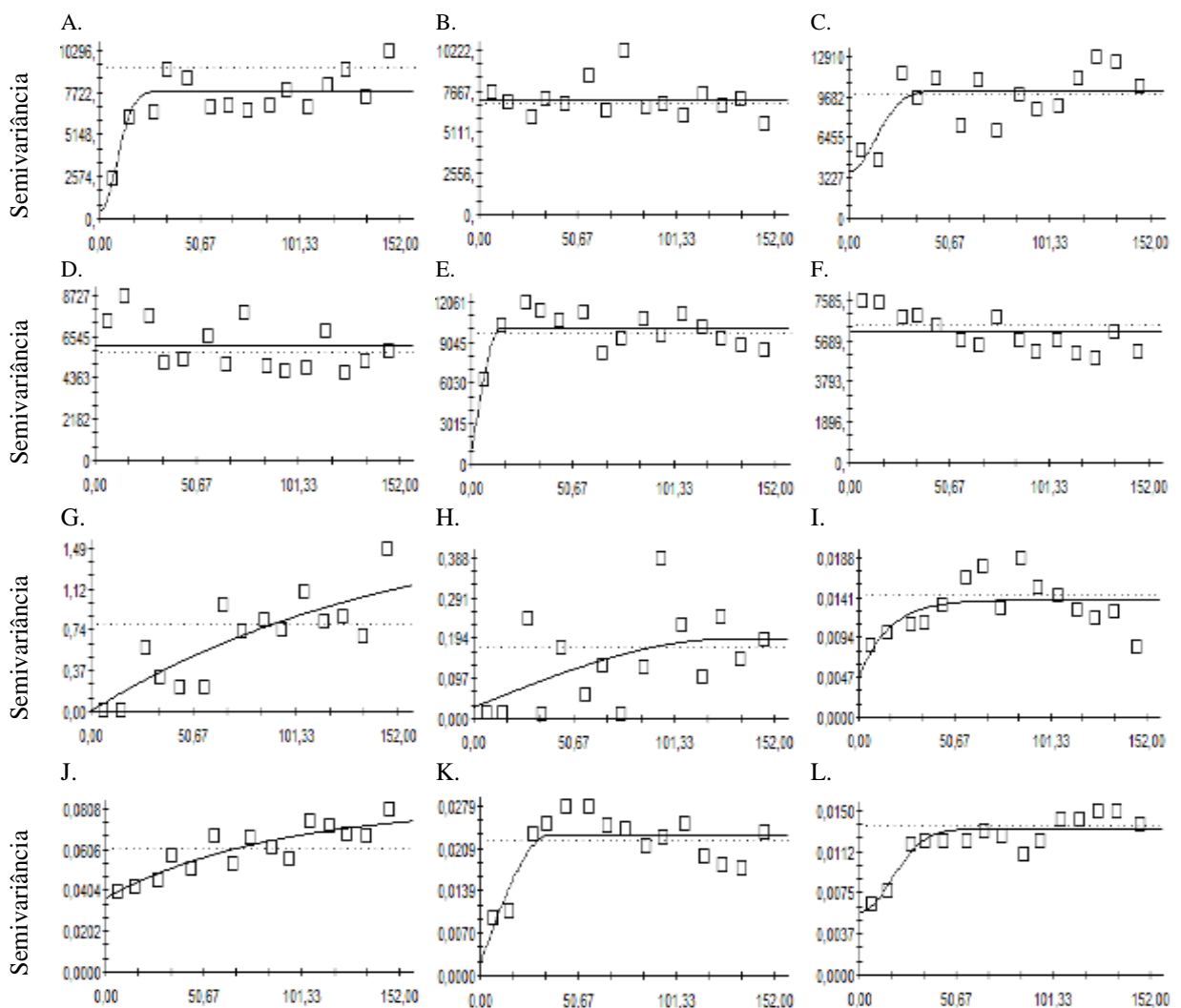


Figura 23 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para fósforo (mg.dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e potássio (cmol_c.dm³), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

Os menores valores de alcance foram encontrados para os teores de K em duas das três profundidades (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), sendo a média de 13,45 m, em 2010, e 14,5 m, em 2012. Tais resultados são importantes, uma vez que o alcance sinaliza a distância máxima até onde um atributo está correlacionado espacialmente, sendo que determinações realizadas a

distâncias maiores têm distribuição aleatória e, por isso, são independentes entre si. O alcance garante que todos os seus vizinhos, em uma área cujo raio seja o valor do alcance, são tão similares entre si que podem ser utilizados para estimar valores em qualquer ponto entre eles (SANCHEZ *et al.*, 2009).

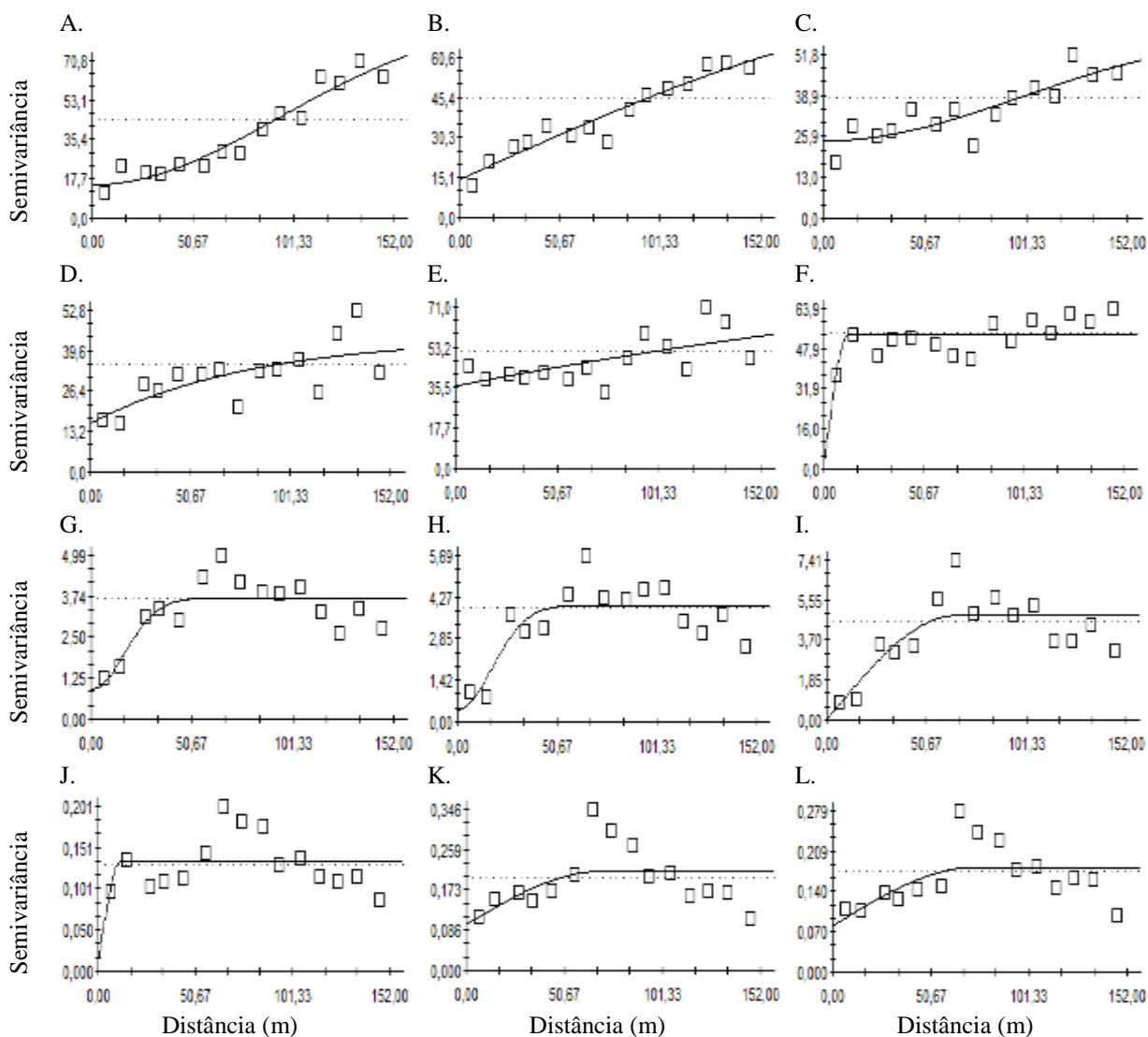
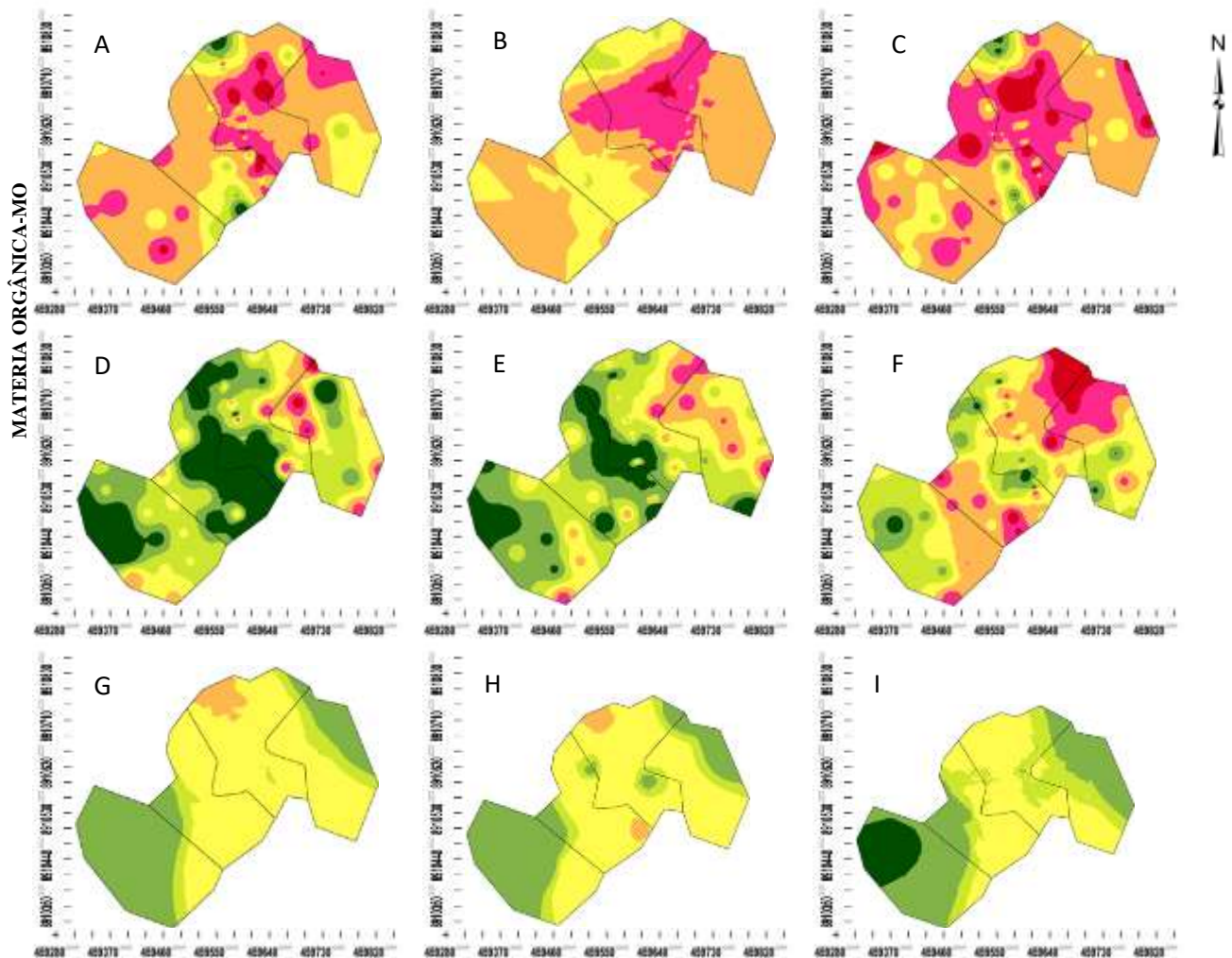


Figura 24 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para cálcio (cmol_c.dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e magnésio (cmol_c.dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

Nas figuras 25, 26 e 27 estão representados os mapas de distribuição espacial dos atributos químicos estudados, obtidos por meio da interpolação dos dados pela krigagem. Pode-se observar que, na profundidade de 0,0-0,05 m, os maiores teores de pH e Ca predominam nos locais em maior altitude no quarto inicial e final da área estudada no ano de 2010 (figuras 25 e 27); já no terço médio da área, com menor altitude, são observados maiores teores de MO e menores valores de pH, em 2012.

A variação do pH de um ano para o outro, nas três profundidades estudadas, pode ser explicada pela elevação dos teores de MO no solo, em 2012. A MO também tem a capacidade de apresentar vários grupos funcionais, especialmente os grupos carboxílicos e fenólicos que podem liberar o H^+ que irá compor os íons envolvidos na capacidade de troca de cátions do solo, e acidificá-lo (SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). Tais variações podem ser vistas na Figura 22 (D, E e F) para MO e (J, K e L) para pH. Consoante a compreensão de Tibau (1984), a MO é uma fonte de prótons H^+ que tende a acidificar os solos.

O mapa da matéria orgânica possui um padrão de variabilidade espacial distinto, com os maiores valores na região mediana da área que corresponde ao centro da área, e valores intermediários nas porções superior e inferior. Tal tipo de variabilidade também foi observada por Souza *et al.* (2006), que verificaram que pequenas variações das formas de relevo influenciam a variabilidade espacial de atributos químicos do solo.



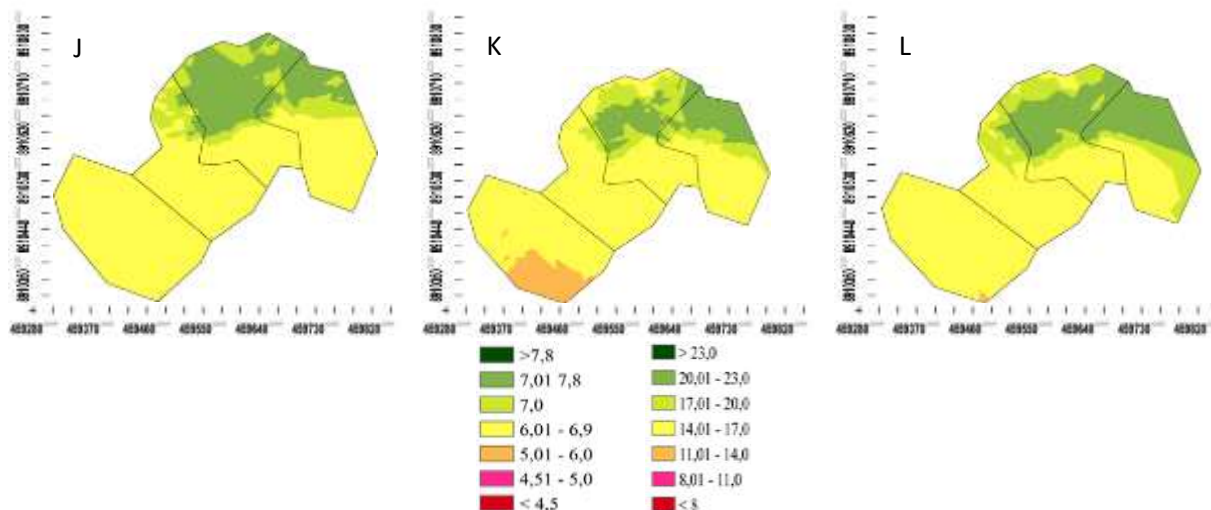


Figura 25 – Mapa de distribuição espacial para matéria orgânica (g.kg^{-1}), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), pH (H_2O), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

Continuando a análise dos mapas de variabilidade espacial da fertilidade do solo (figuras 25, 26 e 27), verifica-se que os atributos analisados apresentaram um padrão espacial de diminuição semelhante aos mapas de pH, P, K, Ca e Mg, que tiveram maiores valores no ano de 2010, diminuindo no ano de 2012. Observou-se, ainda, que esses maiores valores de pH, Ca e Mg estão distribuídos na parte mais alta do terreno, situada na região nordeste da área. Entretanto, os mapas de MO mostraram o inverso em relação aos mapas citados anteriormente, com os maiores valores no ano de 2012 nas partes inferiores e medianas da área. Burak, Passos e Andrade (2012) identificaram o mesmo comportamento para o Ca, Mg e K nas camadas superficiais, em área cultivada com café no Estado do Espírito Santo.

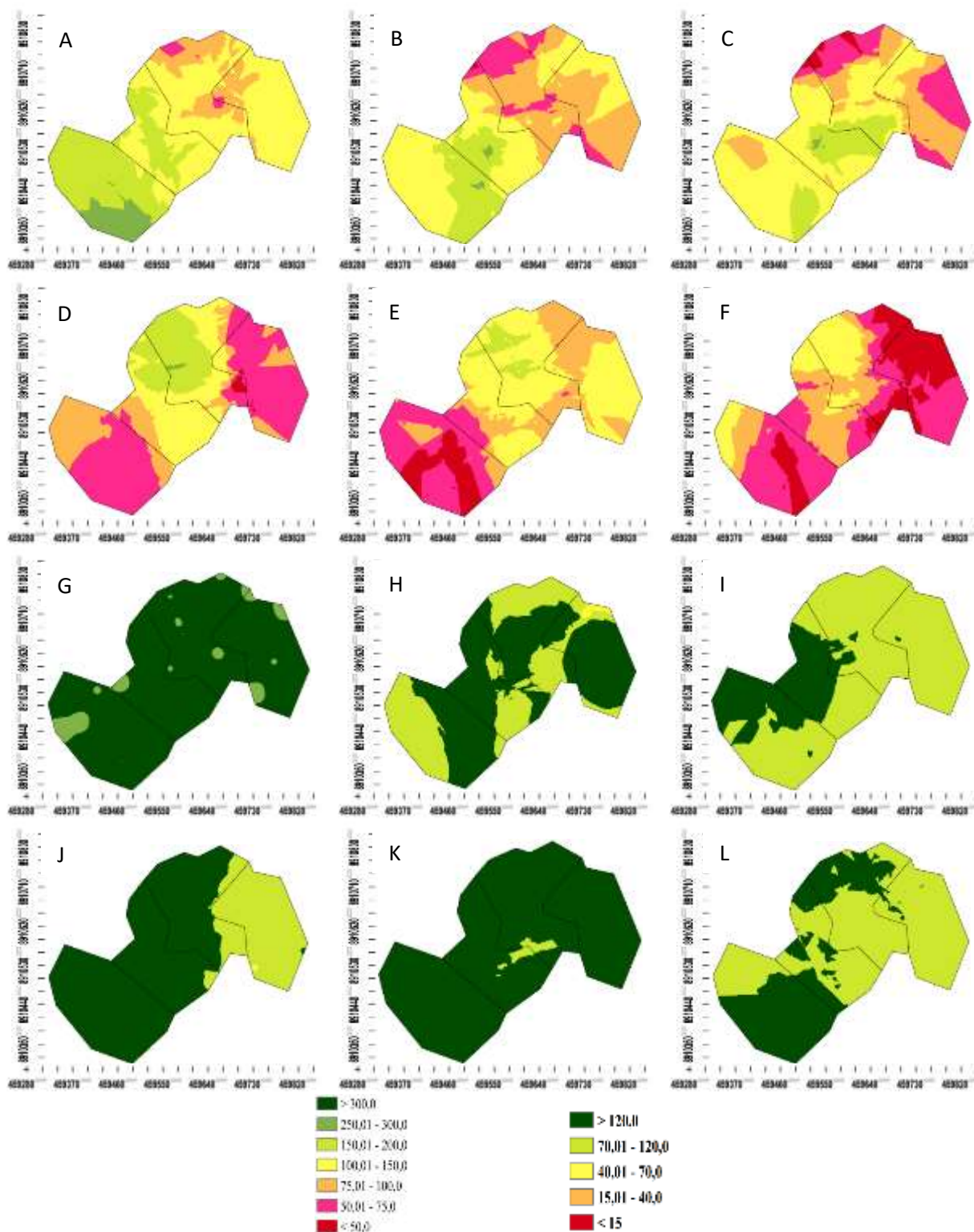
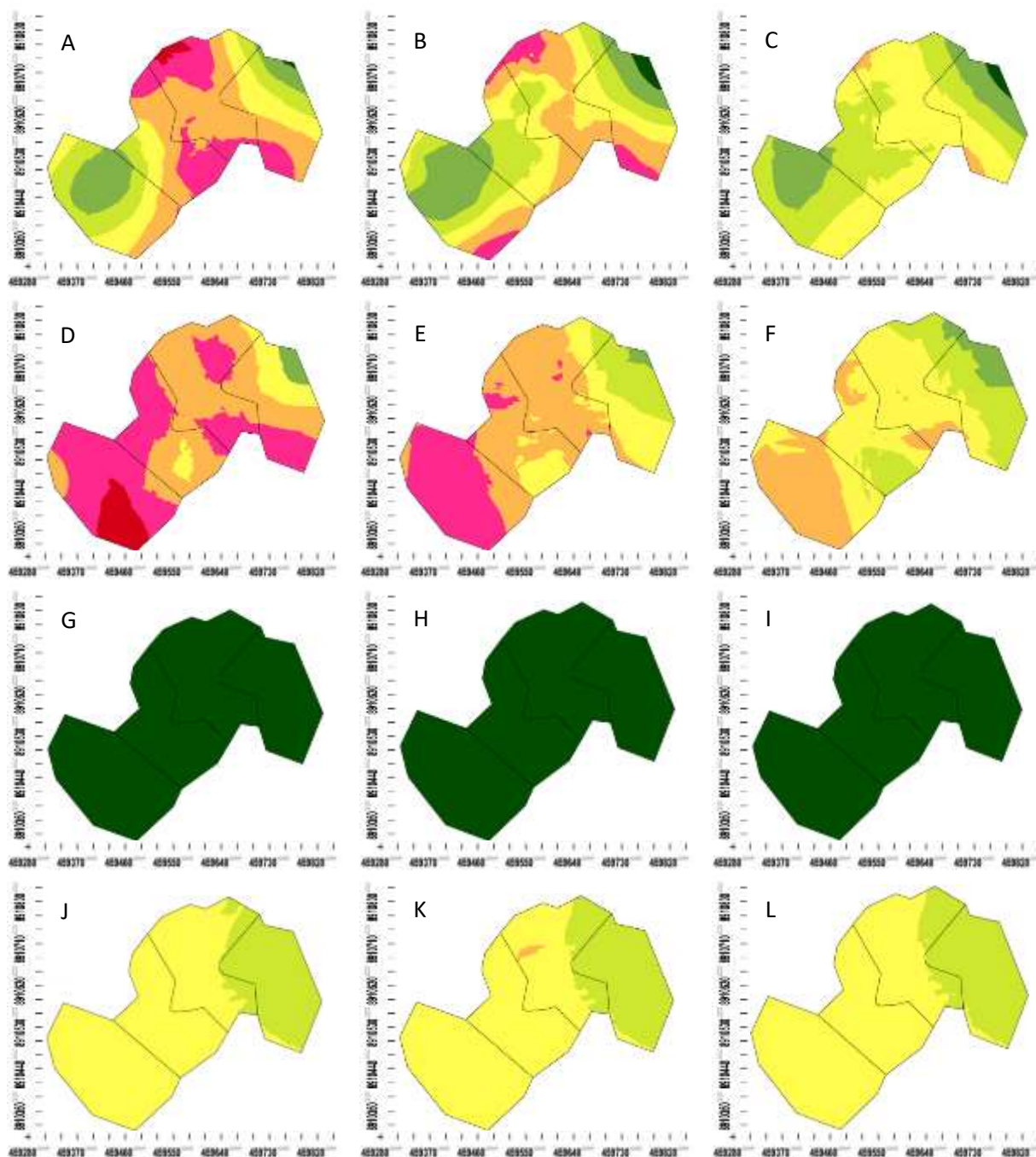


Figura 26 – Mapa de distribuição espacial para fósforo (mg.dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e potássio (cmol_c.dm³), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

As regiões onde os valores dos nutrientes P e Ca foram menores são aquelas mais próximas às bordas das voçorocas, ou seja, onde a declividade da área é maior, o que indica uma perda de nutrientes em decorrência do fluxo de água da região estudada. Identificou-se, também, que os atributos que apresentaram as maiores zonas homogêneas e mais bem definidas, dentre aqueles apresentados nas figuras 26 e 27, foram o K (G, H, I, J, K e L) e o Mg (G, H, I, J, K e L), respectivamente.



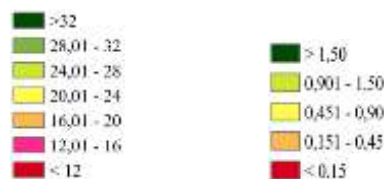


Figura 27 – Mapa de distribuição espacial para cálcio (cmol_c.dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e magnésio (cmol_c.dm³), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués,

PI

Os parâmetros referentes à estatística descritiva dos atributos químicos do solo: sódio (Na), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%) são apresentados nas tabelas 13 e 14.

Os valores das medidas de tendência central (média e mediana) são relativamente semelhantes para a maioria dos atributos, e podem ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição (CAMBARDELLA *et al.*, 1994), demonstrando, então, que a maioria dos atributos está próxima de uma distribuição simétrica, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos de zero. As exceções foram os teores de Na e Al que não apresentaram semelhança entre a média e mediana, e nem normalidade na sua distribuição. Os atributos apresentaram seus maiores valores médios no ano de 2010, com o mesmo comportamento de aumento dos teores em profundidade e diminuição de um ano para o outro.

Com base nos valores de assimetria e curtose do conjunto de dados, verificou-se que somente a assimetria esteve dentro dos padrões requeridos para que sejam considerados aderentes à normalidade, com exceção do Na e Al. Já a curtose apresentou, em sua maioria, valores elevados, acima dos padrões requeridos, em que o coeficiente de assimetria deve se aproximar de zero, enquanto que o de curtose deve ser próximo de três. Desta forma, identificou-se que somente o Na, na profundidade de 0-0,05 m, em 2010, o H+Al, na profundidade de 0-0,05 m, em 2012, e as SB e CTC, ambas na profundidade de 0,10-0,20, para o ano de 2010, e nas profundidades de 0-0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, em 2012, apresentaram os padrões requeridos para a normalidade.

Tabela 13 – Análise descritiva dos atributos do solo sódio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$) e alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$) nas profundidades de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Sódio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	0,04	3,00	0,30	0,14	0,46	152,19	3,90	18,13	*
	0,05 - 0,10	0,07	1,70	0,31	0,17	0,34	109,24	2,21	4,51	NS
	0,10 - 0,20	0,06	4,00	0,36	0,19	0,52	143,50	4,91	31,23	NS
2012	0,0 - 0,05	0,00	0,50	0,07	0,05	0,10	129,48	2,88	9,67	NS
	0,05 - 0,10	0,00	0,40	0,07	0,04	0,08	116,12	2,31	5,93	NS
	0,10 - 0,20	0,00	0,50	0,09	0,06	0,10	114,92	2,36	5,50	NS
Alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	0,00	0,30	0,01	0,00	0,04	364,54	6,42	46,96	NS
	0,05 - 0,10	0,00	0,07	0,01	0,00	0,02	191,70	2,01	3,60	NS
	0,10 - 0,20	0,00	0,06	0,01	0,00	0,01	209,54	2,26	4,98	NS
2012	0,0 - 0,05	0,00	0,44	0,02	0,00	0,05	233,60	6,44	49,19	NS
	0,05 - 0,10	0,00	0,18	0,03	0,02	0,04	127,28	1,49	2,65	NS
	0,10 - 0,20	0,00	0,09	0,02	0,01	0,03	123,45	0,98	-0,24	NS

Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; \bar{X} : valor médio; Md: Mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Ass.: assimetria; Cur.: curtose; TN*: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (5% de significância) não significativo ^{NS}.

Em geral, os atributos do solo avaliados apresentaram valores de assimetria negativos nas profundidades consideradas. As exceções à afirmativa anterior foram observadas para o Na, o Al e a CTC, que apresentaram valores de assimetria positivos nas três profundidades de solo. Embora a normalidade dos dados não seja uma exigência para a aplicação de técnicas geoestatísticas, é recomendado que a distribuição não apresente caudas muito alongadas para não comprometer as análises, uma vez que as estimativas por krigagem apresentam melhores resultados quando a normalidade dos dados é satisfeita (PAZ-GONZALEZ; TABOADA CASTRO; VIEIRA, 2001).

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov a 5% indicaram normalidade para apenas 22,2% dos atributos no ambiente estudado, permitindo, para esses dados, uma maior precisão das estimativas da krigagem. Desta forma, quando uma variável estatística qualquer possui distribuição de frequência do tipo normal, a medida de tendência central mais adequada para representá-la deve ser a média.

O desvio padrão (DP), na maioria dos atributos, diminuiu conforme a profundidade do solo e aumentou de um ano para o outro. O DP indica o afastamento dos valores observados em relação à média aritmética da amostra estudada, sinalizando um possível aumento na variabilidade dos dados ao longo dos anos.

Os valores de CV para a classificação de atributos do solo apresentaram baixos ($CV < 12\%$), médios ($12\% < CV < 60\%$) e altos valores ($CV > 60\%$), indicando baixa, média e alta variabilidade, respectivamente, segundo o critério de Warrick e Nielsen (1980). Verificou-se, ainda, que a variabilidade média para os atributos de Na, Al e H+Al, em todas as profundidades e nos dois anos de estudo, apresentaram altos valores de CV, sinalizando que estes atributos apresentaram alta variabilidade, podendo não ser detectada por causa da distância de coleta das áreas. Os atributos SB e CTC apresentaram média variabilidade, enquanto que o V% foi o único que teve baixa variabilidade. O V% foi o único atributo que apresentou baixa variação em ambas as profundidades, indicando baixa diferença na quantidade de bases trocáveis presentes na solução do solo.

Valores elevados nos CV são considerados como indicadores de heterogeneidade nos dados, e suas variações sugerem diferentes graus de heterogeneidade entre os atributos do solo na área amostrada. Esta heterogeneidade pode ser atribuída aos processos de formação inerentes a esses solos, que ocorreram pela acumulação e distribuição desuniformes de sucessivos depósitos de materiais provenientes de outros lugares, bem como ao intenso processo de degradação do solo verificado na área estudada.

Tabela 14 – Análise descritiva dos atributos do solo H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), soma de bases, capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^3$) e saturação por bases (%), nos anos de 2010 e 2012, nas profundidades de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	0,00	3,28	1,60	1,86	1,12	69,61	-0,28	-1,27	NS
	0,05 - 0,10	0,00	3,33	1,54	1,75	1,00	65,34	-0,27	-1,05	NS
	0,10 - 0,20	0,00	3,04	1,22	1,35	0,87	70,90	-0,10	-1,05	NS
2012	0,0 - 0,05	0,00	4,44	1,53	1,62	1,12	73,41	0,15	-0,91	*
	0,05 - 0,10	0,0	3,60	1,45	1,57	1,05	72,27	-0,05	-1,24	NS
	0,10 - 0,20	0,00	2,95	1,17	1,14	0,92	78,38	0,17	-1,26	NS
Soma de Bases ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	15,87	39,64	24,42	23,16	6,44	26,36	0,51	-0,86	NS

	0,05 - 0,10	11,15	40,61	26,76	25,29	6,66	24,89	0,09	-0,99	NS
	0,10 - 0,20	17,47	41,65	29,14	29,56	5,95	20,41	-0,003	-0,85	*
2012	0,0 - 0,05	6,96	36,61	17,93	16,68	5,86	32,69	0,94	0,94	NS
	0,05 - 0,10	0,68	37,10	20,23	19,48	7,22	35,71	0,20	-0,05	*
	0,10 - 0,20	8,79	37,12	23,71	23,65	7,31	30,83	0,14	-0,73	*
Capacidade de troca de Cátions – CTC efetiva (cmol _c dm ³)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	18,27	39,84	25,94	23,98	5,79	22,33	0,58	-0,83	NS
	0,05 - 0,10	13,08	40,76	28,30	27,44	6,12	21,62	0,01	-0,94	NS
	0,10 - 0,20	19,44	41,83	30,33	30,96	5,48	18,07	0,01	-0,80	*
2012	0,0 - 0,05	9,50	36,92	19,44	18,40	5,31	27,29	1,06	1,24	NS
	0,05 - 0,10	0,69	37,10	21,70	21,10	6,82	31,42	0,14	0,42	*
	0,10 - 0,20	11,09	38,53	24,88	24,35	7,06	28,37	0,29	-0,65	*
Saturação por Bases (V%)										
Ano	Prof. (m)	Mín.	Máx.	\bar{X}	Md	S	CV	Ass.	Cur.	Norm.
2010	0,0 - 0,05	83,25	100,0	92,96	93,15	5,34	5,75	-0,08	-1,24	NS
	0,05 - 0,10	85,24	100,0	93,93	93,90	4,45	4,74	-0,16	-1,00	NS
	0,10 - 0,20	86,30	100,0	95,57	95,37	3,50	3,66	-0,43	-0,30	NS
2012	0,0 - 0,05	68,60	100,0	91,09	90,81	7,54	8,28	-0,63	-0,11	NS
	0,05 - 0,10	71,60	100,0	92,04	93,00	6,85	7,44	-0,92	0,66	NS
	0,10 - 0,20	77,74	100,0	94,50	95,45	5,23	5,54	-1,15	1,09	NS

Mín.: valor mínimo; Máx.: valor máximo; \bar{X} : valor médio; Md: Mediana; S: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Ass.: assimetria; Cur.: curtose; TN*: teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov (5% de significância) não significativo ^{NS}.

A medida estatística CV permite comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém não permitindo avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo e nem seu padrão espacial. Para isso, os atributos foram submetidos a análises geoestatísticas (tabelas 15 e 16) que, ao apresentarem dependência espacial, este comportamento foi expresso pelos modelos de semivariogramas ajustados (figuras 28, 29 e 30).

O modelo de semivariograma esférico foi o que se ajustou melhor a 30,7% das variáveis analisadas nas duas profundidades avaliadas, seguido pelo modelo exponencial que melhor se ajustou a 22,2% das variáveis. Siqueira, Marques Junior e Pereira (2010) afirmam que os modelos matemáticos esférico e exponencial são aqueles mais utilizados em ciências do solo e ambiental. Para Isaaks e Srivastava (1989), os modelos exponenciais são mais bem ajustados a fenômenos erráticos na pequena escala, enquanto os modelos esféricos descrevem propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos à curta distância.

A maioria dos semivariogramas obtidos apresentou-se bem ajustada aos modelos teóricos, tendo 47,2% dos atributos com valor de coeficiente de determinação (R^2) acima de 70%, ou seja, no mínimo 70% das variabilidades existentes nos valores da semivariância estimada são explicadas pelos modelos ajustados (CAMPOS *et al.*, 2007). As exceções foram os teores de Na (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m) e Al (0-0,05 m), em 2012, H+Al (0,05-0,10 m), em 2010, e (0-0,05 m), em 2012, SB (0,05-0,10 e 0,10-0,20 m), em 2012, CTC (0,05-0,10 m), em 2012, e V% (0-0,05 m), em 2010, que apresentaram valores de R^2 menores que 60%.

Tabela 15 – Estimativa dos modelos ajustados para os dados de sódio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$) e alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$) para os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A), r^2 e dependência espacial, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

Sódio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	EXP	0,010	1,32	53,13	95,500	0,07	Forte
	0,05 - 0,10	GAU	0,015	0,123	57,8	93,900	0,12	Forte
	0,10 - 0,20	ESF	0,027	0,46	223,4	83,000	0,05	Forte
2012	0,0 - 0,05	ESF	0,003	0,014	262,7	74,900	0,19	Forte
	0,05 - 0,10	EXP	0,005	0,062	33,8	43,500	0,08	Forte
	0,10 - 0,20	EXP	0,001	0,014	75,2	50,200	0,07	Forte
Alumínio ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
2012	0,0 - 0,05	GAU	0,0001	0,0036	33,6	44,2	0,02	Forte
	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,10 - 0,20	ESF	0,0003	0,0009	220,1	73,1	0,33	Moderado

C_0 : efeito pepita; C_0+C_1 : patamar; R^2 : coeficiente de determinação do modelo; EPP: efeito pepita puro; GDE: grau de dependência espacial; Efeito pepita: 100% do patamar; GDE: moderada quando estão entre 25% e 75%, fraca > 75% e forte < 25%.

O modelo de tipo esférico foi o que permitiu o melhor ajuste dos dados dos semivariogramas da maioria dos atributos, apresentando, em média, $R^2= 85,5\%$, corroborando com os dados obtidos em diversos trabalhos de variabilidade espacial (SALVIANO; VIEIRA; SPAROVEK, 1998; GUEDES FILHO *et al.*, 2010; SANCHEZ *et al.*, 2009), que indicaram os modelos esféricos com os melhores ajustes para os atributos do solo.

Os atributos do solo foram classificados de acordo com a magnitude da sua dependência espacial, considerando o efeito pepita observado (C_0). Desta forma, a análise da relação $[(C_0/(C_0+C_1))]$, do grau de dependência espacial, mostrou que as variáveis em estudo, na sua maioria, apresentaram moderada dependência espacial dos dados (38,8%), seguida de 33,3% dos dados com forte dependência espacial. Tal variabilidade do grau de dependência pode indicar uma significativa variabilidade do solo da área de estudo, sendo que uma amostragem mais intensiva poderia revelar, ainda, maior continuidade espacial dos atributos avaliados (SANCHEZ *et al.*, 2009).

Os teores de Na apresentaram forte dependência espacial em todas as profundidades analisadas nos dois anos de estudo; já os demais atributos apresentaram moderada dependência espacial, especialmente na camada mais profunda (0,10-0,20 m), como verificado para SB, CTC e V%, em 2010, e CTC, em 2012. Portanto, considerando os altos valores de dependência espacial, podemos observar que todos os atributos apresentados nas tabelas 16 e 17 estão relacionados com a variabilidade natural intrínseca do solo. Além disso, os atributos apresentaram diferentes graus de dependência espacial com a profundidade, com exceção do Na, e que, também, estão ligados aos fatores intrínsecos do solo (CAMBARDELLA *et al.*, 1994).

O alcance é um parâmetro importante na análise geoestatística, pois expressa a dependência espacial ou distância em que uma variável pode apresentar o mesmo efeito. Os atributos estudados apresentaram diferentes valores de alcance, variando de 7,7 a 399 m. Verificou-se, ainda, que somente o H+Al não apresentou valor de alcance superior ao valor do espaçamento de 30 m utilizado na malha de amostragem para as variáveis, sinalizando que as demais amostras estão espacialmente relacionadas e, assim, há continuidade na distribuição espacial dos atributos químicos.

Em geral, observou-se um aumento dos valores do alcance em profundidade para a maioria dos atributos. Nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, a SB, em 2012, teve o maior alcance, ou seja, de 293,1 e 399 m, respectivamente. Para a profundidade de 0,10-0,20 m, o atributo SB também teve maior alcance (243,8 m), só que no ano de 2010.

Já os menores valores de alcance foram encontrados para os teores de Na na camada de 0-0,05 m, em 2010. Para a camada de 0,05-0,10 m, o H+Al apresentou alcance de 7,7 m, no ano de 2010, e a SB, na camada de 0,10-0,20 m, com alcance de 16,1 m. Tais resultados são importantes, uma vez que o alcance indica a distância máxima até onde um atributo está correlacionado espacialmente, sendo que determinações realizadas a distâncias maiores têm distribuição aleatória e, por isso, são independentes entre si (MARQUES JÚNIOR *et al.*,

2008). Os mapas de krigagem dos atributos químicos do solo, obtidos a partir dos parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas, são representados nas figuras 28, 29 e 30.

Tabela 16 – Estimativa dos parâmetros dos modelos ajustados para os dados de H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$), soma de bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$), capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$) e saturação por bases (%) para os parâmetros efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1), alcance (A), r^2 e dependência espacial, nos anos de 2010 e 2012, nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m

H+Al ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,05 - 0,10	EXP	0,13	0,94	7,70	25,6	0,138	Forte
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
2012	0,0 - 0,05	EXP	0,663	1,32	9,5	18,8	0,50	Moderado
	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-
Soma de Bases ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	GAU	17,90	67,16	106,10	96,20	0,27	Moderado
	0,05 - 0,10	ESF	9,80	55,16	156,80	97,90	0,18	Forte
	0,10 - 0,20	GAU	17,20	51,33	243,80	91,40	0,34	Moderado
2012	0,0 - 0,05	EXP	23,30	69,98	293,10	70,10	0,33	Moderado
	0,05 - 0,10	EXP	36,10	108,01	399,1	40,70	0,33	Moderado
	0,10 - 0,20	GAU	6,7	52,70	16,100	31,30	0,12	Forte
Capacidade de troca de Cátions – CTC efetiva ($\text{cmol}_c \text{dm}^3$)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	GAU	15,70	49,64	97,20	93,80	0,316	Moderado
	0,05 - 0,10	ESF	10,00	44,05	143,90	97,10	0,227	Forte
	0,10 - 0,20	ESF	16,36	36,63	177,00	86,90	0,447	Moderado
2012	0,0 - 0,05	EXP	23,10	68,67	284,20	70,10	0,336	Moderado
	0,05 - 0,10	EXP	32,60	78,41	275,60	35,20	0,415	Moderado
	0,10 - 0,20	ESF	22,30	58,48	90,00	85,20	0,381	Moderado
Saturação por Bases (V%)								
Ano	Prof. (m)	Modelo	C_0	C_0+C_1	A	r^2	C_0/C_0+C_1	GDE
2010	0,0 - 0,05	EXP	10,28	39,85	88,90	82,40	0,308	Moderado
	0,05 - 0,10	EXP	4,40	38,510	158,70	96,40	0,114	Forte
	0,10 - 0,20	ESF	16,36	36,630	177,00	86,90	0,447	Moderado

	0,0 - 0,05	GAU	29,60	59,250	31,400	55,00	0,50	Moderado
2012	0,05 - 0,10	EPP	-	-	-	-	-	-
	0,10 - 0,20	EPP	-	-	-	-	-	-

C₀: efeito pepita; C₀+C₁: patamar; R²: coeficiente de determinação do modelo; EPP: efeito pepita puro; GDE: grau de dependência espacial; Efeito pepita: 100% do patamar; GDE: moderada quando estão entre 25% e 75%, fraca > 75% e forte < 25%.

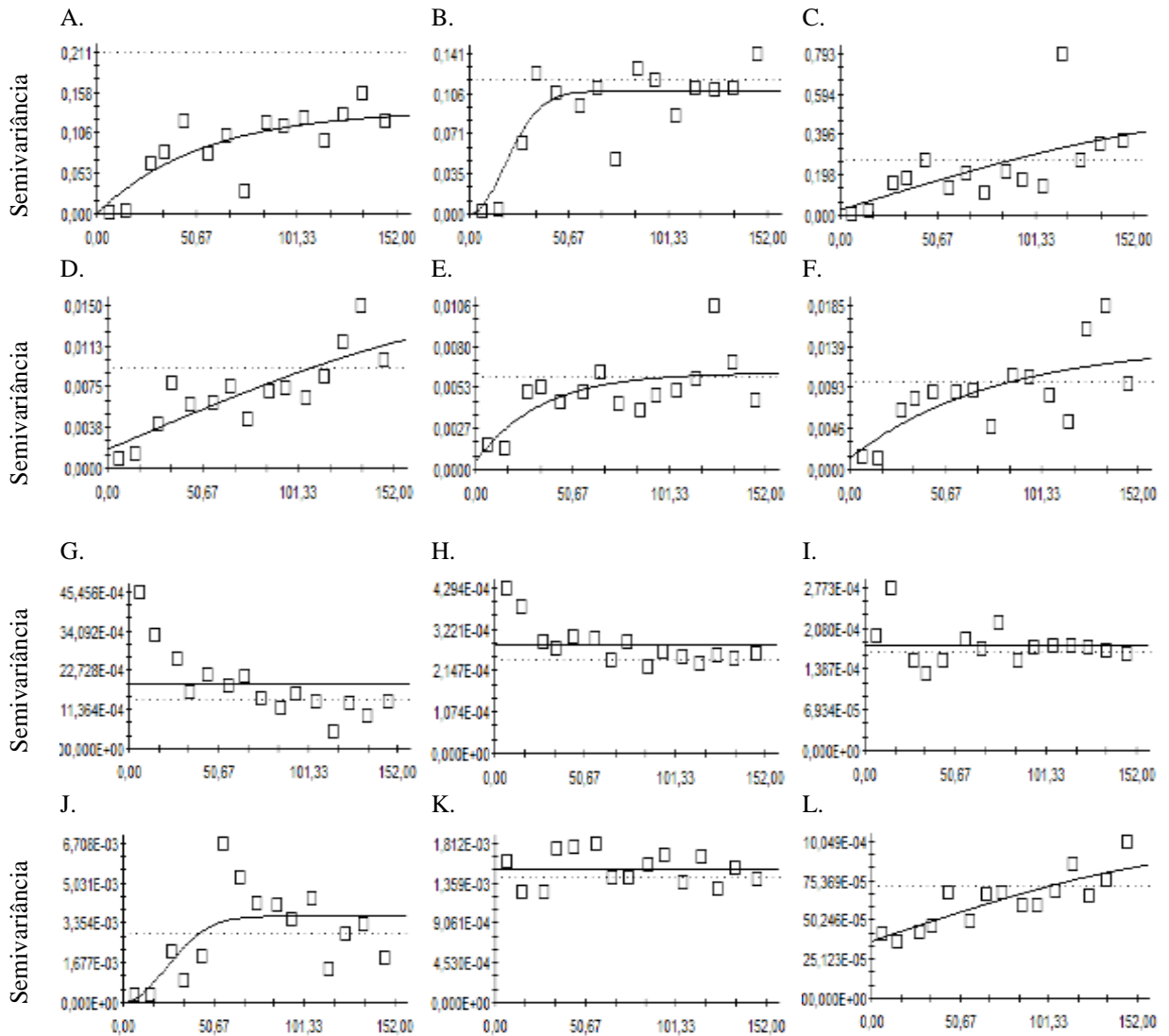


Figura 28 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para sódio (cmol_c dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e alumínio (cmol_c dm³), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

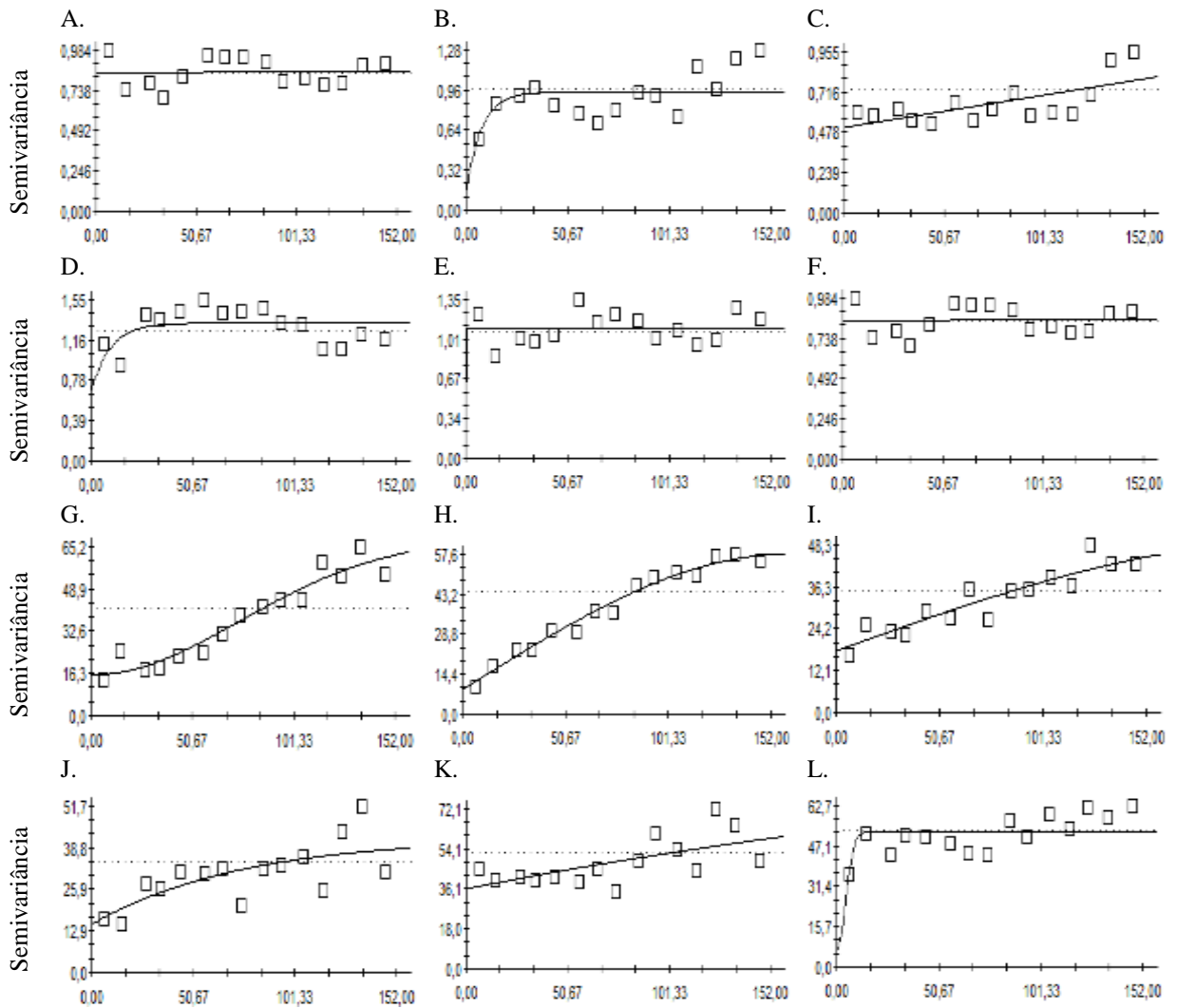


Figura 29 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para H+Al ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e soma de bases ($\text{cmol}_c \text{ dm}^3$), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués,

PI

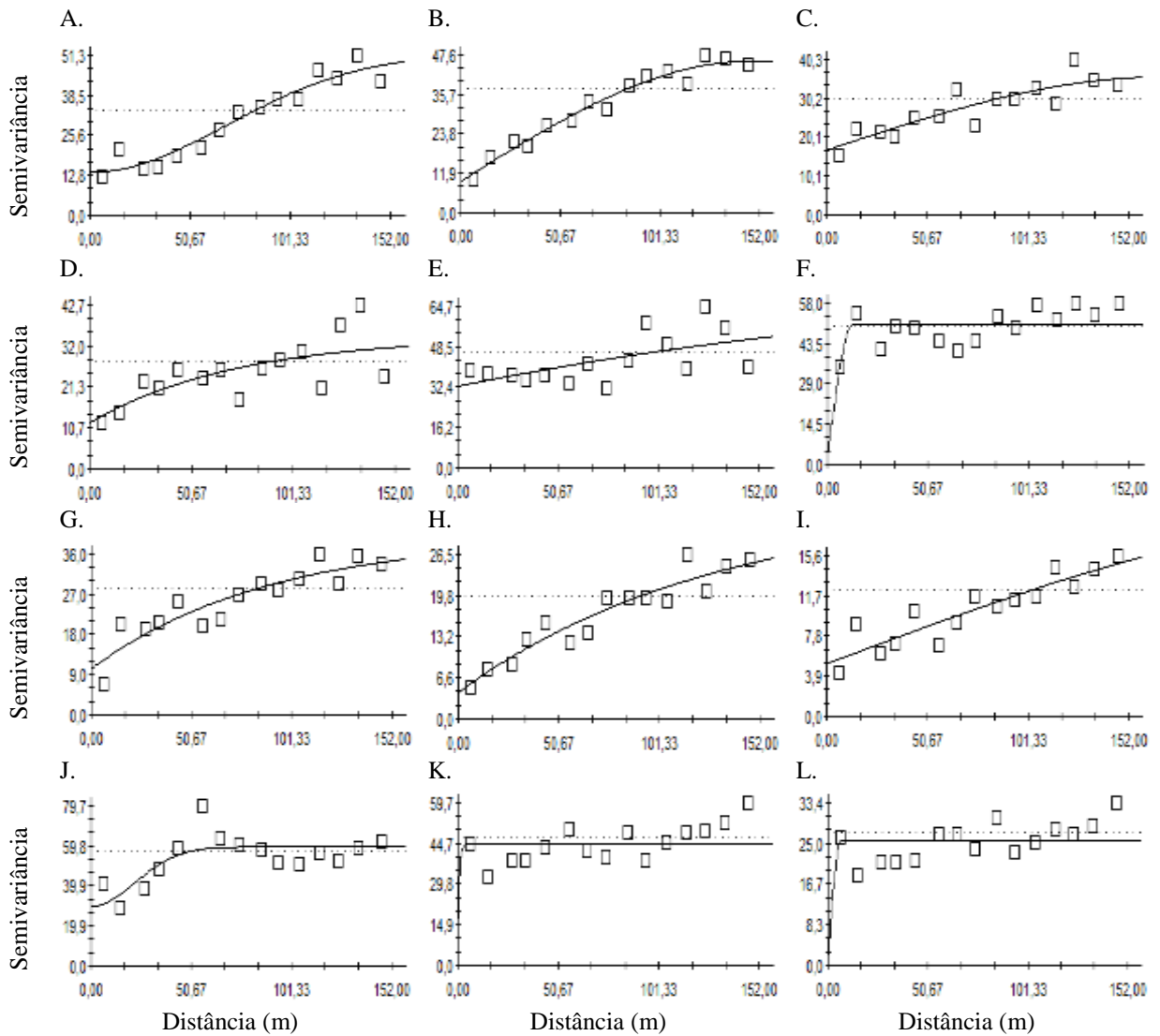
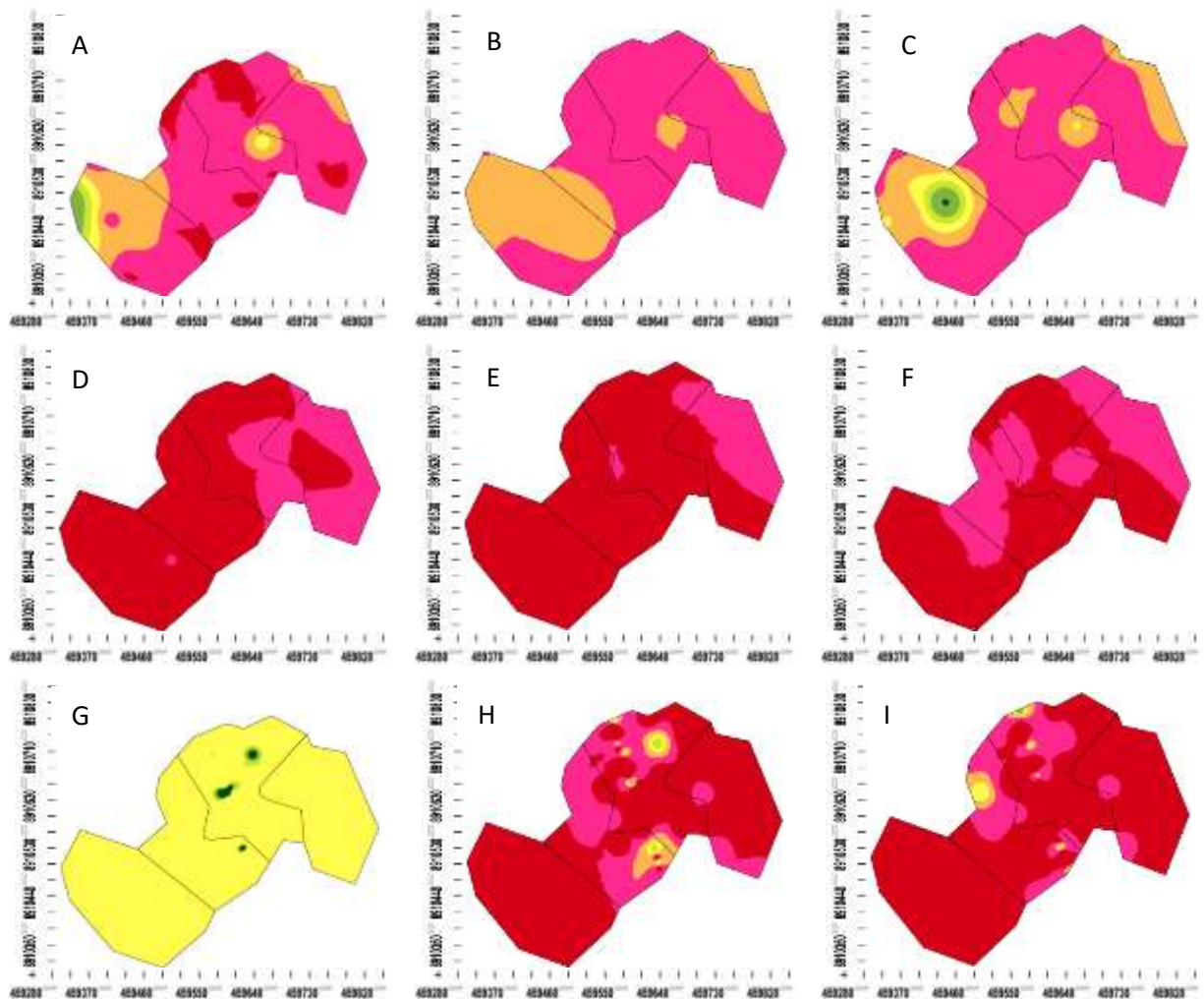


Figura 30 – Modelos dos semivariogramas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, para capacidade de troca de cátions (cmol_c dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e saturação por bases (%), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

Identificou-se que os parâmetros, nos atributos dos semivariogramas com mesma ordem de grandeza, podem ser evidenciados nos mapas gerados para SB e CTC em ambas as profundidades estudadas nos dois anos de pesquisa. Os mapas destas duas variáveis (FIGURA

32 – G, H, I, J, K e L –, para SB, e FIGURA 33 – A, B, C, D, E e F –, para CTC) se mostram semelhantes, possivelmente pelo fato desses atributos terem a mesma origem no solo. O padrão de variabilidade espacial também é semelhante para os atributos Al e H+Al, no ano de 2012 (FIGURA 31 – J, K e L – e FIGURA 32 – D, E e F), sendo que nas áreas que apresentaram maiores valores de Al se concentraram os menores teores de H+Al e vice-versa.

Na região nordeste da área, parte mais alta, onde ocorreram os maiores valores de Ca, os valores de CTC também foram maiores, não se repetindo os maiores valores na parte inferior da área; o mesmo comportamento foi verificado para o pH com relação a CTC. De acordo com Hurtado *et al.* (2009), existe uma grande variabilidade espacial comum das condições de acidez do solo, mesmo em áreas de cultivo aparentemente homogêneas. As áreas que tiveram maior saturação por bases (V%), especialmente em 2010 nas camadas mais profundas, também apresentaram coincidência na sua distribuição com o pH do solo.



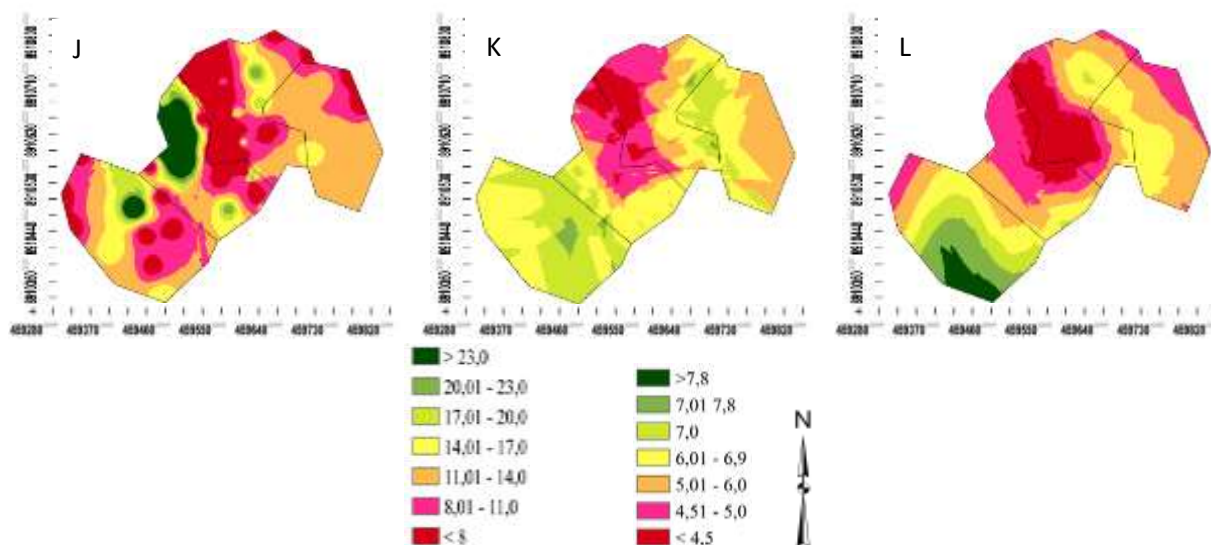
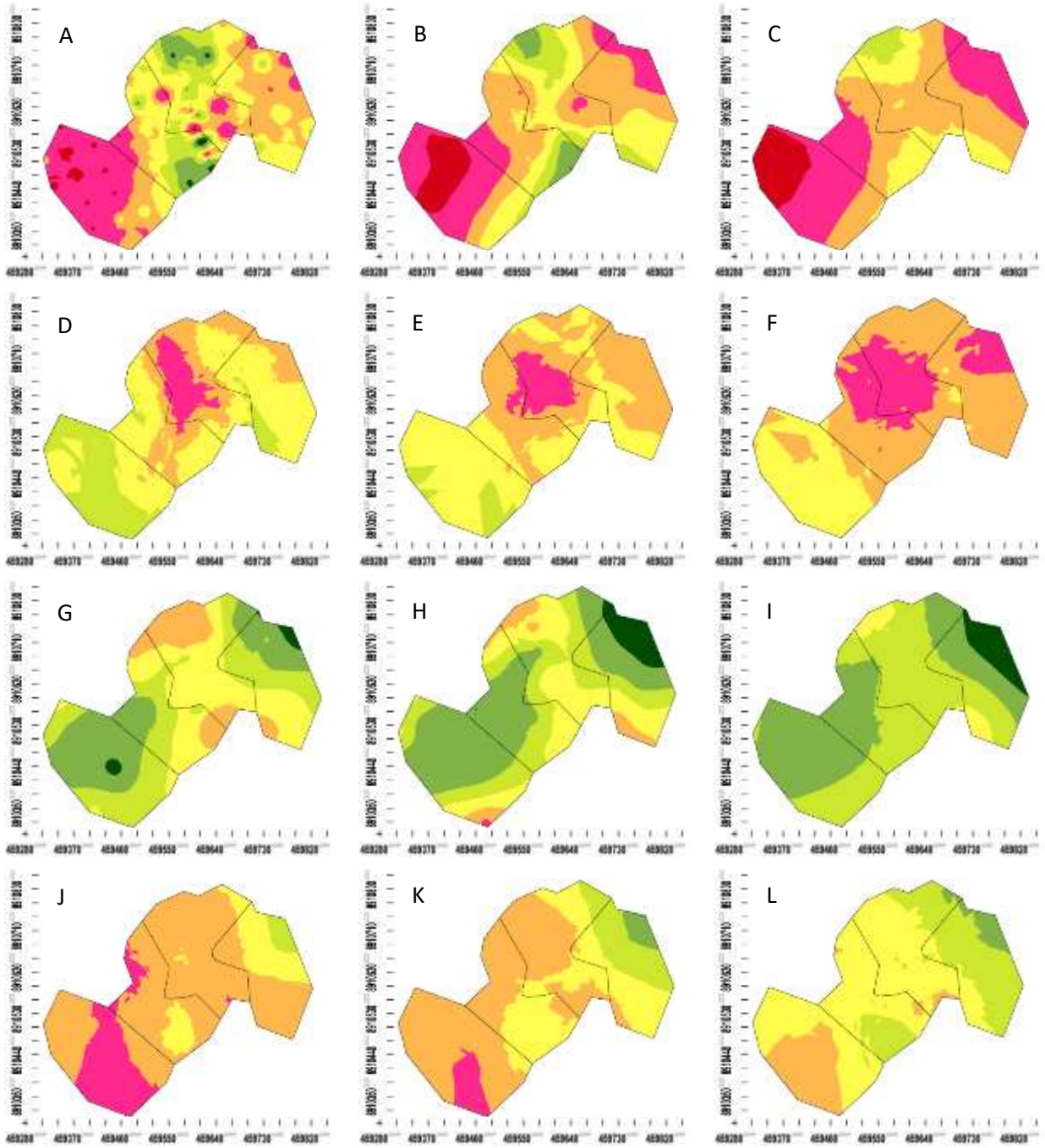


Figura 31 – Mapa de distribuição espacial para sódio (cmol_c dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e alumínio (cmol_c dm³), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

Quando comparamos as informações dos atributos químicos do solo com o atributo de produtividade das gramíneas implantadas, nota-se que o crescimento em altura e em produção do povoamento das mesmas foi maior em locais com maiores concentrações da SB e CTC, no ano de 2010. Observou-se, também, que as mesmas áreas que apresentaram os maiores valores foram os que tiveram as maiores diminuições no ano de 2012, mostrando que esses atributos exercem papel de grande importância no crescimento e na produção de matéria seca foliar.

Os mapas de variabilidade espacial gerados para os atributos físicos e químicos do solo da área de estudo servirão como base para a implementação de práticas adequadas de manejo com vistas à recuperação dos solos da área de estudo.



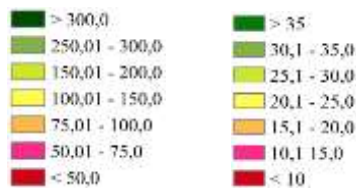
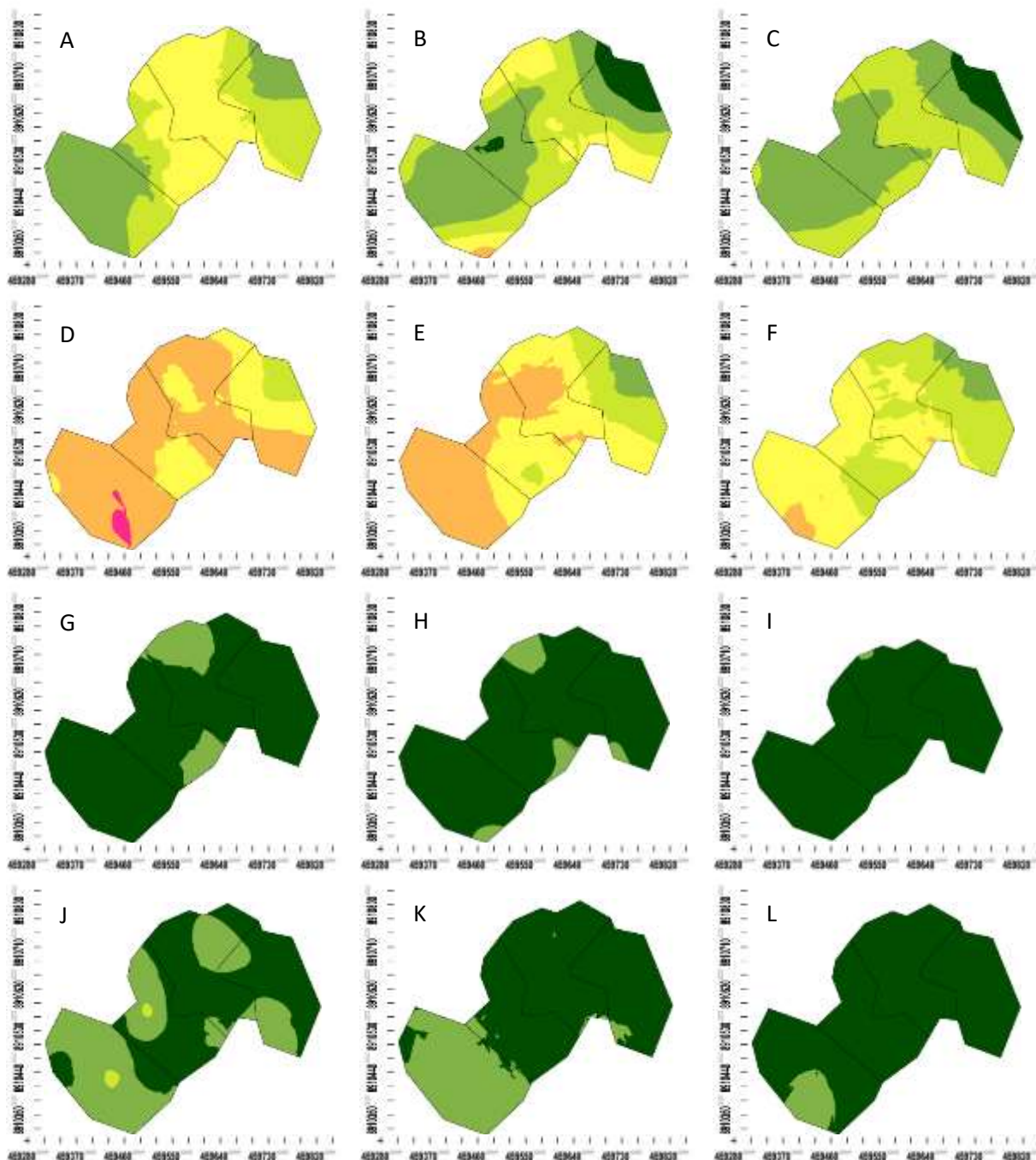


Figura 32 – Mapa de distribuição espacial para H+Al (cmol_c dm³), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e soma de bases (cmol_c dm³), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI



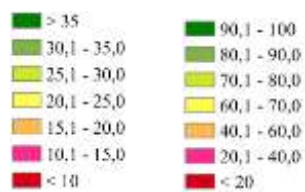


Figura 33 – Mapa de distribuição espacial para capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$), em 2010 (A, B e C) e 2012 (D, E e F), e saturação por bases (%), em 2010 (G, H e I) e 2012 (J, K e L), nas camadas de 0,0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, de um Neossolo Litólico em Gilbués, PI

5 CONCLUSÕES

1. As três gramíneas comerciais avaliadas apresentaram boa capacidade produtiva para o uso como forrageiras ou cobertura do solo, em consórcio com pinhão manso. Contudo, o Capim Andropogon (*Andropogon gayanus*) apresentou a maior capacidade produtiva e tolerância aos efeitos do consórcio com o pinhão manso do que as demais espécies testadas;
2. Os dados físicos do solo indicaram que a implantação do pinhão manso consorciado com diferentes gramíneas na área degradada acarretaram em aumento da estabilidade de agregados, densidade do solo, capacidade de campo, ponto de murcha e microporosidade, culminando na melhora da estrutura do solo e em sua capacidade de armazenamento de água;
3. O diâmetro médio geométrico e o índice de estabilidade dos agregados demonstraram elevada correlação espacial com o carbono orgânico do solo, sendo verificado aumento do carbono com a implantação do pinhão manso;
4. Os dados químicos do solo indicaram que o consórcio entre pinhão manso e gramíneas extrai uma considerável quantidade de nutrientes do solo, podendo acarretar em seu empobrecimento em longo prazo, caso não se utilize algum tipo de manejo nutricional na área;
5. Os atributos físico-químicos foram os que tiveram as maiores dependências espaciais dentro da escala avaliada de 30 x 30 m, podendo influenciar a amostragem desses atributos e o manejo agrícola do solo. Para todos os atributos que apresentaram dependência espacial, a relação foi classificada como de moderada a forte, com exceção do DMP que apresentou dependência espacial fraca; e,
6. A análise da distribuição espacial aliada à krigagem possibilitou o mapeamento da variabilidade espacial dos atributos físico-químicos do solo nas três profundidades, com exceção do diâmetro médio geométrico e ponderado, no ano de 2010, proporcionando melhor visualização do seu comportamento na área de estudo.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 89 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.
- AGUIAR, M. I. de *et al.* Sediment, nutrient and water losses by water erosion under agroforestry systems in the semi-arid region in northeastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 79, p. 277-289, 2010.
- ALBUQUERQUE, F. A. de *et al.* Análise de crescimento inicial do *Jatropha curcas* em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 99-106, set./dez. 2009.
- ALBUQUERQUE, F. A. de *et al.* **Crescimento e Desenvolvimento do pinhão manso: 1º ano agrícola**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008.
- ALMEIDA-FILHO, R.; CARVALHO, C. M. Mapping land degradation in the Gilbués region, northeastern Brazil, using Landsat TM images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 31, n. 4, p. 1087-1094, 2010.
- ALVARES, V. V. H. *et al.* Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (eds.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5. Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- ALVES, J. A. **A Eficiência do Pinhão-manso (*jatropha curcas l.*) na Recuperação Florestal de Áreas Degradadas e Análise de seu Retorno Econômico**. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agroecologia e Desenvolvimento Rural) – Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Rural, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2010.
- ALVES, J. M. A. *et al.* Pinhão-manso: uma alternativa para a produção de biodiesel na agricultura familiar da Amazônia brasileira. **Agroambiente On-line**, Boa Vista, v. 2, n. 1, p. 57-68, 2008.
- ANDRADE, C. M. S.; ASSIS, G. M. L. **Brachiaria brizantha cv. Piatã**: gramínea recomendada para solos bem-drenados do Acre. Rio Branco: EMBRAPA, 2010.
- ANDRÉA, A. F. *et al.* Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos cerrados no sul do Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 1047-1054, 2002.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Ed. Unisinos, 2003.
- AQUINO, R. E. de *et al.* Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesq. Agropec. Trop.**, Goiânia, v. 44, n. 1, p. 32-41, jan./mar. 2014.

AQUINO, R. F. *et al.* Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais state, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 36, n. 5, p. 533-542, 2012.

ARRUDA, F. P. de *et al.* Cultivo do pinhão-manso (*Jatrofa curcas* L.) como alternativa para o semiárido Nordeste. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 789-799, jan./abr. 2004.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 123-141.

ASSAD, E. D. **Chuva no Cerrado: análise e espacialização**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2001.

AZEVEDO, E. C. de. **Uso da geoestatística e de recursos de geoprocessamento no diagnóstico da degradação de um solo argiloso sob pastagem no Estado de Mato Grosso**. 2004. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

BARDUCCI, R. S. *et al.* Produção de *Brachiaria brizantha* e *Panicum maximum* com milho e adubação nitrogenada. **Archivos de Zootecnia**, Córdoba, v. 58, n. 222, p. 211-222, 2009.

BENNETT, C. G. S. *et al.* Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1661-1668, 2011.

BERNER, P. G. M. *et al.* Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 837-844, 2007.

BERTOL, I. *et al.* Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às de campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 155-163, fev. 2004.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo. Ícone, 2012.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1993.

BIBLIO, R. *et al.* Agricultura de precisão como ferramenta para identificação de zonas de manejo e seleção de intervenções. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Viçosa, 2003. **Anais...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 4 p.

BONINI, C. S. B. *et al.* Pore size distribution of a deeply excavated Oxisol after 19 years reclamation. In: EGU GENERAL ASSEMBLY CONFERENCE, 2013, Áustria. **Abstracts...** Áustria, 2013.

BORGES, R. C. P. *et al.* Desenvolvimento do pinhão manso em condições de sequeiro e irrigado no litoral cearense. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 12, n. 4, p. 2784-2788, 2018.

- BOTREL, M. A.; ALVIM, M. J.; XAVIER, D. F. Avaliação de gramíneas forrageiras na região Sul de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 4, p. 683-689, 1999.
- BOWEN, J. E.; KRATKY, B. La compactación del suelo. **Agricultura de las Américas**, Overland Park, v. 6, n. 34, p. 10-14, 1985.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2008.
- BRANCHER, D.; ROZA-GOMES, M. F. Survey of edaphic fauna in forest fragment in the municipality of Anchieta (SC, Brazil). **Biota Neotropica**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 94-98, 2012.
- BRANCO, S. B. C. *et al.* Influência do relevo e erodibilidade nos atributos químicos em área degradada de Gilbués, PI. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 324-330, 2013.
- BROCH, D. T. **Propriedades físico-hídricas de solos siltosos sob plantio direto**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.
- BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 4, p. 538-547, 2012.
- CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 258-267, abr./jun. 2011.
- CÂMARA, G. *et al.* **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. Campinas: Instituto de Computação/UNICAMP, 1996.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PE-REIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 617-630, 2010.
- CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M. C. C. *et al.* Spatial variability of physical attributes in Alfissol under agroforestry, Humaitá region, Amazonas state, Brazil. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 56, n. 2, p. 149-159, 2013.
- CAMPOS, M. C. *et al.* Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 38, n. 2, p. 149-157, 2007.
- CARDOSO, E. J. B. N. *et al.* Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 4, p. 274-289, 2013.

CARNEIRO J. G. A. **Determinação da qualidade de mudas de *Pinus taeda* L. para plantio definitivo**. 1976. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1976.

CARNEIRO, J. S. da S. *et al.* Diagnóstico da variabilidade espacial da fertilidade do solo no cerrado. **Revista Scientia Agrária**, Curitiba, v. 17, n. 3, p. 38-49, 2017.

CARNIELLI, F. **O combustível do futuro**. 2003. Disponível em: <http://www.ufmg.br/boletim/bul1413>. Acesso em: 18 set. 2019.

CARPANEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade dos agregados de Latossolos Roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 99-105, jan./abr. 1990.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695-703, 2003.

CARVALHO, S. R. L.; VILAS BOAS, G. S.; FADIGAS, F. S. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em solos originados nos sedimentos da formação Barreiras. **Cadernos de Geociências**, v. 7, n. 2, p. 63-79, nov. 2010.

CARVALHO, C. M. *et al.* Pinhão-manso: crescimento sob condições diferenciadas de irrigação e de adubação no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 5, p. 487-496, 2013.

CARVALHO, D. F. de *et al.* Efeito da cobertura morta e do preparo do terreno nas perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho-amarelo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 11, n. 1-4, p. 15-22, 2003.

CARVALHO, L. A. de *et al.* Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 9, p. 940-949. 2011.

CARVALHO, L. A. de *et al.* Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brillhante-MS. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 1, n. 2, p. 7-22, 2008.

CASTRO, C. M.; DEVIDE, A. C. P.; ANACLETO, A. H. Avaliação de acessos de pinhão manso em sistema de agricultura familiar. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, São Paulo. APTA, dezembro de 2008.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 527-538, 1998.

CAVALCANTE, E. G. S. *et al.* Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1329-1339, 2007.

CAVALCANTI FILHO, L. F. M. *et al.* Caracterização de pastagem de *Brachiaria decumbens* na zona da mata de Pernambuco. **Archivos de Zootecnia**, Córdoba, v. 57, n. 220, p. 391-402, 2008.

CECATO, U. *et al.* Influência das adubações nitrogenada e fosfatada sobre a produção e características da rebrota do Capim Marandu (*Brachiaria brizantha* (Hochst) Stapf cv. Marandu). **Acta Scientiarum Animal Sciences**, Maringá, v. 26, n. 3, p. 399-407, 2004.

CORÁ, J. E.; BERVALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após a calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 374-387, 2006.

CORADO NETO, F. C. *et al.* Variabilidade espacial dos agregados e carbono orgânico total em Neossolo Litólico Eutrófico no município de Gilbués, PI. **Revista Ciências Agrárias**, v. 58, n. 1, p. 75-83, jan./mar. 2015a.

CORADO NETO, F. C. *et al.* Variabilidade Espacial da Resistência à Penetração em Neossolo Litólico Degradado. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 39, n. 5, p. 1353-1361, 2015b.

CORREIA, L. A. **Características Agronômicas das Principais Plantas Forrageiras Tropicais**. São Carlos: EMBRAPA, 2002.

COSTA, N. L. **Formação e manejo de pastagens de capim-andropógon em Rondônia**. Rondônia: EMBRAPA-CPAF, 2001.

COSTA, J. A. A. *et al.* **Taxas de Semeadura e Métodos de Plantio do Capim-Piatã – Parte 2. Informativo Piatã**. EMBRAPA Gado de Corte, ano 2, ed. 1, 2009.

CREPANI, E. O Núcleo de Desertificação de Gilbués observado pelo Sensoriamento Remoto e pelo Geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIV, Natal, 2009. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 5185-5192.

CRESSIE, N. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991.

CRISPIM, S. M. A.; BRANCO, O. D. **Aspectos gerais das Braquiárias e suas características na sub-região da Nhecolândia, Pantanal, MS**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2002.

CRUZ, J. S. *et al.* Spatial variability of an Alfisol cultivated with sugarcane. **Ciencia e Investigación Agraria**, v. 38, n. 1, p. 155-164, jan./apr. 2011.

DALE, M. R. T. *et al.* Conceptual and mathematical relationships among methods for spatial analysis. **Ecography**, Copenhagen, v. 25, n. 5, p. 558-577, 2002.

DANIEL, J. N. **Jatropha oilseed production**: a realistic approach. BAIF Development Research Foundation. 2008. Disponível em: http://www.baif.org.in/doc/Agri_Horti.../MEDA.doc. Acesso em: 13 mar. 2018.

DIAS, L. E.; GRIFFITH, J. J. Conceituação e caracterização de áreas degradadas. In: DIAS, L. E.; MEILO, J. W. V. de. **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: UFV/Departamento de Solos/Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998. p. 1-7.

DIAS, L. A. dos S. *et al.* **Cultivo de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) para produção de óleo combustível**. Viçosa: L. A. S. Dias, 2007.

DIAS-FILHO, M. B. Pastagens cultivadas na Amazônia Oriental Brasileira: processos e causas da degradação e estratégias de recuperação. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. (eds.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas/Universidade Federal de Viçosa, 1998. p. 135-147.

DINIZ, J. A. **A área centro-ocidental do Nordeste**. Recife: SUDENE, 1982.

DRIEMEIR, D. *et al.* Relação entre macrófagos espumosos (foam cells) no fígado de bovinos e ingestão de *Brachiaria* spp no Brasil. **Pesq. Vet. Bras.**, v. 19, n. 2, p. 79-83, abr./jun. 1999.

DRUMOND, M. A. *et al.* Desempenho agrônômico de genótipos de pinhão manso no semiárido pernambucano. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 1, p. 44-47, fev. 2010.

DRUMOND, M. A. *et al.* Produção de pinhão manso no Semiárido brasileiro. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE AGROENERGIA E BIOCOMBUSTÍVEIS, Teresina, 2007. **Anais...** Teresina: Embrapa Meio Norte, 2007.

DULEBA, S. **Primeira etapa de implantação do sistema Silvopastoril**. Fazenda Cabeceira do prata, [s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.pantanalecoturismo/fotos/arquivos/596.pdf>> . Acesso em: 22 mai. 2019.

DURIGON, V. L. **Avaliação da cobertura e perdas de solo na Bacia Hidrográfica Palmares-Ribeirão do Saco, em Paty do Alferes e Miguel Pereira-RJ, através de técnicas de sensoriamento remoto e SIG**. 2011. 134 f. Tese (Doutorado em Ciências em Agronomia) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. ***Brachiaria brizantha* cv. Piatã**: Gramínea Recomendada para Solos Bem-drenados do Acre. 2010. Disponível em: www.cnpqg.embrapa.br/. Acesso em: 06 jan. 2018.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. ***Brachiaria* spp**. 2005. Disponível em: www.cnpqg.embrapa.br/eventos/2005/workshop-mortebrachiaria/. Acesso em: 06 jan. 2018.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS/EMBRAPA, 1997.

EUCLIDES, V. B. P. Valor alimentício de espécies forrageiras do gênero *Panicum*. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 12, Piracicaba, 1995. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1995. p. 245-274.

EUCLIDES, V. P. B. *et al.* Brazilian scientific progress in pasture research during the first decade of XXI century. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, suppl., p. 151-168, 2010.

FAO. **Soil erosion**: the greatest challenge to sustainable soil management. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 2019.

FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. Disponível em: https://dcs.ufla.br/images/imagens_dcs/pdf/Prof_Faquin/Nutricao%20mineral%20de%20plantas.pdf. Acesso em: 28 jul. 2018

FENDRICH, R. *et al.* **Drenagem e controle da erosão urbana**. Curitiba: Ibrasa Champagnat, 1988.

FERNANDES, C.; CORÁ, J. E.; BRAZ, L. T. Alterações nas propriedades físicas de substratos para cultivo de tomate cereja, em função de sua reutilização. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 1, p. 94-98, 2006.

FERNANDES, M. M. *et al.* Biomassa microbiana e matéria orgânica em áreas desertificadas revegetadas com pinhão-mansão solteiro e consorciado com gramínea no Sul do Piauí. **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.**, Recife, v. 8, n. 3, p. 464-469, 2013.

FERREIRA, F. C. *et al.* O papel do geoprocessamento na preservação do patrimônio cultural nacional nos municípios de Porto Seguro e Santa Cruz Cabrália, Bahia: procedimentos e desafios. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15, Curitiba, 2011. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011.

FILGUEIRAS, T. S. Desertificação em Gilbués, Piauí; uma análise agrostológica. **Caderno de Geociências**, Rio de Janeiro, n. 7, p. 23-27, 1991.

FILGUEIRAS, T. S. A floriste analysis of the gramineae of Brazil's Distrito Federal and a list of the species occurring in the area. **Edinburgh J. Bot.**, v. 48, n. 1, p. 73-80, 1991.

FRANCO, A. A. Revegetação de solos degradados. In: WORKSHOP SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, I, Itaguaí, 1991. **Anais...** Itaguaí: Editora UFRRJ, 1991. p. 133-157.

FRANDOLOSO, J. F. **Acúmulo de nutrientes e crescimento do pinhão manso no oeste do Paraná**. 2012. 79 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2012.

FREIBERGER, M. B. *et al.* Crescimento inicial e nutrição de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) em função de doses de doença. **Revista Árvore**, v. 37, p. 385-392, 2013.

FREITAS, D. E. F. *et al.* Physical Indicators of Soil Quality in Oxisols Under Brazilian Cerrado. In: SORIANO, M. C. H. **Soil processes and current trends in quality assessment**. Rijeka: InTech, 2013. p. 87-110.

GHEZEHEI, S. B.; EVERSON, C. S.; ANNANDALE, J. G. Can productivity and postpruning growth of *Jatropha curcas* in silvopastoral systems be regulated by manipulating tree spacing/arrangement without changing tree density? **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 74, p. 233-243, 2015.

GIOIA, M. T. **Produtividade e qualidade da cana soca correlacionadas com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho Distrófico do noroeste Paulista**. 2011. 127 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, C. R. F. S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 567-577, jan./fev. 2011.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J de D. V. da. Análises exploratória e geostatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1149-1157, 2001.

GONZALES, R. M. Joint learning with GIS: multi-actor resource management. **Agricultural Systems**, v. 73, n. 1, p. 99-111, jul. 2002.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, v. 89, n. 1-2, p. 1-45, 1999.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A. Spatial variability of some biometric attributes of sugarcane plants (variety IACSP93-3046) and its relation to physical and chemical soil attributes. **Bragantia**, Campinas, v. 69, suppl., p. 107-119, 2010.

GRIFFITH, J. J. **Recuperação de áreas degradadas em unidades de conservação**. Viçosa: UFV, 1986.

GUEDES FILHO, O. *et al.* Geostatistical analysis of crop yield maps in a long term no tillage system. **Bragantia**, Campinas, v. 69, suppl., p. 9-18, 2010.

GUERRA, A. J. T. Início do processo erosivo. In: Erosão e conservação dos solos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (orgs.). **Erosão e Conservação dos Solos, temas e aplicações: Conceitos, Temas e Aplicações**.. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 17-33.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (orgs.). **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.

GUIMARÃES, A. S. **Crescimento inicial do pinhão-mansô (*Jatropha curcas* L 1753.) em função de fontes e quantidades de fertilizantes**. 2008. 92 f. Tese (Doutorado em Ecologia Vegetal e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2008.

GUIMARÃES, W. D. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247-255, abr./jun. 2016.

GUTJAHR, A. Spatial variability of soil properties. In: NIELSEN, D. R.; BOUMA, J. (eds.). **Spatial Variability**. Wageningen: PUDOC, 1985. p. 9-34.

HAAG, H. P. **Ciclagem de nutrientes em florestas tropicais**. Campinas: Fundação Cargill, 1985.

HAGGAR, R.J. The effect of quantity, source and time of application of nitrogen fertilizers on the yield and quality of *Andropogon gayanus* at Shika, Nigeria. **Journal Agriculture Science**, v. 84, p. 529-535, 1975.

HENNING, R. K. **The Jatropha system: an integrated approach of rural development**. Gruebels: Weisseberg, 2009.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press, 1980.

HODGSON, J.; SILVA, S. C. Options in tropical pasture management. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39, Recife, 2002. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2002. p. 180-202.

HORSCHUTZ, A. C. O. *et al.* Crescimento e produtividade do pinhão-mansão em função do espaçamento e irrigação. **Rev. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 16, n. 10, p. 1093-1099, out. 2012.

HURTADO, S. M. C. *et al.* Spatial variability of soil acidity attributes and the spatialization of liming requirement for corn. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1351-1359, 2009.

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

JESUS, R. M. de. Revegetação: da teoria à prática. Técnicas de implantação. In: SIMPÓSIO SULAMERICANO SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1, SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 2, Foz do Iguaçu, 1994. **Anais...** Curitiba: FUPEF, 1994. p. 123-134.

JOHN, B. *et al.* Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. **Geoderma**, v. 128, n 1-2, p. 63-79, sep. 2005.

JONG VAN LIER, Q. de. Índices da disponibilidade de água para as plantas. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 1, p. 95-106, 2000.

JORGE, R. F. *et al.* Distribuição de poros e densidade de Latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 159-169, 2012.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C. A. (ed.) **Methods of soil analysis**. Madison. American Society of Agronomy, 1965. p. 449-510.

- KHEIRA, A. A. A.; ATTA, N. M. M. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficit: Yield, water use efficiency and oilseed characteristics. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 33, n. 10, p. 1343-1350, oct. 2009.
- KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia: relações solo-planta**. 1. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3.ed. Passo Fundo: Editora UPF, 2014.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 857-867, dez. 2002.
- KUWANO, B. H. *et al.* Soil quality indicators in a rhodic kandiuult under different uses in northern Parana, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 1, p. 50-59, 2014.
- LAIME, E. M. O. *et al.* Desenvolvimento de pinhão-mansão em função de diferentes lâminas de irrigação com água superficial poluída. **Revista Educação Agrícola Superior**, v. 24, n. 4, p. 107-111, ago. 2009.
- LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, Campinas, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Trad. RiMa. São Carlos: Rima, 2006.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. Trad. RiMa. São Carlos: Rima, 2000.
- LAVIOLA, B. G.; DIAS, L. A. S. Teor e acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão-mansão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1969-1975, 2008.
- LEITE, G. G. A planta forrageira no sistema de produção. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 17, Piracicaba, 2001. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2001.
- LEITE, L. F. C. *et al.* Variabilidade espacial das frações da matéria orgânica do solo em área degradada sob recuperação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 394-401, 2015.
- LEMOS FILHO, L. C. A. *et al.* Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Rev. Ciência Agrônômica**, v. 39, n. 2, p. 193-202, abr./jun. 2008.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: EDUSP, 2005.
- LIMA, C. L. D. de. **Estrutura do dossel e acúmulo de forragem dos capins piatã e marandu sob pastejo com ovinos**. 2013. 51 f. Dissertação (Mestrado em Produção Animal) – Programa de Pós-Graduação em Produção Animal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2013.

LIMA, G. C. **Avaliação de atributos indicadores da qualidade do solo em relação à recarga de água na sub-bacia das Posses, Extrema, MG.** 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2311-2320, 1999.

LIMA, C. G. da R. *et al.* Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1233-1244, 2007.

LIMA, C. L. R. *et al.* Atributos físicos de um Planossolo Háplico sob sistemas de manejo comparados aos do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1849-1855, out. 2008.

LIMA, F. V. *et al.* Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em área de encosta sob processo de degradação. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 53-63, out./dez. 2015.

LIMA, R. L. S. *et al.* Crescimento e teor foliar de nutrientes em mudas de pinhão-mansó (*Jatropha curcas* L.) em substratos contendo cinco materiais orgânicos e fertilizante mineral. **Revista de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 29-36, jan./abr. 2009.

LIMA, S. S. *et al.* Atributos químicos e estoque de carbono e nitrogênio em Argissolo Vermelho – Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 51-60, 2011.

LITTLE, T. M.; HILLS, F. J. **Agricultural experimentation.** New York: John Wiley, 1978.

LONGO, R. M. **Modificações em parâmetros físicos e químicos de latossolos argilosos decorrentes da substituição da Floresta Amazônica e do Cerrado por pastagens.** 1999. 102 f. Tese (Doutorado em Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

LOPES, L. S. L. de O.; SOARES, R. C. Suscetibilidade à desertificação das terras secas de Gilbués (Estado do Piauí) e Cabrobó (Estado do Pernambuco), nordeste do Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, v. 1, n. 56, p. 307-323, 2016.

LOPES, L. S. L. de O.; SANTOS, R. W. P.; MIGUEL FILHO, M. A. Núcleo de desertificação de Gilbués (PI): causas e intervenções. **Revista Geografia**, Londrina, v. 20, n. 2, p. 53-66, 2011.

LOSS, A. *et al.* Atributos químicos e físicos de um Argissolo Vermelho-Amarelo em sistema integrado de produção agroecológica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 1, p. 68-75, 2009.

MAFRA, A. L. *et al.* Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, p. 217-224, 2008.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum, Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 249-254, jun. 2011.

MARIA, I. C.; KOCSSI, M. A.; FALCIDECHEN, S. C. Agregação do solo em área que recebeu lodo de esgoto. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, p. 291-298, 2007.

MARQUES JÚNIOR, J. *et al.* Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 125-143, 2008.

MARTHA JÚNIOR, B. G.; VILELA, L. Uso de fertilizante em pastagens. In: MARTHA JÚNIOR, B. G.; VILELA, L. (orgs.). **Cerrado: uso eficiente de corretivos e fertilizantes em pastagens**. 1. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2007. p. 43-68.

MARTINS, A. L. da S.; MOURA, E. G. de; CAMACHO-TAMAYO, J. H. Evaluation of corn production parameters and their spatial relationship with chemical attributes of the soil. **Agronomia Colombiana**, Bogotá, v. 29, n. 1, p. 99-106, 2011.

MARTINS, C. C. *et al.* Tamanho e secagem de palmeira Jussara sobre a germinação e o vigor. **Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 2, p. 117-120, 2009.

MARTINS, S. G. *et al.* Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. **Cerne**, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-42, 2002.

MATIAS, M. da C. B. *et al.* Propriedades químicas em Latossolo Amarelo de Cerrado do Piauí sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 3, p. 356-362, jul./set. 2009.

MATOS, E. S. *et al.* Estabilidade de agregados e distribuição de carbono e nutrientes em Argissolo sob adubação orgânica e mineral. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 43, n. 9, p. 1221-1230, set. 2008.

MCBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties. **Soil Science**, Baltimore, v. 135, n. 3, p. 177-183, 1983.

MELLONI, R.; MELLONI, E. G. P.; VIEIRA, L. L. Uso da terra e a qualidade microbiana de agregados de um Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 678-688, dez. 2013.

MELO, L. F. S. **Caracterização dos níveis de degradação de solos da microbacia do Sucuruí no núcleo de Desertificação de Gilbués**. 2010. 35 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2010.

MENDES, F. G.; MELLHONI, E. G. P.; MELLHONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da 211 qualidade de áreas impactadas, em Itajubá-MG. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 211-220, jul./set. 2006.

- MENDONÇA, S. A. **Avaliação agronômica e modo de reprodução de híbridos intraespecíficos de *Brachiaria decumbens***. 2012. 59 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Medicina Veterinária e Zootecnia, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.
- MEURER, E. J. **Fundamentos de Química do Solo**. Porto Alegre: Evangraf, 2012.
- MONTANARI, R. *et al.* Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e de atributos do solo na região do ecótono cerrado-pantanal, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 385-396, mar./apr. 2015.
- MORAES, A. C. P de. **Diversidade Fenotípica e Determinação do Teor de óleo em Pinhão-manso por Espectroscopia no Infravermelho Próximo**. 2016. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2016.
- MOREIRA, F. M. S.; MOREIRA, F. W. Característica de germinação de 64 espécies de leguminosas florestais nativas da Amazônia, em condições de viveiro. **Acta Amazônica**, v. 26, n. 1-2, p. 3-16, 1996.
- MULLA, D. J.; BHATTI, A. U.; KUNKEL, R. Methods for removing spatial variability from field research trials. **Advance in Soil Science**, v. 13, p. 201-213, 1990.
- NASCIMENTO, M. do P. S. C. B. do; RENVOIZE, S. A. **Gramíneas forrageiras naturais e cultivadas na Região Meio-Norte**. 1. ed. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2001.
- NASCIMENTO, M. do P. S. C. B.; RENVOIZE, S. A.; NASCIMENTO, H. T. S. do. **Gramíneas da região de Mimoso no Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2002.
- NAZÁRIO, W. *et al.* Intoxicação experimental produzida pelo *Pithomyces chartarum* (Berk. & Curt.) M.B. Ellis, isolado de *Brachiaria decumbens*. **Biol.**, v. 43, n. 5, p. 125-131, 1977.
- NETO, M. C. **Pinhão-Manso: características botânicas**. 2007. Disponível em: <http://brasilbio.blogspot.com/2007/11/caractersticas-botnicas.html>. Acesso em: 11 mar. 2018.
- NOGUEIRA, M. C. S. **Experimentação agronômica I**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2007.
- NUNES, C. F. **Caracterização de frutos, sementes e plântulas e cultivo de embriões de pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.)**. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.
- NUNES, C. F. *et al.* Morfologia externa de frutos, sementes e plântulas de pinhão-manso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 207-210, 2009.
- NUNES, C. F. *et al.* Diferentes suplementos no cultivo in vitro de embriões de pinhão manso. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 9-14, jan. 2008.

OLDEMAN, L. R. The global extent of soil degradation. In: GREENLAND, D. J.; SZABOCLS, I. **Soil Resiliense and sustainable Land Use**. Wallingford: CabInternational, 1994. p. 99-118.

OLIVEIRA, E. L. *et al.* Resposta do pinhão-mansão à aplicação de níveis de irrigação e doses de adubação potássica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 6, p. 593-598, 2012.

OLIVEIRA, I. A. *et al.* Use of Scaled Semivariograms in the Planning Sample of Soil Physical Properties in Southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 31-39, 2015a.

OLIVEIRA, I. A. *et al.* Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 45, n. 1, p. 1-12, 2015b.

OTTONI, M. V. **Classificação Físico-Hídrica de Solos e Determinação da Capacidade de Campo *in situ* a partir de Testes de Infiltração**. 2005. 156 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharias, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

OVALLES, F. A.; COLLINS, M. E. Evaluation of soil variability in northwest Florida using geostatistics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 6, p. 1702-1708, nov./dec. 1988.

PARFITT, J. M. B. *et al.* Spatial variability of the chemical, physical and biological properties in lowland cultivated with irrigated rice. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 819-830, 2009.

PARTELLI, F. L. *et al.* Root system distribution and yield of 'Conilon' coffee propagated by seeds or cuttings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 5, p. 349-355, may 2014.

PAZ-GONZALEZ, A.; TABOADA CASTRO, M. T.; VIEIRA, S. R. Geostatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine area. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 81, p. 469-479, 2001.

PEDRON, F. A. *et al.* Condutividade e retenção de água em Neossolos e saprolitos derivados de Arenito. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1253-1262, 2011.

PEREIRA, A. R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. Belo Horizonte: FAPI, 2006.

PEREIRA, G. T. *et al.* Optimization of the sampling scheme for maps of physical and chemical properties estimated by kriging. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1128-1135, 2013.

PIAUÍ. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Piauí (SEMAR). **Panorama da Desertificação no Estado do Piauí**. Teresina: SEMAR, 2005.

PINAZZA, A. H.; STOLF, R.; MACEDO, N. **Avaliação econômica de sistema de consórcio intercalar cana-de-açúcar/milho**. Piracicaba: STAB, 1994.

PRANDINI, F. L.; IWASA, O. Y.; OLIVEIRA, A. M. S. A cobertura vegetal nos processos e evolução do relevo: o papel da floresta. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSENCIAS NATIVAS, 1, Campos de Jordão, 1982. **Anais...** Campos de Jordão: Silvicultura em São Paulo, 1982. p. 1568-1582.

PRUSKI, F. F. *et al.* **Hidros, dimensionamento de sistemas hidroagrícolas**. Viçosa: Editora UFV, 2005.

PURCINO, A. A.; DRUMMOND, O. A. **Pinhão-manso**. Belo Horizonte: EPAMIG, 1986.

RAMIREZ, M. A. **Consumo e digestibilidade aparente de fenos de Brachiaria decumbens, staph cultivar Basiliski cortados em três diferentes idades**. 2010. 48 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2008.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L.S. da; REICHERT, J. M. (eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.

REICHERT, J. M. *et al.* Reference bulk density and critical degree-ofcompactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242-254, mar. 2009.

REINERT, D. J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris. In: DIAS, L. E.; MELLO, J. W. V. **Recuperação de Áreas Degradadas**. Viçosa: UFV/Departamento de Solos/Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998. p. 163-176.

RENVOIZE, S. A.; CLAYTON, W. D.; KABUYE, C. H. S. Morfología, Taxonomía y distribución natural de Brachiaria (Trin.) Griseb. In: MILES, J. W.; MAASS, B. L.; VALLE, C. B. (eds.). **Brachiaria: biología, agronomía y mejoramiento**. 1. ed. Cali: Centro Nacional de Agricultura Tropical; Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 1998. p. 1-17.

RESENDE, M. *et al.* **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5. ed. rev. Lavras: Editora UFLA, 2007.

RIBASKI, J. *et al.* **Sistemas Silvopastoris: Estratégias para o Desenvolvimento Rural Sustentável para a Metade Sul do Estado do Rio Grande do Sul**. Colombo: EMBRAPA, 2005.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. **Recomendações para uso de corretivo e fertilizantes em Minas Gerais**. 5. aprox. Viçosa: Comissão de Fertilidade do solo do Estado de Minas Gerais, 1999.

RIBON, A. A.; TAVARES FILHO, J. Model propositions for the estimation of the physical quality of a Yellow Red Latosol (Oxisol) under pasture. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 1, p. 25-31, mar. 2004.

RICHARDS, L. A.; WEAVER, L. R. Fifteen– atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Science**, v. 56, n. 5, p. 331-340, nov. 1944.

RICHART, A. *et al.* Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, jul./sep. 2005.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: Geostatistics for the environmental sciences. Plainwell: Gamma Design Software, 2008.

RODRIGUES, S. P. Abordagem Morfopedologica Aplicada a Prevenção e Contenção de Processos Erosivos. 2011. 141 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: field. In: DANE, J. H.; TOPP, C. (Eds.). **Methods of soil analysis**. Part 4. Physical methods. Madison: Soil Science Society of America, 2002.

ROSADO, T. B. *et al.* Molecular Markers Reveal Limited Genetic Diversity in a Large Germplasm Collection of the Biofuel Crop L. in Brazil. **Crop Science**, Madison, v. 50, n. 6, p. 2372-2382, nov./dec. 2010.

ROSENDO, J. dos S.; ROSA, R. Análise da detecção de mudanças no uso da terra e cobertura vegetal utilizando a diferença de índice de vegetação. In: SIMPÓSIO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XIII, Florianópolis, 2007. **Anais...** Florianópolis, 2007. p. 4209-4216.

ROUSSEAU, G. X. *et al.* Indicating soil quality in cacao-based agroforestry systems and old-growth forests: the potential of soil macrofauna assemblage. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 23, p. 535-543, dec. 2012.

ROUSSEAU, L. *et al.* Soil macrofauna as indicators of soil quality and land use impacts in smallholder agroecosystems of western Nicaragua. **Ecological Indicators**, Amsterdam, v. 27, p. 71-82, 2013.

RUIZ, J. C. L. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em variedades de Pinus**. 2016. 69 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2016.

SALOMAO, F. X. T. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M. (orgs.). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 229-267.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* (L) em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 115-122, mar. 1998.

SAMPAIO, E. V. S. B. *et al.* **Desertificação no Brasil: conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2003.

SANCHEZ, R. B. *et al.* Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedofomas. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 1095-1103, 2009.

SANCHEZ, R. B. *et al.* Variabilidades espacial de propriedades de latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, 2005.

SÁNCHEZ, S.; HERNÁNDEZ, M.; SIMÓN, L. Efecto del sistema silvopastoril en la fertilidad edáfica en unidades lecheras de la empresa Nazareno. **Pastos y Forrajes**, v. 26, n. 2, p. 131-136, abr./jun. 2013.

SANTANA, M. A. **Avaliação dos fatores responsáveis pela fragilidade dos solos na região de Marília (SP)**. 1991. 161 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

SANTOS, C. M. **Fenologia e capacidade fotossintética do pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.) em diferentes épocas do ano no estado de Alagoas**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2008.

SANTOS, H. L. **Variabilidade espacial dos atributos do solo, erosão e suscetibilidade magnética de uma vertente em Gilbués, PI**. 2010. 74 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

SANTOS, O. N. A. **Irrigação e tipos de poda no cultivo de pinhão-mansão em Piracicaba, SP**. 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

SANTOS, C. M. *et al.* Fenologia e crescimento do pinhão-mansão cultivado na zona da mata do Estado de Alagoas, Brasil. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 3, p. 201-209, may/jun. 2010.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2018.

SATO, M. *et al.* A cultura do pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.): uso para fins combustíveis e descrição agrônômica. **Revista Varia Scientia**, v. 7, n. 13, p. 47-62, jan./jul. 2009.

SATURNINO, H. M. *et al.* Cultura do pinhão-mansão (*Jatropha curcas* L.). **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 26, n. 229, p. 44-78, 2005.

SCHULZ, D. G. *et al.* Crescimento de pinhão-mansão em função da área útil e do consórcio com Tifton 85. **Floresta**, Curitiba, v. 44, n. 2, p. 207-216, abr./jun. 2014.

SERAFIM, V. F.; GOMES, V. M.; SEIXAS, A. A. Manejo do pastejo para capim-andropógon – revisão de literatura. **Revista Científica de Medicina Veterinária**, ano XXIV, n. 24, p. 1-9, jan. 2015.

SERRÃO, E. A. D.; SIMÃO NETO, M. Informações sobre duas espécies de gramíneas forrageiras do gênero *Brachiaria* na Amazônia: *Brachiaria decumbens* Stapf e *Brachiaria ruziziensis* Germanin et Everard. **Inst. Pesq. Exp. Agrop.**, Belém, v. 2, n. 1, p. 1-31, 1971.

SILVA, A. B. **Sistemas de informações geo-referenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Editora UNICAMP, 1999.

SILVA, B. M. **Disponibilidade de água no solo: métodos de estimativa e implicações de manejo em cafeeiros na região do Cerrado**. 2014. 135 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SILVA, F. B. **Geotecnologias no mapeamento de áreas degradadas no núcleo de desertificação em Gilbués**. 2008. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2008.

SILVA, I. A. de S. **O Núcleo de degradação Ambiental de Gilbués-Piauí: análise climática e indicadores Geoambientais**. 2011. 80 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia) – Curso de Geografia, Universidade Federal de Goiás, 2011.

SILVA, J. A. N. da. **Consórcio de pinhão-manso com espécies forrageiras e produtoras de grãos**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2011.

SILVA, M. D. da. **Atributos químicos e biológicos de um Neossolo Litólico eutrófico com exposição do horizonte “c”, cultivado com pinhão manso e gramíneas, em área degradada no município de Gilbués, PI**. 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal do Piauí, Bom Jesus, 2012.

SILVA, S. C. da. **Fundamentos para o manejo do pastejo de plantas forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum***. 2004. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~freitasjaf/artigos/fundamentosparamanejobrachiariaepanicum.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2018.

SILVA, G. A. N. P. da *et al.* **Projeto Gilbués**. Gilbués: DNPM/CPRM, 1972.

SILVA, J. E. da *et al.* Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the “Cerrado” region, Brasil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 103, p. 357-363, 2004.

SILVA, L. C. R. *et al.* Unprecedented carbon accumulation in mined soils: the synergistic effect of resource input and plant species invasion. **Ecological Applications**, v. 23, n. 6, p. 1345-1356, sep. 2013.

SILVA NETO, S. P. *et al.* Dependência espacial em levantamentos do estoque de carbono em áreas de pastagens de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Acta Amazônica**, v. 42, n. 4, p. 547-556, 2012.

SINGH, B. *et al.* Agro-technology of *Jatropha curcas* for diverse environmental conditions in India. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 48, p. 191-202, jan. 2013.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n. 1-2, p. 55-66, feb. 2010.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v. 67, n. 1, p. 203-211, 2008.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2006.

SOARES, M. O. R. *et al.* Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 2, p. 125-153, maio/jun. 2018.

SOARES FILHO, C. V.; MONTEIRO, F. A.; CORSI, M. Recuperação de pastagens degradadas de *Brachiaria decumbens* 1. Efeito de diferentes tratamentos de fertilização e manejo. **Pasturas Tropicais**, v. 14, n. 2, p. 2-6, 1992.

SOTOMAYOR-RIOS, A.; RODRIGUEZ-GARCIA, J.; VELEZ-SANTIAGO, J. Effect of three harvest intervals on the yield and protein. **Journal of Agriculture of University of Puerto Rico**, Rio de Piedras, v. 65, n. 2, p. 147-153, 1981.

SOUTO, J. S. *et al.* Uso da técnica restauradora “*BOCAJ*” em área de Caatinga no Seridó da Paraíba, Brasil. **ACSA: Agropecuária Científica no Semiárido**, Patos, v. 13, n. 2, p. 154-161, abr./jun. 2017.

SOUSA, B. M. de L. **Morfogênese e características estruturais dos capins *Andropogon e Xaraés* submetidos a três alturas de corte**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informática Tecnológica, 2004.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho Distrófico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 133-139, fev. 2003.

SOUZA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F. *et al.* **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2007. p. 205-274.

SOUZA, Z. M. de; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape

shapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 52, n. 2, p. 305-316, 2009.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 491-499, maio 2004.

SOUZA, Z. M. *et al.* Otimização amostral de atributos de Latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, v. 36, n. 3, p. 829-836, jun. 2006.

STÜRMER, S. L. K. **Infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul**. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SUJATHA, M.; DHINGRA, M. Rapid plant regeneration from various explants of *Jatropha integerrima* - Hypocotyl culture, shoot culture, leaf culture and peduncule culture medium optimization for oilseed ornamental plant propagation. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, Dordrecht, v. 35, n. 3, p. 293-296, dez. 1993.

TEIXEIRA, A. L. A. **Avaliação hídrica do pinhão manso**. Curitiba: 2005. VARCEL, R. Plano de Recuperação Ambiental. Serviços de Engenharia RODOFÉRREA S. A. RJ, 1994.

TEWARI, D.N. *Jatropha and biodiesel*. New Delhi: Ocean Books, 2007. 227 p.

TIBAU, A. O. **Matéria orgânica do solo: matéria orgânica e fertilidade do solo**. São Paulo: Nobel, 1984.

TIMOSSI, P. C.; DURIGAN, J. C.; LEITE, G. J. Formação de palhada por braquiárias para adoção do sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 617-622, 2007.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **J. Soil Sci.**, v. 33, n. 2, p. 141-163, jun. 1982.

TOY, T. J.; DANIELS, W. L. Reclamation of disturbed lands. In: MAYER, R. A. **Encyclopedia of environmental analysis and remediation**. New York: John Wiley, 1998. p. 4078-4101.

TREVISANUTO, C.; COSTA, C.; LUPATINI, G. C.; MEIRELLES, P. R. L.; VIDESCHI, R. A. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 45, Lavras, 2008. **Anais...** Brasília: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2008.

TROVÃO, D. M. de B. *et al.* Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 307-311, jun. 2007.

TSEGAYE, T.; HILL, R. L. Intensive tillage effects on spatial variability of soil physical properties. **Soil Science**, v. 163, n. 2, p. 143-154, 1998.

VALLE, C. B. do *et al.* Gênero *Brachiaria*. In: FONSECA, D. M.; MATUSCELLO, J. A. (orgs.). **Plantas Forrageiras**. Viçosa: Editora UFV, 2010. p. 30-77.

VASCONCELOS SOBRINHO, J. **Metodologia para identificação de processos de desertificação**: manual de indicadores. Recife: SUDENE, 1978.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils. **Soil Science**, v. 68, n. 1, p. 75-95, jul. 1949.

VELOSO, M. E. da C. *et al.* Características químicas de um Neossolo litólico em área degradada em Gilbués, Piauí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS DE PINHÃO-MANSO, II, Brasília, 2011. **Anais...** Brasília, 2011.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (eds.) **Tópicos ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 6, p. 1271-1280, dez. 2007.

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P. de; GONZALEZ, A. P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, Campinas, v. 69, suppl., p. 97-105, 2010.

VIEIRA, S. R. *et al.* Spatial variability of soil chemical properties after coffee tree removal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 1507-1514, 2009.

VIEIRA, S. R. *et al.* Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, V. C. B.; SALVIANO, A. A. C.; COSTA, E. F.; SILVA, F. B.; CORDEIRO, E.; MELO, L. F. S.; FERREIRA, G. B. T. F. Mapeamento de áreas degradadas na região do cerrado do Sul do Piauí. Fortaleza: Convênio Fundação Agente/ CODEVASF, 2007. 75p. (Relatório Técnico)..

VILELA, H. **Pastagem**: seleção de plantas forrageiras, implantação e adubação. Viçosa: Aprenda Fácil Editora, 2005.

VRIES, G. J. D.; TIMMER, M. P.; VRIES, K. D. **Structural transformation in Africa**: static gains, dynamic losses. Groningen: GGDC Working Papers, 2013.

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

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: STEWART, B. A. (ed.). **Advance in Soil Science**. 3. v. New York: Springer, 1985. p. 1-70.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. **Geoestatística para Cientistas Ambientais Estatística na Prática**. Chichester: Wiley, 2001.

WENDLING, B. *et al.* Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 5, p. 487-494, 2005.

WINTER, E. J. A água, o solo e a planta. São Paulo, SP : EDUSP, 1976. 170 p. il. Traduzido por : Klaus Reichardt e Paulo L. Libardi.

WINTER, E. J. **A água, o solo e a planta**. Traduzido por : Klaus Reichardt e Paulo L. Libardi. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1984. 170p.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B.; CROSS, B. V. A soil erodibility monograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 26, n. 5, p. 189-193, 1971.

ZANIN, A. **Andropogon in Lista de Espécies da Flora do Brasil**. 2015. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB12961>. Acesso em: 22 fev. 2018.

ZANINE, A. M. *et al.* Comportamento ingestivo de vacas Girolandas em pastejo de *Brachiaria brizantha* e *Coast-cross*. **Revista Brasileira de Saúde em Produção Animal**, v. 10, n. 1, p. 85-95, 2009.

ZHOU, H. *et al.* Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 124, p. 7-23, aug. 2012.

ZIMMER, A. H.; SILVA, M. P.; MAURO, R. Sustentabilidade e impactos ambientais da produção animal em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DE PASTAGEM, Piracicaba, 2002. **Anais...** Piracicaba, 2002. p. 31-58.