




Variabilidade espacial dos atributos do solo e modelagem para estimar a produção de forragem e a capacidade de suporte no Semiárido

Spatial variability of soil attributes and modeling to estimate forage production and carrying capacity in Semi-arid

Francisco Gleyson da Silveira Alves¹, Edmilson Rodrigues de Lima Junior¹, Rodrigo Gregório da Silva²,
Magno José Duarte Cândido^{*1}

1 Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. 

2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil. 

*Autor correspondente: magno@ufc.br

Recebido: 03 de julho, 2024. Aceito: 11 de dezembro, 2024. Publicado: 25 de março, 2025. Editor: Rondineli P. Barbero

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo e o uso da modelagem para estimar a produção de forragem e capacidade de suporte (CS) no Semiárido. Os dados foram analisados usando métodos de geoestatística, incluindo semivariogramas e o mapeamento de cada atributo químico do solo estudado. A produção de forragem foi simulada para os níveis de garantia de 99; 95 e 90%, considerando áreas aptas à produção de forragem mecanizada, áreas de pastagem nativa, áreas irrigáveis e áreas de vazante. O modelo exponencial melhor se ajustou para os atributos matéria orgânica, potássio, fósforo e pH, enquanto o modelo esférico se ajustou para os atributos saturação por base, índice de pedregosidade, índice de declividade e índice geral. O modelo gaussiano melhor se ajustou para o índice de custo. O menor alcance (235 m) foi obtido para o fósforo, que apresentou um grau de dependência espacial classificado como forte (<25%). A maior produção de forragem foi obtida na área irrigável, com valores de 112.270,00; 178.661,00 e 215.455,00 kg ano⁻¹ para os níveis de garantia 99; 95 e 90%, respectivamente. O nível de garantia de 90% possibilitou CS 31% superior à garantia de 99%, sendo maior a CS observada nas áreas mecanizadas, representando cerca de 71,8% da CS da propriedade, devido à maior produção de forragem. A modelagem permite quantificar eficientemente a área capaz de produzir forragem, sendo que menores níveis de garantia possibilitam maior produção de forragem e maior capacidade de suporte.

Palavras-chave: Capacidade de suporte; fertilidade do solo; técnicas geoestatísticas; biomassa forrageira.

Abstract: The objective of this study was to evaluate the spatial variability of soil attributes and the use of modeling to estimate forage production and carrying capacity (CC) in a semi-arid region. Data were analyzed using geostatistical methods, including semivariograms analysis and mapping of each soil chemical attribute. Forage production was simulated at 99%; 95% and 90% guarantee levels, considering areas suitable for mechanized forage production, native pasture areas, irrigable areas and, ephemeral wetland areas. The exponential model best fit



the attributes of organic matter, potassium, phosphorus, and pH, while the spherical model was optimal for base saturation, stoniness index, slope index, and general index. The Gaussian model provided the best fit for the cost index. Phosphorus had the lowest range (235 m) and demonstrated a strong spatial dependence (<25%). The highest forage production occurred in irrigable areas, with yields of 112,270.00, 178,661.00, and 215,455.00 kg year⁻¹ at the 99%, 95%, and 90% guarantee levels, respectively. The 90% guarantee level enabled a 31% higher CC than the 99% level, with the highest CC observed in mechanized areas—accounting for about 71.8% of the property's total CC due to greater forage production. Modeling effectively quantified areas capable of producing forage, with lower guarantee levels supporting higher forage production and carrying capacity.

Keywords: Carrying capacity; soil fertility; geostatistical techniques; forage biomass.

1. Introdução

O semiárido apresenta um clima quente e seco, com precipitações escassas e má distribuídas ao longo do ano. Com essa má distribuição das chuvas, os sistemas produtivos tendem a aumentar o rebanho na época das chuvas, devido à maior biomassa de forragem, reduzindo-o na época seca, em decorrência da redução de biomassa. Além disso, esse ajuste na taxa de lotação muitas vezes é feito empiricamente, acarretando degradação das pastagens e dos solos.

Diante disso, é importante realizar o planejamento da propriedade rural objetivando aumentar a produtividade do pasto e do rebanho. Em propriedades que adotam sistemas de produção animal a pasto, o planejamento deve ser baseado em informações como a projeção da dinâmica do rebanho, o estabelecimento de limites críticos de exigências nutricionais para plantas e animais e de níveis esperados de produtividade da pastagem ao longo ano, de modo a otimizar a eficiência biológica do sistema produtivo.

A agricultura de precisão mostra-se como uma ferramenta relevante no gerenciamento e no processo de tomada de decisão de uma propriedade, possibilitando maior eficiência no uso dos recursos do sistema produtivo⁽¹⁾. Essa tecnologia é compreendida como um conjunto de ferramentas que auxiliam os produtores no processo de tomada de decisões de atividades relacionadas ao manejo do solo, da cultura, do rebanho e dos insumos, aumentando a produtividade e os lucros da atividade, além de permitir a redução dos impactos negativos ao ambiente⁽²⁾.

Com a utilização e o aperfeiçoamento das técnicas de agricultura de precisão para que haja benefícios no planejamento agropecuário, há ganhos mensuráveis de modo que a propriedade se torne técnica e economicamente mais eficiente e ambientalmente viável⁽³⁾. Para pequenos produtores que apresentam baixo poder econômico a ideia de agricultura de precisão é raramente discutida, pois essa ferramenta requer a adoção de equipamentos caros. Nesse sentido, para esses produtores a agricultura de precisão deve apresentar uma abordagem mais holística de modo a ajudar os produtores a gerenciarem a produção de forragem e a variabilidade do solo, melhorando a produtividade⁽⁴⁾.

Objetivou-se avaliar a variabilidade espacial dos atributos do solo e o uso da modelagem para estimar a produção de forragem e capacidade de suporte (CS), considerando diferentes níveis de garantia (99; 95 e 90%) no Semiárido.

2. Material e métodos

O trabalho foi conduzido na Fazenda Remédio em Quixeramobim, CE, Brasil, localizada em 5°13'59.07" W e 39°25'53.96" S. O clima da região é do tipo BSwH (Semiárido quente e seco), segundo a classificação de Köppen⁽⁵⁾. A propriedade possui uma área total de 313,0 hectares.

Para a caracterização da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo (pH, potássio, fósforo, saturação por base e matéria orgânica) foram coletadas amostras de solos georreferenciados em uma malha retangular de 300 m x 175 m, levando em consideração o uso exploratório dos solos, totalizando 62 amostras em toda extensão da propriedade. A partir dos resultados da análise de solo foi estimado a necessidade de fertilizante para que os níveis ficassem de acordo com o recomendado pelo boletim 100 do Instituto Agrônomo de Campinas⁽⁶⁾.

As amostras foram colhidas baseando-se no uso exploratório dos solos. A malha foi gerada utilizando o software AutoCAD® Civil 3D®. Para a localização dos pontos gerados na malha utilizou-se um GPS de navegação modelo GARMIN® GPSmap 62 sc. As amostras foram colhidas utilizando-se um trado com profundidade média de 20 cm. Os dados foram submetidos à análise geoestatística para determinar o modelo de melhor ajuste, abordando a variabilidade espacial dos atributos do solo. Foram obtidos semivariogramas e cada atributo químico foi mapeado pelo método de Krigagem. A dependência espacial foi analisada pelo software GS+ Versão 5⁽⁷⁾, que calcula a semivariância amostral, conforme descrito por Vieiras *et al.*⁽⁸⁾:

$$y(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i + h)z(x_i)]^2}{2n(h)}$$

onde: $n(h)$ é o número de pares de amostras $[z(x_i); z(x_i + h)]$ separados pelo vetor h , sendo $z(x_i)$ e $z(x_i + h)$, valores numéricos observados do atributo analisado, para dois pontos x_i e $x_i + h$, separados pelo vetor h .

Calculou-se o grau de dependência espacial (GDE), definido como a proporção entre o efeito pepita e o patamar. A classificação seguiu os critérios de Cambardella *et al.*⁽⁹⁾, onde valores <25% indicam dependência espacial forte, entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada, e >75% indicam dependência espacial fraca.

$$GDE = [C_0 / (C_0 + C_1)] * 100,$$

em que: GDE representa o grau de dependência espacial; C_0 é Efeito pepita e $C_0 + C_1$ é Patamar.

Modelos matemáticos foram ajustados aos semivariogramas, permitindo a visualização da natureza da variação espacial na densidade. Os seguintes modelos matemáticos foram usados para ajustar os semivariogramas:

Para o modelo exponencial: $\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/A_0)]$.

Para o modelo gaussiano: $\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h^2/A_0^2)]$.

Para o modelo esférico: $\gamma(h) = C_0 + C[1,5(h/A_0) - 0,5(h/A_0)^3]$, para $h \leq A_0$ ou $\gamma(h) = C_0 + C$, para $h > A_0$.

Onde: $\gamma(h)$ = semivariância para a classe de distância de intervalo h ; h = intervalo de distância de defasagem; C_0 = variância do pepita ≥ 0 ; C = variância estrutural $\geq C_0$ e A_0 = parâmetro de intervalo.

Para que melhorar a tomada de decisão no planejamento da propriedade, se fez necessário quantificar o volume dos reservatórios existentes nesta. Para isso, realizou-se um levantamento planialtimétrico de toda a área, utilizando um par de receptores GPS TechGeo®, modelo GTR G² geodésico, cujos dados, após serem processados pela Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), apresentaram precisão de 10 mm \pm 1 ppm.

Após o levantamento, uma nuvem de pontos foi gerada e processada em um sistema de informação geográfica para criar um modelo digital de terreno a partir do qual as linhas de contorno foram produzidas. O volume de armazenamento dos reservatórios foi então calculado usando um diagrama de cota-volume. Dispondo-se desses dados, aplicou-se um estudo hidrológico em todos os reservatórios da propriedade. Calculou-se o volume máximo de cada reservatório, delimitou-se a área da bacia hidrográfica e, em seguida, mediu-se sua declividade e o seu comprimento. Para determinar o escoamento de água dentro dessa bacia, quantificou-se, através do mapa de uso de solo, quais eram os valores das áreas de pastagem nativa, áreas de florestas e áreas sem vegetação⁽¹⁰⁾. O volume gerado pelos escoamentos, permitiu estimar a evaporação dos reservatórios⁽¹¹⁾.

Utilizando o modelo hidrológico e o histórico de precipitação da região, o comportamento do reservatório foi simulado ao longo do tempo para quantificar áreas designadas para irrigação e vazantes. Para as áreas de irrigação definiu-se um volume médio exigido por uma cultura forrageira que é de aproximadamente 100 m³ ha⁻¹ dia⁻¹. Através desse volume diário calculou-se a exigência hídrica da cultura para um período de 150 dias (agosto a dezembro), período esse de maior exigência devido à ausência de chuvas na região. De posse desses dados, calculou-se o volume que poderia ser retirado dos reservatórios fornecendo níveis de garantia de 90; 95 e 99%. Para encontrar a quantidade de área destinada à produção irrigada que cada reservatório fornece com os níveis de garantia citados a seguinte equação foi adotada:

$$\text{Área(ha)} = (V_{\text{Ext}}/V_{\text{Exi}} * \text{NID}),$$

onde: V_{Ext} : Volume extraído (m³ x ha⁻¹ dia⁻¹); V_{Exi} : Volume necessário (m³); NID: Número de dias de irrigação (dias).

Além de estimar a área irrigada, a área de vazantes também foi calculada. A área de superfície de água foi estimada com base no volume armazenado usando o diagrama cota/volume/área. As áreas de vazantes para cada reservatório foram determinadas por meio de análise de regressão. Essa área variou com o nível da superfície da água, que estava relacionado à cota. Para o cálculo das áreas de vazantes, a referência se torna a cota referente à superfície da água. A área foi estimada como a diferença entre a cota da superfície da água e a cota subsequente, definida como a cota da superfície da água mais 1 m.

Essas áreas de vazante foram definidas como sendo áreas que são utilizadas no período seco do ano, entrando como acréscimo de área para produção de forragem. De posse desses dados, calculou-se a área média anual de vazante disponível de cada reservatório. O modelo hidrológico foi utilizado para simular o comportamento das áreas de vazante ao longo do tempo para um período de 40 anos, de 1974 a 2013 (1974–2013)⁽¹²⁾. Em seguida, foi aplicado um teste de probabilidade para determinar as áreas médias de áreas úmidas efêmeras com níveis de garantia de 90, 95 e 99%, que correspondem ao percentual de tempo em que os reservatórios fornecem áreas para produção de forragem.

O capim-tanzânia (*Megathyrsus maximus* cv. Tanzânia) foi selecionado para as áreas irrigáveis, enquanto o capim-canarana (*Echinochloa* sp.) foi escolhido para as áreas de vazantes. Adicionalmente, áreas adequadas para produção mecanizada de forragem e áreas de pastagem nativa foram consideradas. Para definir as áreas de produção de forragem mecanizada, foram desenvolvidos o índice de pedregosidade (IP), o índice de custo (IC) com fertilização e o índice de declive (ID). Esses índices foram combinados usando uma média ponderada para gerar um novo índice chamado índice geral (IG). O IP, CI e ID receberam pesos de 0,5; 0,3 e 0,2, respectivamente.

A atribuição dos valores para o cálculo da média ponderada, deu-se devido aos fatores de maior limitação para colheita mecanizada. O índice de pedregosidade recebeu o maior peso devido ele ser a maior limitação da mecanização agrícola. Assim o índice geral auxiliou na delimitação das áreas de produção de forragem mecanizada, bem como na delimitação da área de reserva legal, conforme a legislação ambiental vigente.

A área destinada à produção de pasto nativo foi obtida após o mapeamento das áreas de produção mecanizada, áreas de reserva legal, de preservação permanente e das áreas destinadas à irrigação. Para a produção nas áreas mecanizadas, entre os anos de 1974 e 2013, estimou-se a produtividade do capim-buffel (*Cenchrus ciliaries*) através de uma regressão, obtendo-se a produtividade da gramínea ($\text{kgMS ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$) a partir de informações de precipitação, dados estes obtidos por Dantas Neto *et al.*⁽¹³⁾. Posteriormente, aplicou-se a equação obtida da regressão em três meses de precipitação, onde esses meses formam um ciclo de produção da cultura. Como tiveram anos onde a precipitação média fica em torno de 700 mm e as chuvas se estenderam a aproximadamente seis meses do ano, utilizou-se seis meses de precipitação para compor duas produções de forragem na época das chuvas e posteriormente extrapolou-se para os quarenta anos de simulação.

A estimativa de produção de pastagem nativa foi obtida por meio dos dados encontrados por Araújo Filho *et al.*⁽¹⁴⁾. Foi conduzida uma análise de regressão baseada em dados de precipitação para um único ciclo de crescimento (fevereiro a julho), fornecendo estimativas de produção anual que foram extrapoladas ao longo do período de simulação de 40 anos.

Com os dados de produção de forragem já calculados, estimou-se a capacidade de suporte da propriedade, em unidade animal, utilizando a equação:

$$CS=[PF/365]*EUF/(450*2,6\%),$$

Onde: CS: Capacidade de Suporte; PF: Produção de Forragem (kgMS ano⁻¹); EUF: Eficiência de uso da forragem (capim-buffel 60%; Caatinga 30%; Vazante 60% e Área irrigada 65%).

A partir desses dados calculou-se a capacidade de suporte da propriedade e simularam-se quarenta anos de precipitação, para observar como seria a taxa de lotação da propriedade no período simulado.

3. Resultados e discussão

Para os atributos químicos Matéria Orgânica (MO), Potássio (K), Fósforo (P) e pH, o modelo que mais se ajustou aos semivariogramas foi o exponencial (Tabela 1). A Saturação por Base (V%), índice de pedregosidade (IP), índice de declividade (ID) e índice geral (IG) se ajustaram melhor ao modelo esférico, enquanto o índice de custo (IC) apresentou melhor ajuste para o modelo gaussiano (Tabela 1). Os semivariogramas para atributos químicos do solo são mostrados na Figura 1, e aqueles para custo, pedregosidade, declividade e índices gerais são mostrados na Figura 2. Vários estudos demonstraram que os modelos exponencial e esférico são os que melhor se ajustam aos atributos químicos do solo. O modelo esférico é caracterizado por atingir um platô a uma distância finita, indicando fenômenos contínuos, enquanto o modelo exponencial tem um alcance maior em comparação ao modelo esférico em condições semelhantes⁽¹⁵⁾.

Maiores amplitudes foram observadas para o índice de declividade, índice de custo, teor de matéria orgânica e teor de potássio. A menor amplitude foi obtida para o teor de fósforo, sugerindo que o valor de amplitude utilizado em avaliações geoestatísticas para futuros projetos em propriedades com requisitos semelhantes, como no presente estudo, não deve ser menor que 235 m. A variável amplitude refere-se à distância onde os pontos amostrados estão correlacionados, sendo importante para o correto planejamento e avaliação de um sistema de irrigação⁽¹⁶⁾. Por meio disso, é possível determinar até que ponto uma variável possui dependência espacial, ou seja, a partir daí o comportamento espacial passa a ser independente⁽¹⁷⁾.

Tabela 1. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas para atributos químicos do solo da propriedade e índices de custo, pedregosidade, declividade e gerais

Variável	Modelo	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	GDE	R ²
		(C0)	(C0+C1)	Ao (m)	(C0/C0+C1)	
Chemical attributes						
Matéria orgânica	Exponencial	23,00	53,00	1600,00	43%	0,602
Potássio	Exponencial	1,50	2,80	1350,00	54%	0,777
Fósforo	Exponencial	1,00	2013,00	235,00	0%	0,582
pH	Exponencial	0,20	0,30	600,00	67%	0,405
SB	Esférico	60,00	165,00	980,00	36%	0,334
Índices						
Custo	Gaussiano	0,045	0,07	1750	64%	0,833
Pedregosidade	Esférico	0,0178	0,0573	446	31%	0,180
Declividade	Esférico	0,0055	0,012	2650	46%	0,821
Geral	Esférico	0,0095	0,019	650	50%	0,343

SB: saturação por bases; GDE: grau de dependência espacial.

O grau de dependência espacial (GDE) foi classificado como forte (GDE<25%) apenas para o fósforo e moderado (GDE entre 25 e 75%) para os demais atributos químicos do solo e para todos os índices avaliados (Tabela 1). De acordo com Cambardella *et al.*⁽⁹⁾, variáveis com GDE classificadas como fortes são mais afetadas pelas propriedades inerentes do solo, especificamente fatores relacionados à formação do solo, enquanto variáveis com GDE moderado estão associadas à homogeneização do solo. Neste contexto, os resultados obtidos no presente estudo foram satisfatórios para o estabelecimento de

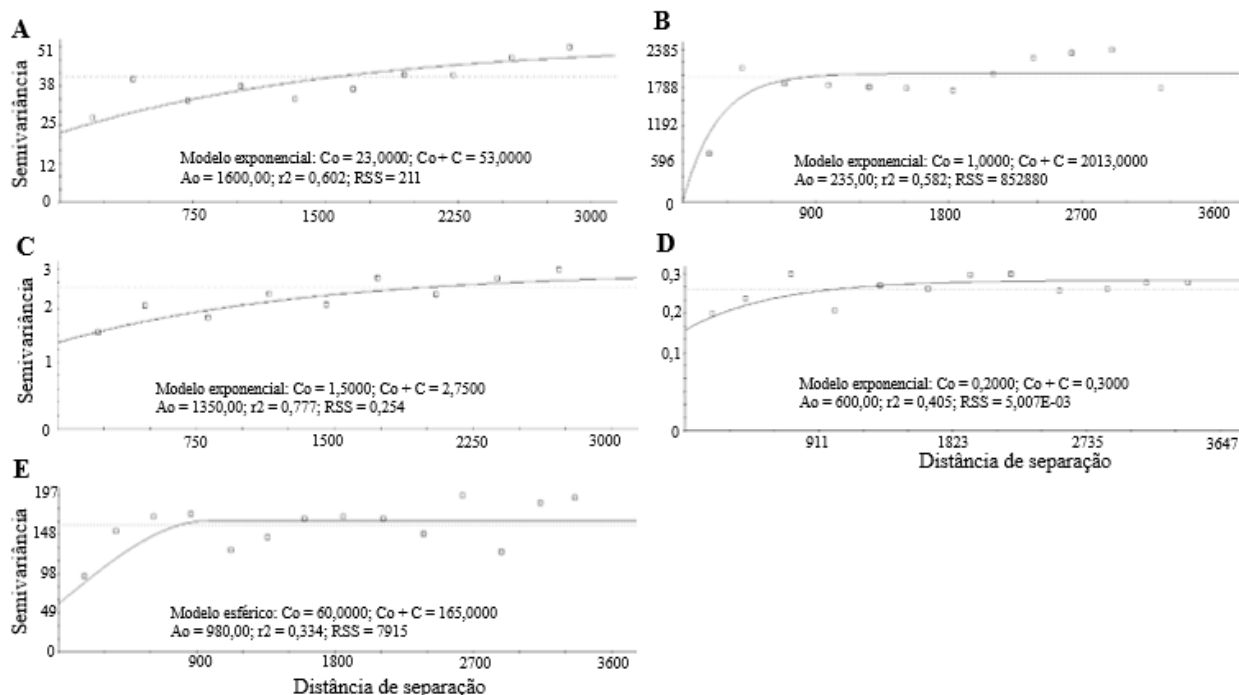


Figura 1. Semivariograma experimental dos atributos químicos dos solos: (A) matéria orgânica; (B) P; (C) K; (D) pH e (E) SB.

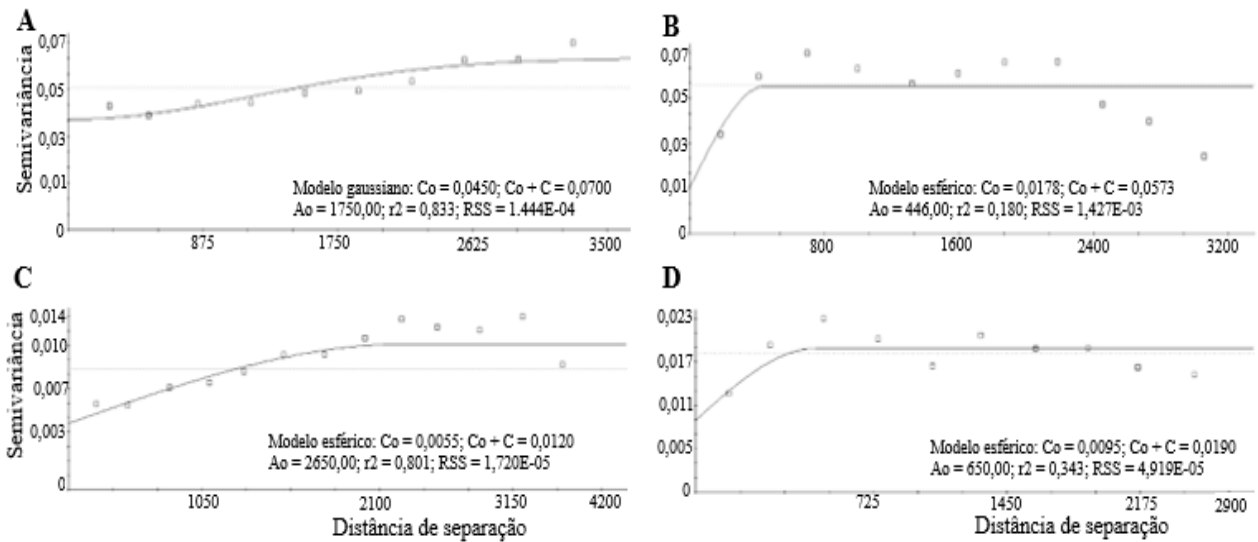


Figura 2. Semivariograma experimental dos índices: (A) IC; (B) IP; (C) ID; (D) IG.

Os mapas de variabilidade dos atributos químicos do solo e custo, pedregosidade, declividade e índices gerais revelaram variações nos atributos estudados em toda a área (Figura 3).

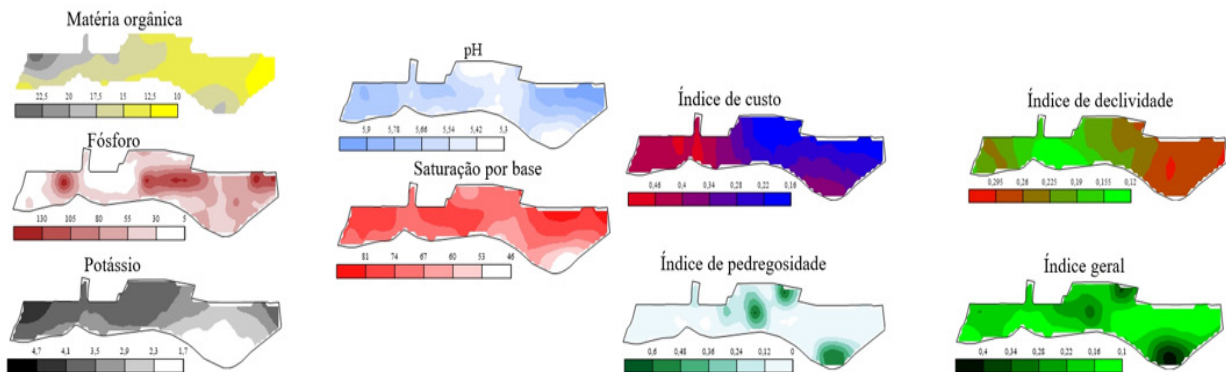


Figura 3. Mapas de variabilidade espacial dos atributos químicos e dos índices dos solos.

A criação de mapas de variabilidade para atributos e índices químicos do solo avaliados neste estudo é crucial para identificar zonas específicas que requerem manejo. Esses mapas permitem a aplicação direcionada de insumos para melhorar a homogeneidade da fertilidade do solo. Essas informações são particularmente relevantes para a implementação de técnicas de agricultura de precisão, pois as recomendações de aplicação de fertilizantes podem ser adaptadas aos níveis de nutrientes em cada mancha de solo^(15;17;18). Com esses mapas é possível, por exemplo, identificar áreas que necessitam de correção no solo, devido a pH baixo (solo ácido) ou saturação por bases baixa, melhorando a condição para as práticas agrícolas.

Com o menor nível de garantia (90%) os reservatórios da propriedade fornecem água suficiente para irrigar uma área de 11,07 ha (Tabela 2). A maior contribuição foi oriunda da água do açude Barragem, permitindo irrigar uma área equivalente a 69,44; 63,83 e 60,25% da área total para os níveis 99; 95 e 90% de garantia, respectivamente. A partir dos dados de área irrigável por cada reservatório, estimou-se a biomassa de forragem total (BFT) para os diferentes níveis de garantia adotados (Tabela 2). Na área passível de irrigação, a maior BFT, independentemente do nível de garantia, foi verificada para o açude Barragem, o que já era esperado tendo em vista que esse possibilitou uma maior área irrigável.

Para áreas de produção em vazante observaram-se maiores áreas, independentemente do nível de garantia adotado, para o Açude Sede, enquanto o açude Barragem não contribuiu com nenhuma área (Tabela 2). Assim, maior BFT foi estimada para o Açude Sede, com 3.110; 3.780 e 4.008 kg ano⁻¹ para os níveis de 99; 95 e 90% de garantia, respectivamente.

Tabela 2. Áreas para irrigação e área de vazante de cada reservatório e produção de biomassa de forragem total (BFT) conforme os níveis de garantia (G)

Reservatório	G 99%	G 95%	G 90%	G 99%	G 95%	G 90%
	Área de irrigação (ha)			Área de vazante (ha)		
Sede	0,83	1,90	2,73	1,13	1,40	1,45
Barragem	4,00	5,86	6,67	0,00	0,00	0,00
Volta	0,93	1,42	1,67	0,14	0,19	0,29
TOTAL	5,76	9,18	11,07	1,27	1,59	1,74
	kg BFT ano ⁻¹			kg BFT ano ⁻¹		
Sede	16.224,00	36.993,00	53.215,00	3.110,00	3.870,00	4.008,00
Barragem	77.875,00	114.087,00	129.792,00	0,00	0,00	0,00
Volta	18.171,00	27.581,00	32.448,00	387,00	511,00	802,00
TOTAL	112.270,00	178.661,00	215.455,00	3.497,00	4.381,00	4.810,00

O fato de o reservatório Barragem, na área de vazante, não ter contribuído na simulação hidrológica decorre dele possuir excelente afluente e seu nível ao longo dos anos ter se mantido sempre próximo ao nível máximo de acumulação de água. Ao estudarem quatro tipos de reservatórios em uma propriedade no município de Quixeramobim, Ceará. Souza *et al.*⁽¹⁹⁾ e Andrade *et al.*⁽²⁰⁾ relataram que a maior biomassa de forragem foi obtida para o reservatório que possibilitou maior área irrigável, com uma produção de 369.058,78 kg ano⁻¹ para 7,78 hectares irrigáveis e 97.5000,00 kg ano⁻¹ para 2,05 hectares irrigáveis, respectivamente.

Vale ressaltar que os reservatórios têm potencial para irrigação, permitindo obter BFT variando de 112.270 a 215.455 kg ano⁻¹ para áreas irrigáveis e de 3.497 a 4.810 kg ano⁻¹ para áreas de vazantes, sendo que maiores valores foram estimados para menores níveis de garantia (G90%), o que se deve ao fato de uma garantia de 90% permitir irrigar uma maior

área (Tabela 2). Aumento na estimativa da BFT foi observado com a redução no nível de garantia, comportamento em todas as áreas de produção de forragem e, conseqüentemente, maior foi a capacidade de suporte da propriedade (Tabela 3).

Tabela 3. Produção de forragem total (BFT) e capacidade de suporte (CS) em áreas de produção de forragem com diferentes níveis de garantia

Áreas	G 99%	G 95%	G 90%	G 99%	G 95%	G 90%
	BFT (kg ano ⁻¹)			CS (AU ha ⁻¹)		
Área de Vazante	3.497,00	4.382,00	4.810,00	0,50	0,60	0,70
Área Irrigada	112.270,00	178.659,00	215.455,00	17,10	27,20	32,80
Área Mecanizada	28.125,00	122.640,00	294.336,00	4,00	17,20	41,40
Área de Pastagem Nativa	110.114,00	157.305,00	277.906,00	7,70	11,10	19,50
TOTAL	254.006,00	462.985,00	792.506,00	29,30	56,10	94,40

O nível de 90% de garantia possibilitou uma produção de forragem superior em 32% em relação a produção estimada no nível de 99% de garantia, acarretando numa capacidade de suporte superior em 31% quando comparado com a capacidade observada para o maior nível de garantia (Tabela 3). Níveis menores de garantia, portanto, levam a estimativas mais altas de produção de forragem, permitindo maiores capacidades de suporte de pastagem. A maior capacidade de suporte para áreas mecanizáveis deveu-se à maior BFT estimada, tendo em vista que a capacidade de suporte está diretamente relacionada à produção de matéria seca de forragem^(21;22). As diferenças de BFT entre os diferentes níveis de garantia são relevantes, sendo que o nível de garantia a ser adotado na propriedade é importante para a estimativa final de produção e determinação da capacidade de suporte da área.

Na Figura 4 está representado o comportamento da produção de forragem (Figura 4A), a contribuição de cada área de produção de forragem (Figura 4B), e a capacidade de suporte da propriedade ao longo dos 40 anos (Figura 4C). A produção de forragem oriunda de áreas irrigadas permaneceu constante ao longo do período simulado, o que decorreu do fato do volume extraído dos reservatórios ter sido definido ao nível de 99% de garantia de uso, mantendo uma oferta de água eficiente para a produção de forragem em 99% do tempo (Figura 4A).

Curiosamente, anos com maior precipitação nem sempre se correlacionaram com maior TFB. Isso foi particularmente verdadeiro para anos com precipitação variando de 600 a 800 mm (Figure 4A). A média de BFT foi de 117.016; 10.208; 432.493 e 510.997 kg MS ano⁻¹ para as áreas irrigáveis (garantia de 99%), áreas de vazante, áreas de pastagem nativa e áreas mecanizáveis, respectivamente, estimando-se média de 1.070.714 kg MS ano⁻¹.

Para os anos de menor precipitação, a forragem oriunda de áreas irrigáveis apresentou a maior contribuição para a BFT da propriedade (Figura 4B). Essa maior contribuição se deve ao armazenamento da água da chuva nos reservatórios, que fornecem água para produção de forragem durante períodos de baixa pluviosidade (Figura 4B). A contribuição das áreas para a produção de forragem na propriedade foi de 12,9; 1,1; 39,5 e 46,4% para as áreas irrigáveis, áreas de vazante, áreas de pastagem nativa e áreas mecanizáveis, respectivamente.

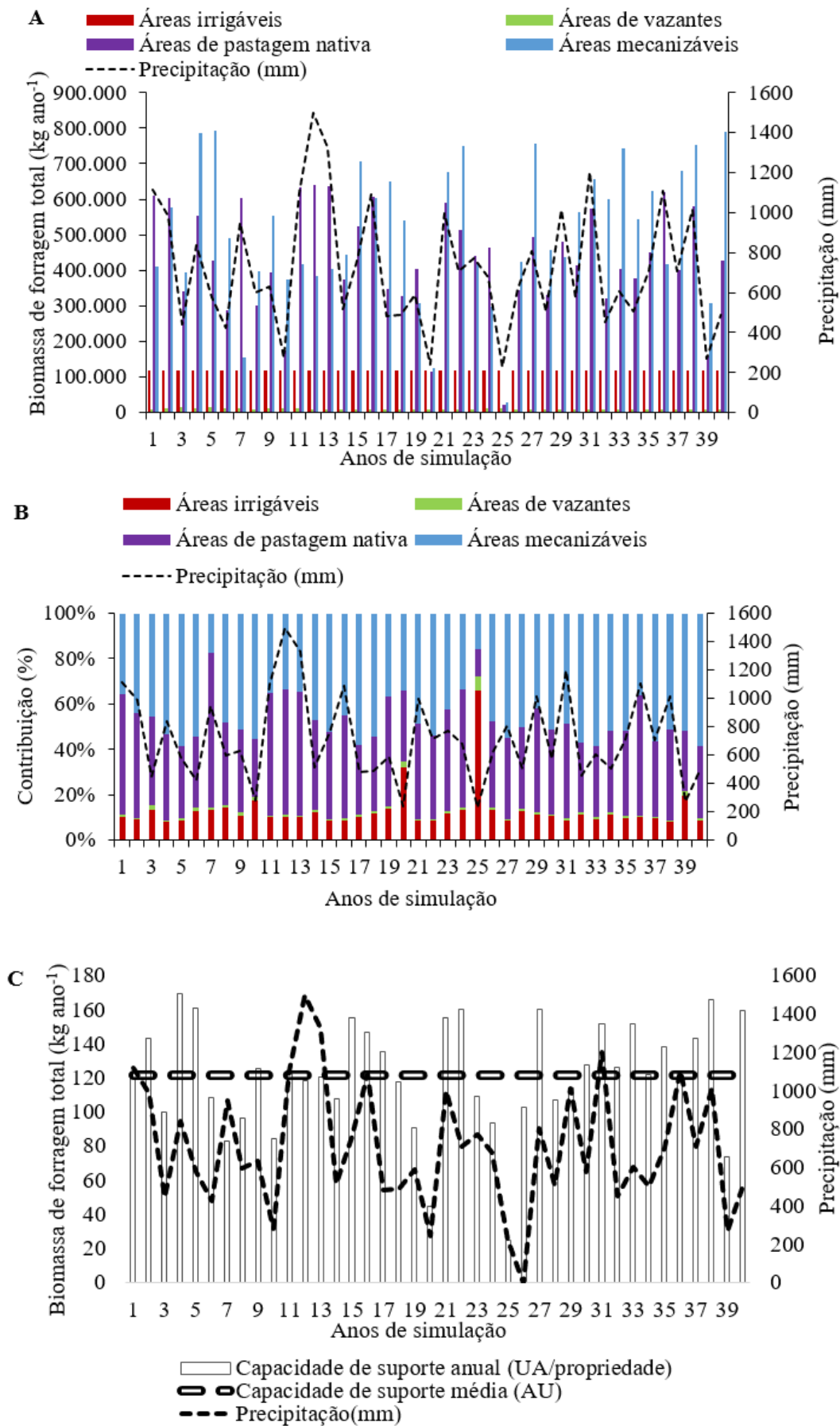


Figura 4. Produção de forragem (A), contribuição das áreas de produção de forragem (B) e capacidade de suporte (C) ao longo do período simulado.

A capacidade de suporte da propriedade variou de 24,8 a 168,9 UA, sendo que as áreas irrigáveis, áreas de vazante, áreas de pastagem nativa e áreas mecanizáveis contribuíram com 17,8; 1,4; 30,4 e 71,8% do total, respectivamente.

4. Conclusão

O processamento de dados geoestatísticos permitiu a identificação e diferenciação de áreas aptas à produção de forragem e áreas de reserva legal na propriedade. A geração de mapas facilita o planejamento e o manejo mais eficiente da fertilidade do solo. Este estudo hidrológico permite a quantificação das áreas produtoras de forragem, a estimativa da biomassa total de forragem e a determinação da capacidade de suporte da propriedade, cujos valores variam com o nível de garantia adotado.

Declaração de conflito de interesses

Nenhum conflito de interesse foi declarado pelos autores.

Declaração de disponibilidade dos dados

Mais informações sobre os dados e metodologias serão disponibilizadas pelo autor para correspondência, conforme solicitado.

Contribuições do autor

Conceituação: R.G. Silva; M.J.D. Cândido. Curadoria dos dados: R.G. Silva; E.R. Lima Junior. Análise formal: E.R. Lima Junior; F.G.S. Alves. Investigação: E.R. Lima Junior; R.G. Silva. Metodologia: E.R. Lima Junior; R.G. Silva. Aquisição de financiamento: R.G. Silva; M.J.D. Administração do projeto: M.J.D. Cândido. Validação e visualização: E.R. Lima Junior; F.G.S. Alves. Supervisão: R.G. Silva; M.J.D. Cândido. Redação (esboço original): E.R. Lima Junior; F.G.S. Alves. Redação (revisão e edição): R.G. Silva; M.J.D. Cândido; E.R. Lima Junior; F.G.S. Alves.

Referências

1. Antonini RC, Bortolotto RP, Zamberlan JF, Nora DD, Pasini MPB, Fiorin JE. Adoção e uso da agricultura de precisão na região das missões do Rio Grande do Sul. *Holos*. 2018;34(4):106-121. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2018.6297>
2. Inamasu RY, Naime JM, Resende AV, Bassoi LH, Bernardi ACC. Agricultura de Precisão: um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. 334p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/916714/agricultura-de-precisao-um-novo-olhar>
3. Bragagnolo J, Amado TJC, Nicoloso RS, Santi AL, Fiorin JE, Tabaldi F. Optical crop sensor for variable-rate nitrogen fertilization in corn: II - Indices of fertilizer efficiency and corn yield. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2013;37(5):1299-1309. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500019>
4. Alemaw G, Agegnehu G. Precision agriculture and the need to introduce in Ethiopia. *Ethiopian Journal of Agricultural Science*. 2019;29(3): 139-158. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/ejas/article/view/189563>
5. Köppen W. Das geographische System der Klimate. In: Köppen W, Geiger R. *Handbuch der Klimatologie*, Berlin: Gebrüder Borntraeger; 1936. 44p.
6. Raij BV, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico; 1996. 285p.
7. Gamma Design Software. *Geostatistics for the environmental sciences*. Version 5.1.1. Michigan, 2001. CD Rom.
8. Vieira SR, Hatfield JL, Nielsen DR, Biggar JW. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*. 1983;51:1-75. Disponível em: <https://doi.org/10.3733/hilg.v51n03p075>

9. Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1994;58(5):1501-1511. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
10. Chow VT, Maidment DR, Mays LW. *Hidrologia aplicada*. Santafé de Bogotá: McGrawHill; 1994. 584p.
11. Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1948;193(1032):120-145. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
12. FUNCEME - Fundação Cearense de meteorologia e Recursos Hídricos. 2013. Disponível em: <<http://www.funceme.br>> Acesso em 01/02/2014.
13. Dantas Neto JD, Silva FAZ, Furtado DA, Matos JA. Influência da precipitação e idade da planta na produção e composição química do capim-buffel. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2000;35(9): 1867-1874. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000900020>
14. Araújo Filho JA, Gadelha JA, Crispim SMA, Silva NL. Pastoreiro misto em Caatinga manipulada no sertão cearense. *Revista Científica de Produção Animal*. 2002;4(1-2):9-21. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/rcpa/article/view/42662>
15. Barbieri RS Unda SAB, Carrillo JEC, González AP, Montarani R. Spatial distribution of soil attributes in the region of El Oro, Ecuador. *Colloquium Agrariae*. 2020;16(4): 46-60. Disponível em: <https://doi.org/10.5747/ca.2020.v16.n4.a382>
16. Andrade ARS, Guerrini IA, Garcia CJB, Kates I, Guerra HOC. Spatial variability of the soil density in the irrigation management. *Ciência e Agrotecnologia*. 2005;29(2):322-329, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000200008>
17. Dalchiavon FC, Rodrigues AR, Lima ES, Lovera LH, Montanari R. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. *Revista de Ciências Agroveterinárias*. 2017;16(2):144-154. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811711622017144>
18. Dalchiavon FC, Carvalho MP, Andreotti M, Montanari R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um latossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto. *Revista Ciência Agronômica*. 2012;43(3):453-461. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000300006>
19. Souza FLS, Nunes FES, Lima Junior ER, Silva RTN, Fontenele RM, Andrade AGM. Relação dos reservatórios e capacidade de suporte em área irrigável numa fazenda em Quixeramobim-CE. In: Aguilera JG, Zuffo AM. *Ensaio nas ciências agrárias e ambientais*. Ponta Grossa: Atena editora; 2019. p. 152-157. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/relacao-dos-reservatorios-e-capacidade-de-suporte-em-area-irrigavel-numa-fazenda-em-quixeramobim-ce>
20. Andrade AGM, Fontenele RM, Nunes FES, Lima Junior ER, Silva RTN, Souza FLS. Relação dos reservatórios utilizando garantias de uso de água para irrigação numa fazenda em Quixeramobim-CE. In: Aguilera JG, Zuffo AM. *Ciências agrárias: campo promissor em pesquisa*. Ponta Grossa: Atena editora; 2019. p. 152-157. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/post/relacao-dos-reservatorios-utilizando-garantias-de-uso-de-agua-para-irrigacao-numa-fazenda-em-quixeramobim-ce>
21. Bernardino FS, Tonucci RG, Garcia R, Neves JCL, Rocha GC. Forage yield and performance of beef steers in a silvopastoral system: effects of forage offers and nitrogen fertilization. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2011;40(7):1412-1419. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011000700003>
22. Silva RG, Lopes MN, Araujo JC, Neiva JNM, Candido MJD. Orçamentação forrageira de longo prazo no semiárido. *Revista Científica de Produção Animal*. 2013;15(2):98-110. Disponível em: <https://10.15528/2176-4158/rcpa.v15n2p98-110>