UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS

CÂMPUS DE JABOTICABAL

ANÁLISE COMPARATIVA GEOESTATÍSTICA DE PRODUTIVIDADE DE CAPIM EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO

GUILHERME T. PADILHA STEFANO

Orientador: Prof. Dr. Rafael Montanari

Coorientador: M.Sc. Nilton Eugénio Mário

Jaboticabal – SP

Junho de 2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE CIÊNCIAS E VETERINÁRIAS CÂMPUS DE JABOTICABAL

ANÁLISE COMPARATIVA GEOESTATÍSTICA DE PRODUTIVIDADE DE CAPIM EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO

GUILHERME T. PADILHA STEFANO

Orientador: Prof. Dr. Rafael Montanari

Coorientador: M.Sc. Nilton Eugénio Mário

trabalho apresentado à faculdade de ciências agrárias e veterinárias - UNESP, campus de jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA AGRONÔMICA.

Jaboticabal - SP

1° semestre/2026

S816a

Stefano, Guilherme Teixeira Padilha

Análise comparativa geoestatística de produtividade de capim em relação aos atributos químicos e físicos do solo. / Guilherme Teixeira Padilha Stefano. -- Jaboticabal, 2026

36 p. : il., tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agronômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rafael Montanari

Coorientador: Nilton Eugénio Mário

1. Plantas e solo. 2. Solos Manejo. 3. Produtividade agrícola. 4. Fisica do solo. 5. Estatística. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

Guilherme Teixeira Padilha Stefano

Análise comparativa geoestatÍstica de produtividade de capim em reação aos atributos químicos e físicos do solo.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em **Engenharia Agronômica**.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Montanari

Coorientador (se houver): M.Sc. Nilton Eugénio Mário

Área de Concentração: Ciências do solo

Trabalho aprovado em 30/06/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br
RAFAEL MONTANARI
Data: 03/07/2026 06:56:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Prof. Dr. Rafael Montanari
UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br
DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA
Data: 03/07/2026 09:16:53-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Prof. Dr. Douglas Henrique Bandeira
UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br
JOAO VICTOR CAMARGO AMBROSIO
Data: 03/07/2026 12:54:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Zootecnista João Victor Camargo Ambrósio
UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ
Data: 22/07/2026 22:25:32-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Prof. Dr. Mara Cristina Pessoa da Cruz
Chefe do Departamento

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, que sempre estiveram presentes em minha vida, concedendo-me força e proteção nos momentos bons e difíceis, permitindo que eu seguisse minha caminhada. Agradeço à minha mãe, Andreia, mulher guerreira e batalhadora, que sempre me guiou e apoiou em minhas escolhas. Ao meu pai, Leocir, agradeço por ter me formado como homem, ensinando-me valores essenciais e acolhendo-me diante das dificuldades que a vida apresenta. Aos meus avós, expresso minha gratidão por terem sido grandes influenciadores na escolha do curso de Engenharia Agronômica da UNESP, decisão que me proporcionou inúmeras conquistas, aprendizados e alegrias. À dona Euci (Mel), meu sincero agradecimento por ter sido minha segunda mãe durante a graduação, não apenas cuidando de mim, mas também aconselhando, acolhendo e apoiando-me nos mais diversos momentos. Certamente, será sempre uma das pessoas mais importantes da minha vida.

Agradeço à minha casa durante a graduação, a República Caipirada, e aos irmãos que nela encontrei: Pardin, Ribiti, Perecível, Mazzaropi, Çuicida, Disteiado, Macauly, Fatura, Receba, Pós-Love, Sarna, Ying, Yang e Iguaçu. Tive o privilégio de conviver com vocês ao longo dessa jornada e construir amizades, histórias e lembranças que levarei para toda a vida. Estendo também meu agradecimento a todos os ex-moradores que, mesmo sem terem convivido diretamente comigo, contribuíram para a construção dessa família que tanto representa para mim. Pessoas diferentes entre si, mas que me ensinaram valiosas lições sobre amizade, respeito, convivência e companheirismo. Obrigado, irmãos! Agradeço também ao grupo de repúblicas amigas, conhecido como “Complexo”, formado pelas Repúblicas Caipirada, Boi Banguelo, Xapô Kabô e K-Zona Rural. Ao longo da graduação, compartilhei inúmeros momentos com seus integrantes, construindo amizades que certamente levarei para toda a vida. À turma da Agro021, meu muito obrigado pela amizade, parceria e pelos momentos compartilhados durante essa caminhada. Levarei comigo o carinho e a admiração por cada um de vocês.

Agradeço ao Departamento de Ciência do Solo da FCAV/UNESP por todo o conhecimento transmitido, pela colaboração, paciência e parceria ao longo dos anos em que realizei minhas atividades de estágio. Essa experiência foi fundamental para minha formação acadêmica e profissional, contribuindo significativamente para meu crescimento pessoal e técnico.

Em especial, agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Rafael Montanari, Prof. Dr. Douglas Henrique Bandeira e M.Sc. Nilton Eugénio Mário, pelo apoio, dedicação e ensinamentos durante o desenvolvimento deste trabalho. A contribuição de cada um foi essencial para sua realização, e levarei comigo os conhecimentos e experiências compartilhados ao longo dessa trajetória. Por fim, agradeço à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, campus de Jaboticabal, por toda a sua estrutura, excelência acadêmica, qualidade de ensino e dedicação de seus colaboradores. Tenho orgulho de ter feito parte desta instituição, que, em minha opinião, está entre as melhores universidades do Brasil.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS 3
RESUMO 6
ABSTRACT 7
1. INTRODUÇÃO 8
2. MATERIAIS E MÉTODOS 11
2.1. Local e Área experimental 11
2.2. Histórico da área experimental 11
2.3. Caracterização inicial do solo da área de estudo 12
2.4. Coletas de dados 12
2.5. Caracterização da malha experimental de campo 13
2.6. Atributos físico-químicos do solo 13
2.7. Produção de matéria seca 16
2.8. Análise estatística dos atributos pesquisados 16
2.9. Análise geoestatística dos atributos físico-químicos do solo 17
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES 19
3.1. Análise Descritiva da Planta e dos Atributos do Solo 19
3.2. Correlação Linear entre Atributos 22
3.3. Análise Geoestatística (Semivariogramas) 24
3.4. Distribuição Espacial da Produtividade e da Umidade do Solo via Krigagem 28
4. CONCLUSÕES 32
5. LITERATURA CITADA 33

ANÁLISE COMPARATIVA GEOESTATÍSTICA DE PRODUTIVIDADE DE CAPIM EM RELAÇÃO AOS ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO

RESUMO

A produtividade de forrageiras desempenha papel fundamental na pecuária, sendo diretamente influenciada pela variabilidade dos atributos do solo. Este trabalho objetivou realizar uma análise comparativa e geoestatística da produtividade do capim-marandu (*Urochloa brizantha*) em relação aos atributos físicos e químicos do solo, visando compreender como a variabilidade espacial desses fatores interfere na produção de forragem. O experimento foi conduzido em área experimental da FCAV/UNESP, em Jaboticabal-SP, sendo a amostragem realizada em malha regular de 20 × 90 m, com espaçamento de 10 m entre pontos. Foram avaliados atributos físicos e químicos do solo, além da produção de matéria seca, com aplicação de estatística descritiva e geoestatística. Os resultados da análise descritiva revelaram produtividade média de 3.276,6 kg ha^{-1}, com ampla variação espacial (2.510,0 a 6.428,0 kg ha^{-1}), enquanto a umidade do solo apresentou médias de 0,189 kg kg^{-1} (umidade gravimétrica – UG) e 0,262 m^3 m^{-3} (umidade volumétrica – UV). A matriz de correlação indicou associação positiva da matéria seca de forragem (MSF) com a densidade da partícula (DP = 0,384) e a porosidade total (PTc = 0,298), e negativa com a umidade do solo (UG = -0,297; UV = -0,360), evidenciando a influência da estrutura física e da dinâmica hídrica do solo sobre a produtividade. A análise geoestatística indicou dependência espacial de classe forte para a MSF (ADE de 99,8%), UV (92,8%) e UG (91,2%), com alcances de 17,7 m, 19,8 m e 19,6 m, respectivamente, enquanto os demais atributos apresentaram efeito pepita puro. Os mapas de krigagem evidenciaram coincidência entre áreas de maior disponibilidade hídrica e os maiores valores de produtividade, destacando a umidade do solo como principal fator associado à variabilidade da MSF. Conclui-se que a identificação de zonas de manejo, com base na dependência espacial dos atributos, contribui para a otimização produtiva em sistemas de pastagem.

Palavras-chave: variabilidade espacial; krigagem; umidade do solo; zonas de manejo.

GEOSTATISTICAL COMPARATIVE ANALYSIS OF GRASS YIELD IN RELATION TO SOIL CHEMICAL AND PHYSICAL ATTRIBUTES

ABSTRACT

Forage productivity plays a fundamental role in livestock systems and is directly influenced by the variability of soil attributes. This study aimed to perform a comparative and geostatistical analysis of *Urochloa brizantha* (Marandu grass) productivity in relation to soil physical and chemical attributes, in order to understand how spatial variability affects forage production. The experiment was conducted in an experimental area at FCAV/UNESP, Jaboticabal, São Paulo, Brazil, using a regular sampling grid of 20 × 90 m with 10 m spacing between points. Soil physical and chemical attributes, as well as dry matter yield, were evaluated using descriptive statistics and geostatistical analysis. Descriptive results showed a mean yield of 3,276.6 kg ha^{-1}, with high spatial variability (2,510.0 to 6,428.0 kg ha^{-1}), while soil moisture averaged 0.189 kg kg^{-1} (gravimetric moisture – UG) and 0.262 m^3 m^{-3} (volumetric moisture – UV). Correlation analysis indicated a positive association between forage dry matter (MSF) and particle density (DP = 0.384) and total porosity (PTc = 0.298), and a negative association with soil moisture (UG = -0.297; UV = -0.360), highlighting the influence of soil physical structure and water dynamics on productivity. Geostatistical analysis indicated strong spatial dependence for MSF (SDI = 99.8%), UV (92.8%), and UG (91.2%), with ranges of 17.7 m, 19.8 m, and 19.6 m, respectively, whereas the remaining attributes exhibited a pure nugget effect. Kriging maps showed spatial agreement between areas of higher soil moisture and higher productivity values, indicating soil water availability as the main factor associated with MSF variability. These results support the delineation of management zones and contribute to the optimization of pasture production systems.

Keywords: spatial variability; kriging; soil moisture; management zones.

1. INTRODUÇÃO

A produção de forragens constitui um dos pilares fundamentais da pecuária brasileira, representando a principal fonte alimentar dos rebanhos bovinos. O Brasil possui aproximadamente 160 milhões de hectares de pastagens, responsáveis pela sustentação de um dos maiores rebanhos comerciais do mundo (DIAS FILHO, 2011). Entretanto, grande parte dessas áreas apresenta algum grau de degradação, o que compromete a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas pecuários (MENDES et al., 2018). Dessa forma, torna-se indispensável compreender os fatores que influenciam a produção de forragem, entre eles as condições físicas e químicas do solo, que exercem papel determinante no crescimento e desenvolvimento das plantas forrageiras.

O capim-marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu), amplamente conhecido pelo seu histórico taxonômico de *Urochloa brizantha*, é uma gramínea tropical perene de hábito de crescimento cespitoso que apresenta metabolismo fotossintético do tipo C4. Essa característica fisiológica confere à espécie alta eficiência no uso da água e saturação luminosa elevada, resultando em acentuada taxa de expansão foliar e acúmulo de biomassa sob condições tropicais. No que tange às exigências da espécie, o marandu demanda solos de média a alta fertilidade e apresenta severa restrição de crescimento e sobrevivência em solos mal drenados ou sujeitos ao alagamento crônico.

Fisiologicamente, a dinâmica de rebrota da planta após o pastejo é governada pela preservação e estímulo dos meristemas apicais e basais, exigindo estratégias de manejo baseadas em metas estruturais precisas (EMBRAPA GADO DE CORTE, 2011). Sob condições adequadas de umidade e temperatura na estação chuvosa, a taxa de alongamento foliar dita o ritmo de acúmulo de forragem, o qual varia substancialmente conforme os períodos de descanso adotados no sistema de manejo rotacionado (LEITE et al., 2015). Para equilibrar o valor nutritivo e o vigor do sistema radicular, recomenda-se a entrada dos animais quando o dossel atinge de 35 a 40 cm e a retirada quando o resíduo pós-pastejo atinge a metafísica de 20 cm (EMBRAPA GADO DE CORTE, 2011).

Os atributos físicos do solo exercem papel primordial no estabelecimento e na longevidade de gramíneas forrageiras tropicais. Propriedades como a

densidade do solo, a macroporosidade e a resistência mecânica à penetração determinam diretamente a dinâmica de crescimento das raízes e, consequentemente, a capacidade de absorção de água e nutrientes da planta. No entanto, a sustentabilidade física do perfil do solo é frequentemente desafiada pelo manejo do pastejo. A influência do pisoteio animal atua diretamente na camada superficial do solo, promovendo o rearranjo estrutural das partículas e a redução do volume de macroporos, fenômeno caracterizado como compactação superficial (SILVA et al., 2008).

A severidade dos impactos gerados pelo pisoteio correlaciona-se com a intensidade da taxa de lotação e com o teor de umidade do solo no momento do tráfego animal (SILVA et al., 2008). A compactação decorrente do superpastejo eleva a densidade do solo e impõe severa resistência física ao alongamento radicular. Como consequência fisiológica direta, há limitação na exploração de horizontes profundos pelas raízes, o que reduz a tolerância do capim ao estresse hídrico e restringe a taxa de expansão foliar. Contudo, quando submetido a manejos adequados de altura residual, o capim-marandu manifesta resiliência a esse estresse estrutural e protege satisfatoriamente os atributos físicos superficiais do solo em comparação com outras cultivares, devido ao seu vigoroso sistema radicular e ao seu hábito de crescimento (SCARIOT et al., 2010).

A variabilidade espacial dos atributos do solo, como pH, teor de matéria orgânica, nutrientes e densidade, influencia diretamente o potencial produtivo das pastagens (CARVALHO et al., 2014). Essa variabilidade é resultado de fatores naturais e antrópicos, como relevo, manejo, adubação e uso intensivo, e pode causar diferenças significativas na produtividade dentro de uma mesma área (SOUZA et al., 2010). Dessa forma, o conhecimento da distribuição espacial desses atributos é essencial para um manejo mais eficiente do solo e da pastagem, promovendo maior sustentabilidade e retorno econômico.

Nesse contexto, a geoestatística surge como uma importante ferramenta para o estudo e monitoramento do solo. Por meio de técnicas como: a análise de semivariogramas e krigagem, é possível quantificar e mapear a variabilidade espacial de atributos físicos e químicos, permitindo identificar zonas homogêneas de manejo e realizar amostragens mais precisas (VIEIRA et al.,

2010). Além disso, a aplicação de métodos geoestatísticos possibilita compreender a relação entre os atributos do solo e a produtividade das forrageiras, auxiliando na tomada de decisão quanto ao uso de corretivos, fertilizantes e práticas de manejo adequadas (MELLO et al., 2017).

Estudos realizados em áreas de pastagens brasileiras demonstram que a integração entre análises químicas, físicas e geoestatísticas do solo permite estimar com maior precisão a produtividade da forragem e identificar fatores limitantes à produção (LIMA et al., 2007; ALVES et al., 2025). Segundo LIMA et al. (2007), a análise espacial de atributos do solo e da produtividade de forragem de milho safrinha evidenciou forte correlação entre densidade do solo, porosidade e rendimento de biomassa. De forma semelhante, ALVES et al. (2025) verificaram que a variabilidade espacial de pH, fósforo e matéria orgânica influenciou significativamente a capacidade de suporte forrageiro em áreas de pastagem no semiárido brasileiro.

Considerando a importância econômica e ambiental da pecuária, bem como a necessidade de otimizar o uso dos recursos naturais, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise comparativa e geoestatística da produtividade de capim em relação aos atributos químicos e físicos do solo, visando compreender como a variabilidade espacial desses fatores interfere na produção de forragem. Dessa forma, pretende-se contribuir para o aprimoramento do manejo das pastagens, promovendo maior eficiência produtiva e sustentabilidade dos sistemas pecuários.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Local e Área experimental

O experimento foi conduzido no setor de Forragicultura e Bovinocultura de Corte da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), campus de Jaboticabal, Estado de São Paulo. A área sob cultivo de braquiária (*Urochloa brizantha cv.* Marandu), localizada a 48°17'6.49" de longitude Oeste de Greenwich e 21°13'44.72" de Latitude Sul, com altitude de 501m, cujo clima é subtropical úmido, com inverno seco e verão chuvoso, no período da campanha agrícola de 2024/2025.



Figura 1: Localidade da área de implantação da malha de amostragem. **Fonte:** Google Earth Pro (2025).

2.2. Histórico da área experimental

Para implantação das áreas de pastagem foi realizado desmatamento com sucessivas queimadas ao longo do tempo, que tiveram o intuito de facilitar a limpeza para posterior semeadura das forragens. A área total de pastagem corresponde a 44,28 ha de *Urochloa brizantha*, sendo 21ha de capim Marandu e 23 de capim xaraês, a área com braquiária (*Urochloa brizantha cv.* Marandu) foi implantada em 2008, ficou um ano sem uso e foi usada com pouca frequência até 2010, após isso utilizou-se 4,5 animais por ha.

2.3. Caracterização inicial do solo da área de estudo

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho-Escuro Eutrófico, de textura argilosa, horizonte A moderado e relevo suave ondulado (EMBRAPA, 2017). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw (tropical, caracterizado por invernos secos). De acordo com a UNESP/FCAV (2018), a temperatura média anual na cidade de Jaboticabal-SP é de 22,7 °C, com mínima de 17,1 °C e máxima de 30,1 °C, e precipitação média anual de 1400 mm.

A pesquisa foi conduzida em área de pastagem cultivada com capim-Marandu. A caracterização inicial foi realizada entre o final de julho e o início de agosto de 2024, antes da instalação do experimento. Nessa etapa, foram realizadas coletas de amostras de solo na camada de 0,00–0,10 m de profundidade, em 33 pontos georreferenciados, definidos de forma aleatória, para análise dos atributos físicos e químicos do solo.

2.4. Coletas de dados

As coletas de dados em campo das amostras de solo e vegetal foram realizadas entre os dias 8 e 10 de janeiro de 2025, com a participação da equipe de orientandos e orientadores do Departamento de Solos e Adubos da FCAV, além do apoio de funcionários da universidade.

Durante a coleta (Figura 2), foram retiradas amostras indeformadas de solo por meio de anéis volumétricos, bem como amostras simples, nas camadas previamente estabelecidas.



Figura 2: Coleta das amostras de solo/matéria verde no local do experimento. **Fonte:** Autor.

Para a avaliação da biomassa vegetal, utilizou-se um aro circular com 40 cm de diâmetro para delimitação da área de coleta da massa verde da forragem, sendo o material vegetal cortado a aproximadamente 15 cm de altura em relação à superfície do solo e posteriormente acondicionado para análise.

2.5. Caracterização da malha experimental de campo

Em campo, foi estabelecida uma malha experimental de 20 m × 90 m para a coleta de dados amostrais do solo e da biomassa vegetal. A malha foi composta por transecções de 3 × 11 pontos, com espaçamento regular de 10,0 m × 10,0 m entre os pontos, distribuídos em uma área de 1.800 m^2, totalizando 33 unidades amostrais. Os pontos foram definidos nas direções x e y do sistema de coordenadas cartesianas, com o objetivo de facilitar a análise espacial dos atributos do solo. Para a implantação da malha experimental, utilizou-se nível óptico, sendo realizado o estaqueamento dos pontos na área sob pastagem. As amostras de solo foram coletadas nos pontos de interseção da malha, na camada de 0,00–0,10 m de profundidade.

2.6. Atributos físico-químicos do solo

A determinação dos atributos físicos do solo foi realizada individualmente para as amostras coletadas na camada de 0,00–0,10 m de profundidade, no entorno de cada ponto amostral.

As análises laboratoriais dos atributos físicos e químicos do solo foram realizadas entre outubro de 2024 e março de 2025. Para os atributos físicos do solo, foram determinados: macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total determinada (PTd), porosidade total calculada (PTc), densidade do solo (DS), densidade de partículas (DP), resistência à penetração com penetrômetro de impacto (RPi), resistência à penetração com penetrômetro de bancada (RPpb) e umidade gravimétrica (UG). Esses atributos foram determinados conforme a metodologia descrita por EMBRAPA (2018) e Raij et al. (2001).

A microporosidade foi determinada pelo método da mesa de tensão, utilizando coluna de água de 0,60 m, enquanto a macroporosidade foi obtida pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade. A porosidade total foi determinada por meio da saturação do volume da amostra, e a densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 2018).

A densidade de partículas foi determinada pelo método do balão volumétrico, utilizando o volume de álcool necessário para completar um balão de 50 mL, contendo 20 g de solo deformado.



Figura 3: Cálculo da densidade do solo pelo método do anel volumétrico **Fonte:** Autor.

As amostras deformadas do solo para determinação da umidade gravimétrica foram coletadas no mesmo momento que o da resistência do solo a penetração, onde pesou-se 20 g de solo, as amostras foram levadas para a estufa a 165º C por 24 horas, em seguida o solo foi pesado novamente e a posterior foi determinada a umidade gravimétrica de acordo com a equação abaixo:

$$\mathrm{UG} = \frac{(\mathrm{PU}-\mathrm{PS})}{\mathrm{PS}} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

UG – é umidade gravimétrica (kg kg^{-1});

PU – é o peso de solo úmido (g); e

PS – é o peso de solo seco em estufa (g).

As análises citadas anteriormente foram determinadas de acordo com a metodologia da (EMBRAPA, 2020). Além disso, a umidade volumétrica foi determinada pela seguinte fórmula, conforme Kiehl (1979):

$$\mathrm{UV} = \mathrm{UG} * \mathrm{DS} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

Onde:

UV= umidade volumétrica, UG = umidade gravimétrica e DS= densidade do sol.

Para a avaliação da resistência do solo à penetração, utilizou-se penetrômetro de impacto, nas camadas previamente descritas.

Os atributos químicos do solo foram determinados individualmente, a partir de amostras coletadas na camada de 0,00–0,10 m de profundidade, no entorno de cada ponto amostral, utilizando-se trado holandês, conforme metodologias descritas por Raij et al. (2001) e EMBRAPA (2018).

Após a coleta, as amostras foram homogeneizadas, acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e encaminhadas ao laboratório para análises químicas, realizadas entre setembro de 2024 e janeiro de 2025. Foram avaliados os seguintes atributos: matéria orgânica do solo (MO) e potencial hidrogeniônico (pH).

O teor de MO foi determinado pelo método da perda por ignição em mufla (Goldin, 1987 e EMBRAPA, 2018), em razão da perda de massa do resíduo incinerado, considerando-se o material perdido pela queima no intervalo de variação da temperatura de 110 a 550°C, conforme a equação 3:

$$\mathrm{MO}_{(\%)} = \frac{\mathrm{P}-(\mathrm{T}-\mathrm{C})}{\mathrm{P}} \times 100 \qquad \text{(Eq. 3)}$$

Em que: P é o peso da amostra (g) após secagem a 110 °C; C é a tara do cadinho (g); e T é o peso do conjunto cinza + cadinho (g). No entanto, o pH do solo foi determinado conforme metodologia proposta pela EMBRAPA (Teixeira et al., 2017).

2.7. Produção de matéria seca

A produção de forragem foi avaliada pelo método direto, utilizando-se um aro circular com área de 0,125 m^2 (raio de 0,20 m). Foram coletadas 33 amostras de forragem, com os aros posicionados nos pontos amostrais previamente definidos na malha experimental. A forragem contida no interior do aro foi cortada a 15 cm de altura em relação à superfície do solo, caracterizando a altura de resíduo. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas ao laboratório, onde foram pesadas para determinação da massa verde da forragem. Em seguida, foi retirada uma subamostra para determinação da matéria seca, sendo seca em estufa de circulação forçada de ar a 60 ^{o}C por 72 h, ou até atingir massa constante, conforme metodologia descrita por Silva e Queiroz (2009). Posteriormente, procedeu-se ao cálculo da produção de matéria seca por hectare.

2.8. Análise estatística dos atributos pesquisados

Para cada atributo estudado, realizou-se análise descritiva com base na estatística clássica, bem como a avaliação da distribuição de frequência dos dados. Utilizando-se o software SAS (Schlotzhaver e Littel, 1997), foram calculadas as seguintes medidas: média, mediana, moda, valores mínimo e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria. Adicionalmente, foi aplicado o teste F para avaliação da significância estatística dos atributos do solo. Em seguida, procedeu-se à construção da matriz de correlação, com o objetivo de analisar as relações entre os atributos estudados

e subsidiar o ajuste de modelos de regressão linear para as diferentes combinações entre os atributos do solo na malha experimental de pastagem.

2.9. Análise geoestatística dos atributos físico-químicos do solo

Para cada atributo estudado, avaliou-se a dependência espacial por meio do cálculo do semivariograma, com base nos pressupostos de estacionariedade da hipótese intrínseca, utilizando-se o software GS+ (Gamma Design Software, 2004).

Inicialmente, foram ajustados semivariogramas simples para todos os atributos do solo. Em seguida, procedeu-se ao ajuste de semivariogramas cruzados entre as diferentes combinações de atributos, também utilizando o GS+ (2004).

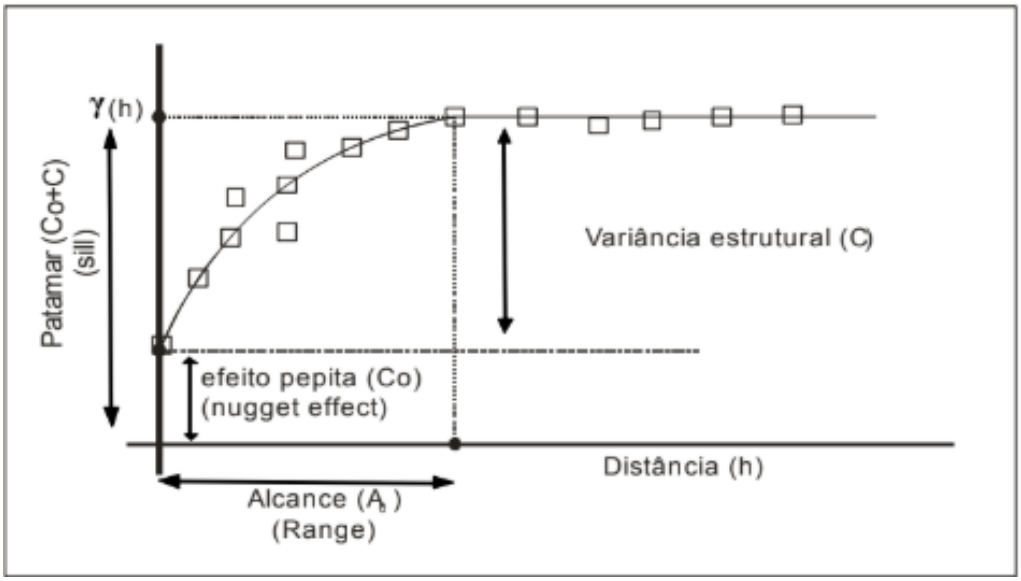


Figura 4: Exemplo de semivariograma experimental **Fonte:** Adaptado de Vieira (2000).

A seleção dos modelos teóricos dos semivariogramas, simples e cruzados, foi realizada com base nos seguintes critérios: (i) maior coeficiente de determinação (R^2); (ii) menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); e (iii) maior valor do avaliador do grau de dependência espacial (ADE). A escolha final do modelo foi definida por meio de validação cruzada, assim como a determinação do tamanho da vizinhança de interpolação, visando à obtenção da melhor configuração para os procedimentos de krigagem e/ou cokrigagem.

As interpolações espaciais foram realizadas por meio de krigagem em blocos, permitindo a geração de mapas dos atributos avaliados.

Para cada atributo, foram estimados os parâmetros do semivariograma: efeito pepita (C_0), alcance (A_0) e patamar (C_0 + C). O avaliador do grau de dependência espacial (ADE) foi calculado conforme equação apresentada a seguir.

$$\mathrm{ADE} = \left[\frac{\mathrm{C}}{(\mathrm{C}+\mathrm{C_o})}\right] \mathrm{x}\ 100 \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Onde: ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; e C + Co é o patamar. A interpretação proposta para o ADE será conforme Dalchiavon e Carvalho (2012): a) ADE < 20% = variável espacial de muito baixa dependência (MB); b) 20% ≤ ADE < 40% = baixa dependência (BA); c) 40% ≤ ADE < 60% = média dependência (ME); d) 60% ≤ ADE < 80% = alta dependência (AL) e e) 80% ≤ ADE < 100% = muito alta dependência (MA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Análise Descritiva da Planta e dos Atributos do Solo

A Tabela 1 sintetiza a análise descritiva dos atributos da planta e do solo, permitindo avaliar a variabilidade dos dados por meio do coeficiente de variação (CV), conforme a classificação de Pimentel-Gomes & Garcia (2002), bem como a distribuição de frequência dos atributos. Os dados abrangem desde a produtividade da forragem (MSF) até parâmetros estruturais do solo, como densidade e porosidade, além de indicadores químicos como pH e matéria orgânica. Através dos coeficientes de variação e dos testes de probabilidade apresentados, é possível observar o comportamento estatístico e a heterogênea distribuição das variáveis na área de estudo.

Tabela 1: Análise descritiva inicial de alguns atributos da forragem e de um Latossolo Vermelho Distrófico

Atributo [(a)]	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste[(b)]	
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
Atributos da planta										
MSF (kg ha^{-}	3276,6	3105,0	2510,0	6428,0	725,8	22,1	10,7	2,8	<0,00	IN
Atributos físicos do solo										
DS (kg dm^{-}	1,389	1,398	1,067	1,692	0,114	8,2	2,232	-0,447	0,067	NO
DP (kg dm^{-}	2,419	2,410	2,105	2,667	0,122	5,0	0,940	-0,514	0,158	NO
PTc (m^3 m^{-}	0,423	0,426	0,263	0,557	0,058	13,7	1,447	-0,382	0,256	NO
PTd (m³ m^{-}	0,423	0,425	0,301	0,526	0,044	10,4	1,183	-0,267	0,819	NO
Mi (m^3 m^{-3})	0,356	0,352	0,235	0,498	0,040	11,4	5,621	0,507	0,001	IN
Ma (m^3 m^{-3})	0,067	0,063	0,003	0,122	0,028	42,9	0,186	-0,208	0,517	NO
RP (MPa)	2,000	1,900	0,949	3,252	0,526	26,3	0,740	0,454	0,000	IN
UG (kg kg^{-}	0,189	0,182	0,059	0,476	0,066	35,1	10,713	2,200	<0,00	IN
UV (m^3 m^{-3})	0,262	0,251	0,084	0,640	0,089	34,3	9,723	2,033	<0,00	IN
Atributos químicos do solo										
MO (g dm^{-3})	30,8	30,0	24,0	56,0	5,545	30,7	13,029	3,015	<0,00	IN
pH ($CaCl_2$)	4,9	5,0	4,6	5,6	0,227	4,5	0,230	0,468	0,083	NO

[(a)] MSF = Quantidade de matéria seca total; DS, DP, PTc, PTd, RP, Mi, Ma, RP, UG, UV, MO, pH, são respectivamente a densidade do solo, densidade da partícula, porosidade total calculada dos cilindros, porosidade total das amostras de solo, microporosidade, macroporosidade, resistência à penetração, umidade gravimétrica, umidade volumétrica, matéria orgânica, e o potencial hidrogeniônico, coletados nas camadas do solo; [(b)] DF = distribuição de frequência, sendo NO e IN respectivamente do tipo normal e indeterminada.

De acordo com Pimentel Gomes & Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de

variação (CV). Suas classes foram determinadas como baixa (CV ≤ 10 %), média (10 % < CV ≤ 20 %), alta (20 % < CV ≤ 30 %) e muito alta (CV > 30%).

Nesse contexto, a produtividade de matéria seca de forragem (MSF) apresentou média de 3.276,6 kg ha^{-1} e CV de 22,1%, sendo classificada como de alta variabilidade. Tal comportamento evidencia heterogeneidade na produção ao longo da área, a qual está associada, sobretudo, às variações nos atributos do solo. Além disso, a distribuição indeterminada (IN), aliada à elevada assimetria positiva (2,8) e curtose (10,7), indica a presença de poucos pontos com alta produtividade em contraste com uma predominância de valores abaixo da média. Dessa forma, infere-se que condições locais específicas, como maior disponibilidade hídrica ou melhor estrutura do solo, favoreceram o desenvolvimento da forrageira em determinados pontos da área.

No que se refere aos atributos físicos do solo, observa-se que estes apresentaram comportamentos distintos quanto à variabilidade. A DS e a DP apresentaram baixa variabilidade, com CV de 8,2% e 5,0%, respectivamente, além de distribuição normal. Esse resultado pode ser atribuído ao fato de que tais atributos estão diretamente relacionados à composição mineral e à organização estrutural do solo, que tendem a apresentar menor variação em áreas relativamente homogêneas. Em contrapartida, a porosidade total apresentou coeficientes de variação de 13,7% (PTc) e 10,4% (PTd), enquanto a Mi apresentou 11,4%, caracterizando variabilidade média, indicando flutuações moderadas na distribuição dos poros, possivelmente associadas a variações locais de compactação e manejo.

Por outro lado, a Ma apresentou CV de 42,9%, enquanto a umidade do solo (UG e UV), apresentou valores de 35,1% e 34,3%, respectivamente, sendo classificadas como de variabilidade muito alta. Essa elevada dispersão decorre da dinâmica da água no solo, a qual é fortemente influenciada por fatores como microrelevo, infiltração, drenagem e estado de compactação, resultando em distribuição espacial irregular da água. Ademais, a RP, com CV de 26,3%, também apresentou alta variabilidade, indicando a ocorrência de zonas com diferentes níveis de compactação, o que interfere diretamente no crescimento radicular.

No tocante aos atributos químicos, a MO apresentou variabilidade muito alta (30,7%) e distribuição indeterminada, o que pode ser explicado pela deposição heterogênea de resíduos vegetais e excreções animais ao longo da área, característica comum em sistemas de pastagem. Em contrapartida, o pH apresentou baixa variabilidade (CV de 4,5%) e distribuição normal, indicando que, embora o solo seja ácido (média de 4,9), essa condição ocorre de forma relativamente homogênea na área experimental, possivelmente em função de práticas de manejo mais uniformes, como a calagem.

De maneira geral, observa-se que os atributos relacionados à fração sólida do solo, como densidade e pH, apresentaram maior estabilidade, enquanto aqueles associados à dinâmica de fluidos, como macroporosidade e umidade, apresentaram maior variabilidade. Assim, evidencia-se que a distribuição de água e ar no solo constitui o principal fator de oscilação no sistema, influenciando diretamente o desempenho da forrageira na área estudada.

Os resultados observados para a variabilidade dos atributos do solo e da produtividade da forragem corroboram estudos conduzidos em áreas de pastagens tropicais, nos quais se verifica elevada heterogeneidade espacial, especialmente para atributos relacionados à dinâmica da água e à estrutura do solo. De acordo com Carvalho et al. (2014), atributos físicos do solo, como densidade, porosidade e resistência à penetração, exercem influência direta sobre a produtividade de forrageiras, sendo frequentemente mais determinantes do que os atributos químicos.

De forma semelhante, Souza et al. (2010) destacam que atributos físicos apresentam variabilidade espacial significativa em áreas sob pastagem, refletindo a influência de fatores como manejo, compactação e processos naturais de formação do solo. Além disso, a elevada variabilidade observada para a umidade do solo está em concordância com os resultados relatados por Mello et al. (2017), que ressaltam que atributos relacionados à água apresentam maior variabilidade espacial devido à influência de fatores como relevo, infiltração e retenção hídrica.

3.2. Correlação Linear entre Atributos

Abaixo, a Tabela 2 exibe as correlações lineares entre a massa seca de forragem e os atributos do solo. Esta matriz é essencial para observar quais variáveis físicas e químicas possuem maior influência sobre a produtividade da forragem, indicando associações positivas ou negativas entre os parâmetros analisados.

Tabela 2: Matriz de correlação linear simples entre alguns atributos da produtividade de forragem e de um Latossolo Vermelho Distrófico

Atributos[(a)]	RP	DP	DS	PTc	MO	pH	MSF	PTd	Ma	Mi	UG	UV
RP	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DP	0,102**	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DS	0,433	-0,047**	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PTc	-0,423	0,561	-0,852	1,000	-	-	-	-	-	-	-	-
MO	-0,089**	-0,003**	-0,324**	0,266**	1,000	-	-	-	-	-	-	-
pH	0,032**	-0,054**	0,176**	-0,189**	0,217**	1,000	-	-	-	-	-	-
MSF	0,002**	0,384*	-0,131**	0,298**	0,108**	0,175**	1,000	-	-	-	-	-
PTd	-0,185**	0,095**	-0,600	0,539	0,308**	-0,087**	0,218**	1,000	-	-	-	-
Ma	-0,304**	-0,081**	-0,578	0,432	0,294**	-0,245**	0,135**	0,438	1,000	-	-	-
Mi	0,014**	0,161**	-0,240**	0,278**	0,125**	0,078**	0,156**	0,717	-0,238**	1,000	-	-
UG	-0,199**	-0,313**	-0,171**	-0,011**	-0,131**	-0,182**	-0,297**	0,096**	-0,161**	0,218**	1,000	-
UV	-0,102**	-0,326**	0,062**	-0,210**	-0,212**	-0,161**	-0,360**	-0,036**	-0,308**	0,178**	0,970	1,000

[(a)] MSF = Produtividade de matéria seca de forragem; RP, DP, DS, PTc, MO, pH, PTd, Ma, Mi, UG, e UV, são respectivamente a resistência à penetração, densidade da partícula, densidade do solo, porosidade total calculada dos cilindros, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, porosidade total das amostras de solo, macroporosidade, microporosidade, umidade gravimétrica, e a umidade volumétrica; [(b)] * Significativo a 1%, ** Significativo a 5%

Observando a Tabela 2, pode-se verificar que a MSF apresentou correlação positiva com atributos físicos relacionados à estrutura do solo, com destaque para a DP (r = 0,384) e a PTc (0,298), indicando que o desenvolvimento da forrageira está associado à qualidade estrutural do solo, especialmente ao espaço poroso, que favorece a infiltração de água e as trocas gasosas no sistema radicular. Em contrapartida, a DS apresentou correlação negativa (-0,131), ainda que de baixa magnitude, comportamento coerente com os efeitos da compactação sobre a restrição ao crescimento das raízes.

Para a umidade do solo, foram observadas correlações negativas com a MSF, tanto para a UG (-0,297) quanto UV (-0,360). Esse resultado sugere que as áreas com maior desenvolvimento da forrageira apresentavam menor teor de água no momento da amostragem, possivelmente em função do maior consumo

hídrico pelas plantas, associado à maior atividade transpiratória, ou ainda a diferenças no estágio de secagem do solo entre os pontos amostrados.

Os atributos químicos apresentaram correlações positivas com a produtividade, como observado para o pH (0,175) e a MO (0,108), indicando que, mesmo em condições de acidez, pequenas variações na fertilidade contribuem para o incremento da produção de biomassa.

Entre os atributos do solo, destacam-se a forte correlação negativa entre DS e PTc (-0,852), evidenciando a relação inversa entre compactação e espaço poroso, e a elevada correlação entre UG e UV (0,970), confirmando a consistência entre as formas de avaliação do conteúdo de água no solo.

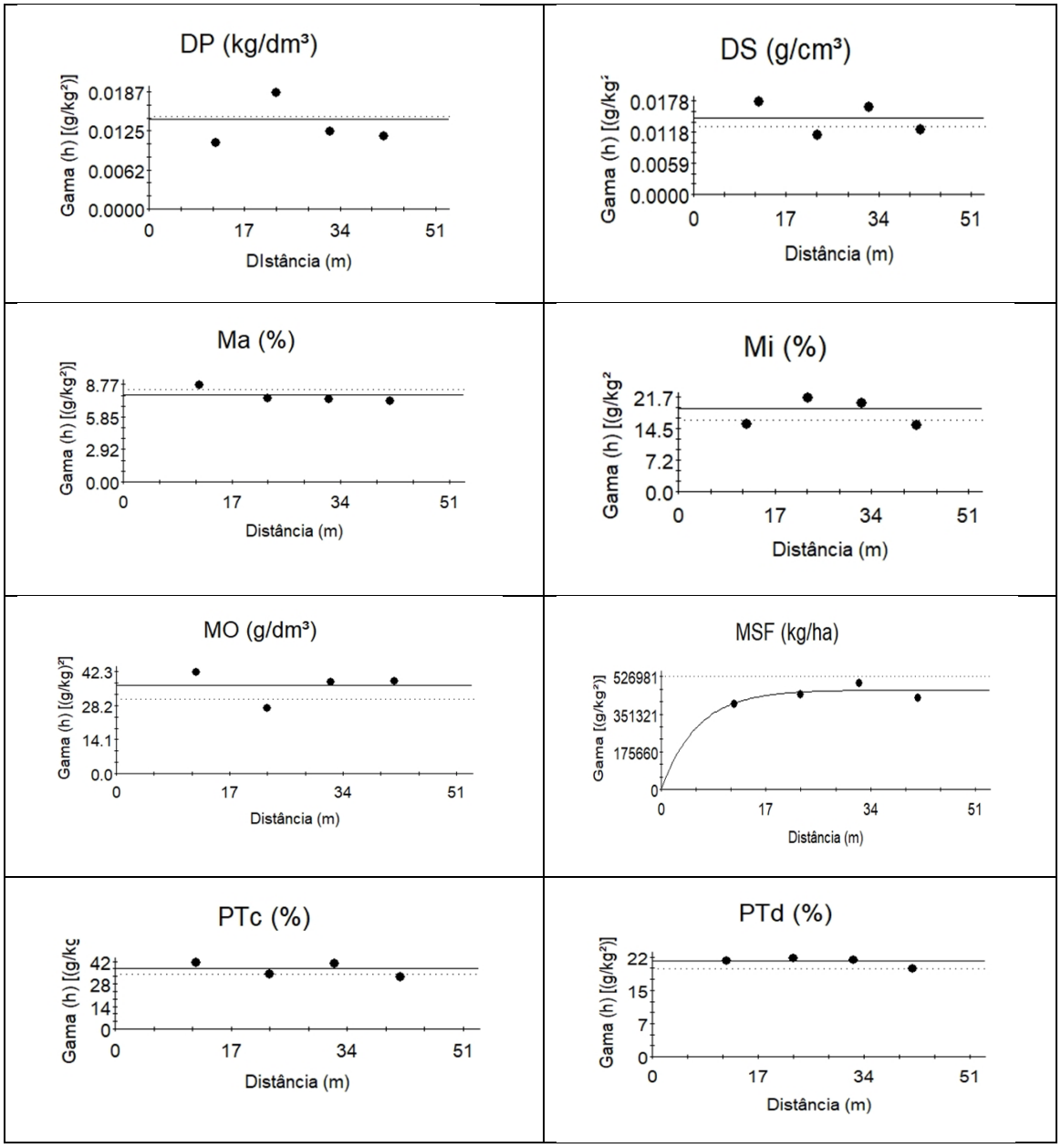
As correlações observadas entre a produtividade da forragem e os atributos do solo estão em consonância com estudos prévios que indicam forte relação entre a estrutura física do solo e o desempenho das pastagens. Segundo Lima et al. (2007), atributos como densidade do solo, porosidade e resistência à penetração são determinantes na definição da produtividade da matéria seca, uma vez que influenciam diretamente o crescimento radicular e a disponibilidade de água e oxigênio no solo.

Além disso, a relação observada entre atributos químicos e produtividade também é relatada na literatura. Alves et al. (2025) verificaram que variáveis químicas, como pH e matéria orgânica, apresentam correlação significativa com a produção de biomassa, embora, em muitos casos, sua influência seja secundária em relação aos atributos físicos do solo.

A correlação negativa observada entre a umidade do solo e a produtividade, embora aparentemente contraditória, pode ser explicada pelo maior consumo hídrico em áreas de maior desenvolvimento vegetal. Conforme discutido por Mello et al. (2017), áreas com maior crescimento de biomassa tendem a apresentar menor teor de água no momento da amostragem, em função da maior atividade transpiratória das plantas.

3.3. Análise Geoestatística (Semivariogramas)

A Figura 5 apresenta os semivariogramas referentes à análise geoestatística da forragem e dos atributos físicos e químicos do solo. Através destes gráficos, observa-se a estrutura de variância espacial para cada atributo, permitindo distinguir as variáveis que possuem dependência espacial daquelas com distribuição aleatória dentro do Latossolo Vermelho Distrófico avaliado.



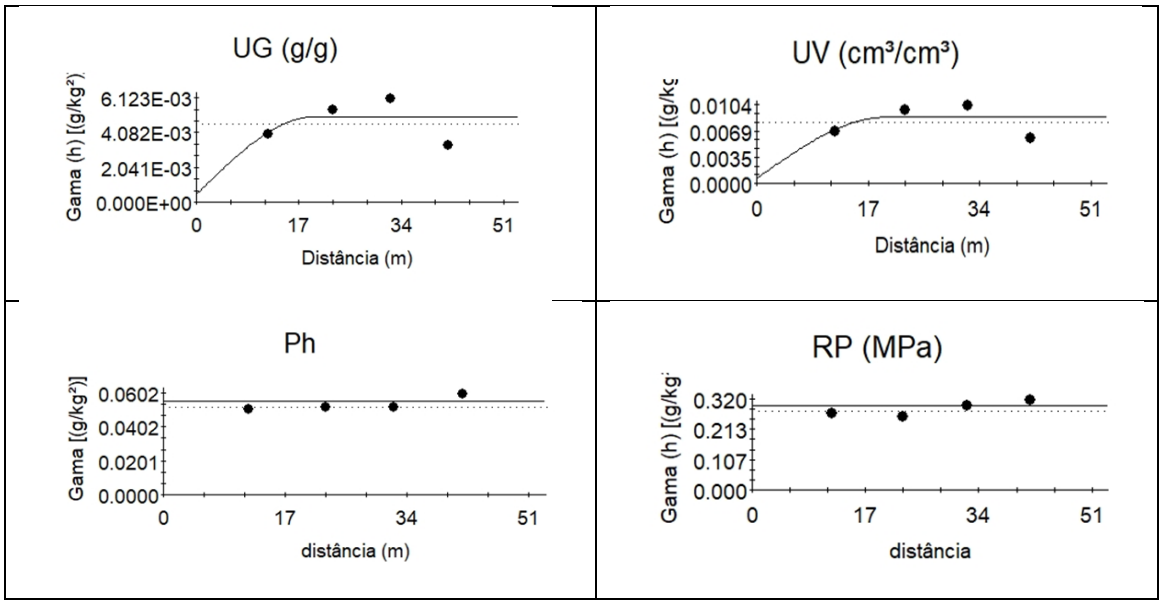


Figura 5: Semivariogramas simples dos atributos (DP, DS, MA, MI, MO, MSF, PTd, PTd, UG, UV, Ph e RP) da produtividade de capim-marandu (*Urochloa brizantha cv.* marandu) e atributos de um latossolo vermelho distrófico.

Observando a Figura 5 e os parâmetros da Tabela 3, verifica-se que a produtividade de matéria seca de forragem (MSF) e a umidade do solo (UG e UV) apresentaram dependência espacial, com ajustes aos modelos exponencial e esférico.

A MSF apresentou estrutura espacial bem definida, evidenciando que sua variabilidade não ocorre ao acaso, mas é influenciada por fatores ambientais e atributos do solo que atuam de forma localizada. O alcance (A_0) de 17,7 m, associado ao ajuste ao modelo exponencial, define a distância máxima de correlação espacial entre as amostras, delimitando zonas de influência dentro da área. Esse comportamento confirma o potencial de mapeamento da produtividade, indicando que intervenções localizadas podem ser eficientes para otimizar o desempenho da forrageira.

De forma análoga, a umidade do solo apresentou os maiores alcances na área estudada, sendo 19,8 m para a UV (modelo esférico) e 19,6 m para a UG (modelo exponencial). Esses valores, superiores aos da MSF, sugerem que a dinâmica da água no solo apresenta maior continuidade espacial, atuando como um dos principais fatores estruturantes da variabilidade da produtividade de forragem. Essa dependência espacial está associada a fatores como relevo, textura e estado de compactação, que controlam a dinâmica da água no solo e influenciam diretamente a produtividade de forragem, reforçando a

interdependência entre os atributos do solo e a resposta da planta. Assim, a umidade se destaca como um dos principais fatores estruturantes da variabilidade da MSF na área estudada.

A qualidade dos ajustes dos semivariogramas é reforçada pelos valores do Avaliador de Dependência Espacial (ADE), que classificou a dependência como forte para todos os atributos com dependência espacial, com valores de 99,8% para MSF, 92,8% para UV e 91,2% para UG. Esses resultados indicam que a variância espacial explicada pelos modelos é predominante em relação ao efeito aleatório, conferindo elevada confiabilidade às estimativas e aos mapas gerados por interpolação.

Em relação ao coeficiente de determinação (r^2), observa-se que a MSF apresentou o maior valor (r^2 = 0,516), em comparação com a umidade do solo (UV = 0,171 e UG = 0,140). Esse resultado sugere melhor ajuste do modelo para a produtividade, enquanto a umidade, embora apresente dependência espacial forte, demonstra maior dispersão em torno do modelo teórico.

Em contrapartida, os atributos DP, DS, Ma, Mi, MO, PTc, PTd, pH e RP apresentaram semivariogramas caracterizados por efeito pepita puro (epp), indicando ausência de dependência espacial detectável na escala amostral adotada. Esse comportamento sugere que a variabilidade desses atributos ocorre de forma aleatória ou em escalas menores que a distância entre os pontos de amostragem.

Para os atributos físicos, como DS e RP, o epp pode estar relacionado a variações pontuais decorrentes do manejo ou a características intrínsecas do Latossolo, não captadas pela malha amostral. Já para os atributos químicos, como pH e MO, a ausência de estrutura espacial pode indicar relativa homogeneidade promovida por práticas de manejo, como calagem e adubação, ou ainda uma variabilidade descontínua sem padrão definido. De modo geral, a predominância do epp sugere limitação da resolução espacial da amostragem, indicando que malhas mais densas podem ser necessárias para a detecção de possíveis estruturas espaciais.

A análise da dependência espacial, cujos parâmetros estão detalhados na Tabela 3, confirma que a distribuição da produtividade de matéria seca de

forragem (MSF) e dos atributos físico-químicos do solo não ocorre de forma aleatória na área experimental.

Tabela 3: Parâmetros dos semivariogramas simples ajustados para alguns atributos da produtividade de produção de matéria seca do capim-marandu (*Urochloa Brizantha cv.* Marandu) e atributos de um Latossolo Vermelho Distrófico.

Atributo [a]	Parâmetros							
	Modelo [b]	Efeito Pepita (C_0)	Patamar (C_0+C)	Alcance (A_0) (m)	r^2	SQR [c]	Avaliador da dependência espacial	
							ADE [d]	Classe
γ(h) simples dos atributos da planta								
MSF (kg ha^{-1})	exp	$1{,}000.10^{3}$	$4{,}649.10^{5}$	17,7	0,516	$2{,}420.10^{9}$	99,8	forte
γ(h) simples dos atributos físicos do solo								
DS (g cm^{-3})	epp	$1{,}464.10^{-2}$	$1{,}464.10^{-2}$	-	-	-	-	-
Ph	epp	$5{,}570.10^{-2}$	$5{,}570.10^{-2}$	-	-	-	-	-
UV (cm^3 cm^{-3})	esf	$6{,}300.10^{-4}$	$8{,}760.10^{-3}$	19,8	0,171	$1{,}069.10^{-5}$	92,8	forte
DP (g cm^{-3})	epp	$1{,}434.10^{-1}$	$1{,}434.10^{-1}$	-	-	-	-	-
PTc (%)	epp	$3{,}752.10^{1}$	$3{,}752.10^{1}$	-	-	-	-	-
MO (g dm^{-3})	epp	$3{,}669.10^{1}$	$3{,}669.10^{1}$	-	-	-	-	-
PTd (%)	epp	$2{,}111.10^{1}$	$2{,}111.10^{1}$	-	-	-	-	-
MA (%)	epp	7,826	7,826	-	-	-	-	-
MI (%)	epp	$1{,}928.10^{1}$	$1{,}928.10^{1}$	-	-	-	-	-
RP (MPa)	epp	$2{,}980.10^{-1}$	$2{,}980.10^{-1}$	-	-	-	-	-
UG (g g^{-1})	exp	$4{,}400.10^{-4}$	$5{,}010.10^{-3}$	19,6	0,140	$4{,}045.10^{-6}$	91,2	forte

[a] MSF = Produtividade de matéria seca de forragem; RP, DP, DS, PTC, MO, Ph, PTD, MA, MI, UG, e UV, são respectivamente a resistência à penetração, densidade da partícula, densidade do solo, porosidade total calculada dos cilindros, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, porosidade total das amostras de solo, macroporosidade, microporosidade, umidade gravimétrica, e a umidade volumétrica; [b] exp = exponencial, esf = esférico e epp = efeito pepita puro; modelo sucedido por número entre parêntesis, significando o número de pares no primeiro lag; [c] SQR = soma dos quadrados dos resíduos; [d] ADE = avaliador da dependência espacial.

A identificação de dependência espacial para a produtividade da forragem e para a umidade do solo confirma a aplicabilidade da geoestatística como ferramenta para análise de sistemas agrícolas. De acordo com Vieira et al. (2010), a geoestatística permite descrever e modelar a continuidade espacial dos atributos do solo, sendo essencial para a compreensão da variabilidade em sistemas agrícolas.

Resultados semelhantes foram observados por Montanari et al. (2013), que verificaram dependência espacial significativa entre atributos físicos do solo e produtividade de culturas, destacando a importância da modelagem espacial para a identificação de padrões produtivos.

A ocorrência de efeito pepita puro para alguns atributos também é relatada na literatura, sendo atribuída à variabilidade em escala inferior à malha amostral ou à distribuição aleatória dos atributos no solo. Segundo Dalchiavon e Carvalho (2012), esse comportamento pode indicar limitação da densidade amostral na

detecção da estrutura espacial, ou ainda variabilidade intrínseca dos atributos analisados.

3.4. Distribuição Espacial da Produtividade e da Umidade do Solo via Krigagem

A Figura 6 apresenta os mapas de krigagem da produtividade de matéria seca de forragem (MSF) e da umidade do solo (UG e UV), evidenciando a distribuição espacial dessas variáveis na área experimental.

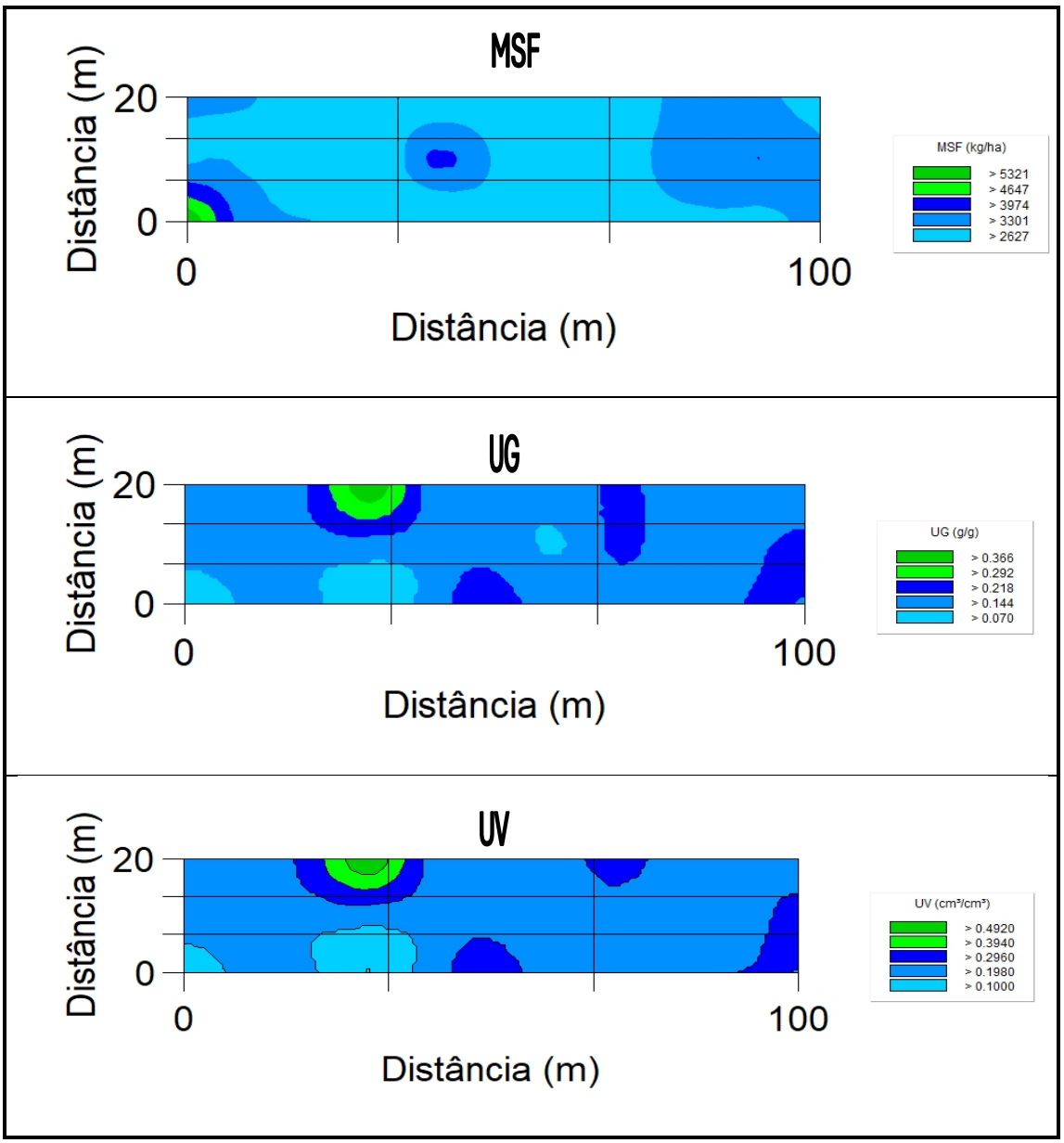


Figura 6: Mapas de krigagem dos atributos (MSF, UG e UV) da produtividade de produção de matéria seca do capim-marandu (*Urochloa Brizantha cv.* Marandu) e atributos de um Latossolo Vermelho Distrófico.

A MSF variou de 2.627 a valores superiores a 5.321 kg ha^{-1}, formando zonas bem definidas ao longo da área. As maiores produtividades se concentram em pontos específicos, enquanto algumas faixas contínuas apresentam valores mais baixos, evidenciando variação em curtas distâncias. Essa diferença está relacionada à disponibilidade de água no solo, que interfere diretamente no crescimento da planta e na absorção de nutrientes.

Os mapas de umidade do solo (UG e UV) apresentam padrão semelhante ao observado para a MSF, com valores variando de aproximadamente 0,070 a 0,366 g g^{-1} (UG) e de 0,100 a 0,492 cm^3 cm^{-3} (UV). As áreas com maior teor de água coincidem com as regiões mais produtivas, enquanto locais mais secos correspondem aos menores valores de MSF, indicando limitação ao desenvolvimento da forrageira nessas condições.

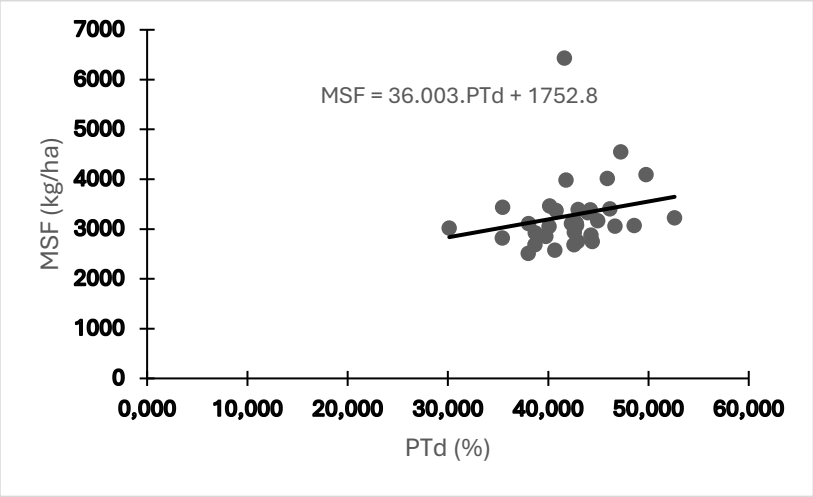
A distribuição espacial de UG e UV é bastante próxima, o que era esperado, já que ambas representam a mesma condição hídrica do solo, expressa em unidades diferentes. Contudo, a coincidência entre os padrões de umidade e produtividade indica que a disponibilidade de água está diretamente relacionada à variação da MSF na área.

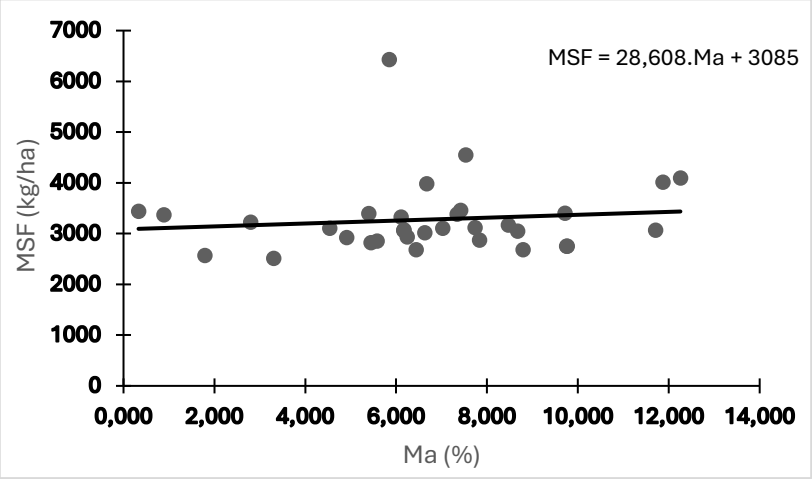
Os mapas de krigagem obtidos neste estudo reforçam a importância da análise espacial na identificação de zonas de manejo. De acordo com Mello et al. (2017), a espacialização dos atributos do solo e da produtividade permite otimizar o uso de insumos agrícolas, promovendo maior eficiência no manejo das áreas de pastagem.

A coincidência entre áreas de maior umidade do solo e maior produtividade também foi observada em estudos conduzidos por Carvalho et al. (2014), os quais destacam a influência da disponibilidade hídrica na variabilidade da produção de forrageiras tropicais. Esses resultados evidenciam a água como fator determinante para o desenvolvimento da biomassa vegetal.

3.5 Equações de regressão

A Figura 7, representa o quadro das fórmulas de regressão, modulados através dos dados geoestatísticos obtidos com seus respectivos gráficos.





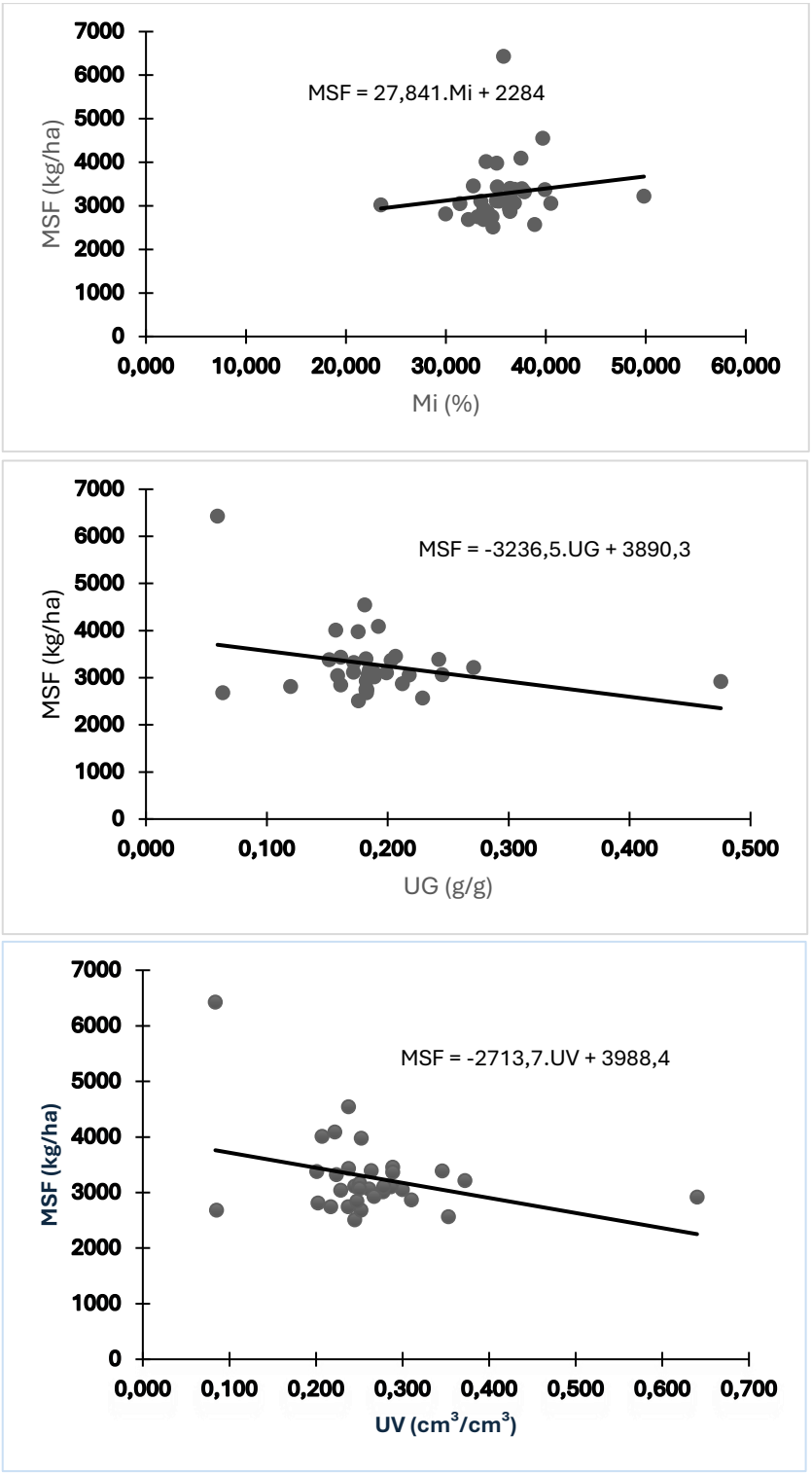


Figura 7: Equação de regressão entre produção de matéria seca do capim-marandu (*Urochloa Brizantha cv.* Marandu) e atributos do solo.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no estudo da variabilidade espacial da produtividade do capim-marandu (*Urochloa brizantha*) e sua relação com os atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho, conclui-se que:

1. Os atributos avaliados apresentaram variabilidade ao longo da área experimental, evidenciando a heterogeneidade do sistema solo-planta.
2. A análise da matriz de correlação indicou associação positiva da matéria seca de forragem (MSF) com a densidade da partícula (DP) e a porosidade total calculada (PTc), e associação negativa com a umidade do solo, tanto gravimétrica (UG) quanto volumétrica (UV).
3. A MSF e a umidade do solo (UG e UV) apresentaram dependência espacial de classe forte, com alcances de 17,7 m, 19,8 m e 19,6 m, respectivamente, enquanto os demais atributos apresentaram efeito pepita puro na escala amostral adotada.
4. A coincidência espacial entre as áreas de maior umidade do solo e os maiores valores de produtividade evidenciou a importância da disponibilidade hídrica na definição dos padrões produtivos do capim-marandu.
5. Os mapas obtidos por krigagem permitiram a identificação de zonas com diferentes níveis produtivos, demonstrando o potencial da geoestatística como ferramenta de apoio à tomada de decisão e ao manejo localizado em sistemas de pastagem.

5. LITERATURA CITADA

ALVES, J. S. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e capacidade de suporte em pastagens no semiárido. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 29, n. 1, p. 45-55, 2025.

CARVALHO, L. A. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e produtividade de forragem em Latossolo Vermelho. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v. 34, n. 6, p. 1120-1132, 2014.

CAVALLINI, M. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob pastagem de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p. 1035-1045, 2010.

Dalchiavon FC, Carvalho MP (2012) Correlação linear e espacial dos componentes de produção e produtividade da soja. Semina: Ciências Agrárias 33:541-552. DOI: http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n2p541

DIAS FILHO, M. B. Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação. 4. ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2011.

EMBRAPA GADO DE CORTE. Resposta de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu a regimes de cortes. Campo Grande: Embrapa Gado de Corte, 2011. (Comunicado Técnico, n. 279).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Version 7.0. Plainwell: Gamma Design Software, 2004.

KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979.

LEITE, R. G. et al. Rendimento de forragem e morfogênese de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu sob diferentes períodos de descanso. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 46, n. 4, p. 841-848, 2015.

LIMA, C. G. R. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e da produtividade de forragem. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 1, p. 7-15, 2007.

MELLO, L. M. M. et al. Geoestatística como ferramenta para o manejo de pastagens degradadas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 52, n. 8, p. 650-660, 2017.

MENDES, A. S. et al. Avaliação do grau de degradação de pastagens em solos argilosos. Scientia Agraria, v. 19, n. 2, p. 112-120, 2018.

MONTANARI, R. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Argissolo sob pastagem. Revista de Agricultura, v. 88, n. 3, p. 220-231, 2013.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais. Piracicaba: FEALQ, 2002.

RAIJ, B. van. et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTEL, R. C. SAS system for elementary statistical analysis. 2. ed. Cary: SAS Institute, 1997.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. Análise de alimentos: métodos químicos e biológicos. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009.

SOUZA, G. S. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos de um Latossolo sob pastagem e floresta. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p. 18-28, 2010.

VIEIRA, S. R. et al. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

ALVES, F. G. S. et al. Variabilidade espacial dos atributos do solo e modelagem para estimar a produção de forragem. Ciência Animal Brasileira, 2025.

SANTOS, A. C. et al. Variabilidade espacial das características da pastagem de capim-marandu. Revista Verde, 2015.

SCARIOT, E. M.; SILVA, E. J.; MACEDO, M. C. M.; EUCLIDES, V. P. B. Efeito do pastejo animal nas propriedades físicas do solo sob pastagens do capim-marandu e capim-xaraés. In: JORNADA CIENTÍFICA DA EMBRAPA GADO DE CORTE, 6., 2010.

SILVA, E. R. O. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e seus efeitos na produtividade da Tifton 85. Revista Caatinga, 2020.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Tópicos em Ciência do Solo, 2000.

GREGO, C. R. et al. Variabilidade espacial do solo e da biomassa de pastagem. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2012.

GUIMARÃES, W. D. Geoestatística aplicada ao mapeamento de atributos físicos do solo. UFV, 2013.

GRIPP JUNIOR, J. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob pastagem. Revista Ciência Agronômica, 2016.

SOUZA, G. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob pastagem. Revista Ciência Agronômica, 2008.

BERNARDI, A. C. et al. Variabilidade espacial de propriedades do solo e produtividade de pastagem. Embrapa, 2015.