

## Relação espaço-temporal de *Meloidogyne* e *Pratylenchus* com atributos biométricos, nutricionais e enzimáticos da cana-de-açúcar

Space-time relationship of *Meloidogyne* and *Pratylenchus* with biometric, nutritional and enzymatic attributes of sugarcane

Relación espacio-tiempo de *Meloidogyne* y *Pratylenchus* con atributos biométricos, nutricionales y enzimáticos de la caña de azúcar

Recebido: 13/01/2023 | Revisado: 20/01/2023 | Aceitado: 21/01/2023 | Publicado: 26/01/2023

**Luana Maria Alves da Silva**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4382-3747>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: [luanaalves.agro@gmail.com](mailto:luanaalves.agro@gmail.com)

**Elvira Maria Regis Pedrosa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0755-8352>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: [elvira.pedrosa@ufrpe.br](mailto:elvira.pedrosa@ufrpe.br)

**Thais Fernanda da Silva Vicente**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9150-9739>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: [vicente.thais@yahoo.com.br](mailto:vicente.thais@yahoo.com.br)

**Diego Arruda Huggins de Sá Leitão**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0961-870X>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: [didiarruda@hotmail.com](mailto:didiarruda@hotmail.com)

**Rezanio Martins Carvalho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2749-2685>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: [rezanioagronomia@hotmail.com](mailto:rezanioagronomia@hotmail.com)

**Ananda Rosa Beserra Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7139-0657>

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil

E-mail: [anandarbsantos@gmail.com](mailto:anandarbsantos@gmail.com)

**Marcelo Simeão**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9757-8954>

Universidade Federal do Piauí, Brasil

E-mail: [marcelosimeao1616@gmail.com](mailto:marcelosimeao1616@gmail.com)

### Resumo

Dois experimentos foram realizados no Município de Camutanga, Pernambuco, objetivando avaliar relações entre a distribuição espaço-temporal dos nematoides endoparasitas *Meloidogyne* e *Pratylenchus* e atributos biométricos, nutricionais e enzimáticos da cana-de-açúcar (cana-planta e cana-soca). As avaliações, realizadas aos 6, 9 e 12 meses após o plantio da cana (Área 1) e corte para renovação da soca (Área 2), fundamentaram-se na densidade populacional dos endoparasitas na raiz, altura, diâmetro e número de colmos da cana, teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio na folha e atividade das enzimas ascorbato peroxidase e superóxido dismutase. Os dados foram submetidos à análise descritiva e geoestatística, gerando mapas de isolinhas por meio de semivariogramas teóricos ajustados às semivariâncias dos dados. Os modelos esférico e exponencial foram ajustados à maioria das variáveis avaliadas. Na área 1, os padrões de distribuição espaço-temporal de *Meloidogyne* e *Pratylenchus* diferiram ao longo do tempo, tornando-se, no geral, mais homogêneos. O desenvolvimento da cana-soca na área 2 foi prejudicado por regiões de alta densidade populacional de *Pratylenchus*, as quais coincidiram com regiões de baixos teores de potássio e magnésio.

**Palavras-chave:** Fitonematoides; Enzima oxidativa; Nutrição mineral; Geoestatística; *Saccharum*.

### Abstract

Two field experiments were carried out in the city of Camutanga, Pernambuco, Brazil, to evaluate relationships between the plant-parasitic nematodes *Meloidogyne* and *Pratylenchus* and plant biometric, nutritional and antioxidant enzymes attributes of sugarcane (plant cane and ratoon). Evaluations, carried out at 6, 9, and 12 months after planting (Area 1) or ratoon cutting (Area 2), based on the endoparasites population level in root, stalk height, stalk diameter,

number of stalks and tillers, superoxide dismutase and ascorbate peroxidase activity. Data were submitted to descriptive and geostatistical analysis, generating isolines maps by means of theoretical semivariograms adjusted to the data semivariance. The spherical and exponential models were adjusted for most variables evaluated. In Area 1, the spatial-temporal distribution patterns of *Meloidogyne* and *Pratylenchus* differed over time, running to a more homogeneous trend along the time. The ratoon development in Area 2 was affected by sites of high population density of *Pratylenchus*, matching with the lower potassium and magnesium levels.

**Keywords:** Plant-parasitic nematode; Antioxidant enzyme; Mineral nutrition; Geostatistics; *Saccharum*.

### Resumen

Se realizaron dos experimentos en el municipio de Camutanga, Pernambuco, con el objetivo de evaluar las relaciones entre la distribución espacio-temporal de los nematodos endoparásitos *Meloidogyne* y *Pratylenchus* y los atributos biométricos, nutricionales y enzimáticos de la caña de azúcar (caña planta y caña de retoño). Las evaluaciones, realizadas a los 6, 9 y 12 meses después de la siembra de la caña de azúcar (Área 1) y corte para renovar el retoño (Área 2), se basaron en la densidad de población de endoparásitos en la raíz, altura, diámetro y número de tallos de la caña, niveles de fósforo, potasio, calcio y magnesio en la hoja y actividad de las enzimas ascorbato peroxidasa y superóxido dismutasa. Los datos fueron sometidos a análisis descriptivo y geoestadístico, generando mapas de isolíneas a través de semivariogramas teóricos ajustados a las semivarianzas de los datos. Los modelos esférico y exponencial se ajustaron a la mayoría de las variables evaluadas. En el área 1, los patrones de distribución espaciotemporal de *Meloidogyne* y *Pratylenchus* difirieron a lo largo del tiempo, volviéndose, en general, más homogéneos. El desarrollo de la caña de retoño en el área 2 se vio obstaculizado por regiones de alta densidad de población de *Pratylenchus*, que coincidieron con regiones de bajos niveles de potasio y magnesio.

**Palabras clave:** Fitonematodos; Enzima oxidativa; Nutrición mineral; Geoestadística; *Saccharum*.

## 1. Introdução

A produção de cana-de-açúcar (*Saccharum L.*) desempenha um papel econômico e social de grande importância para o Brasil (Bordonal et al., 2018), com destaque na produção de açúcar e etanol (Defante et al., 2020). Acrescenta-se, a alta relevância dessa gramínea no comércio global de produtos agrícolas e o aumento de sua demanda com o consumo global de sacarose ao longo de várias décadas. Diante dessa tendência nos mercados mundiais, a cana-de-açúcar precisa continuar a melhorar o rendimento, reduzindo os custos de produção e o impacto ambiental (Cherubin et al., 2021).

Embora o Brasil se destaque como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo colhido cerca de 642 milhões de toneladas com uma produtividade média de 59 toneladas/ha em 2022 (CONAB, 2022), os canaviais nordestinos apresentam baixa produtividade agrícola, a exemplo do Estado de Pernambuco que ficou abaixo da média nacional, com 72 toneladas/ha (CONAB, 2022). Esse panorama é consequência do acúmulo de problemas técnicos de campo, especialmente as fitonematoses, que se destacam por ocasionarem perdas significativas e pelas limitações das técnicas de controle em reduzir, de forma eficiente, as populações em áreas infestadas (Dinardo-Miranda et al., 2019).

A despeito de vários gêneros de nematoides se mostrarem patogênicos à cana-de-açúcar, *Meloidogyne* e *Pratylenchus* são os responsáveis pela maior parte das perdas na cultura. Essas perdas ocorrem em consequência de mudanças morfológicas e fisiológicas no sistema radicular, prejudicando a absorção e o transporte de água e de nutrientes (Martinha, 2022).

No solo, os nematoides endoparasitas são atraídos até a planta hospedeira por um gradiente de concentração formado por exsudados radiculares, proporcionando um sinal de reconhecimento (Ulrike; Costa, 2021). No entanto, estudos relacionados com a influência da nutrição mineral sobre as fitonematoses da cana-de-açúcar são escassos, requerendo elucidação sobre o papel de nutrientes chaves e sobre as formas pelas quais os nutrientes podem reduzir a infecção, contribuindo para o adequado manejo populacional (Santana-Gomes et al., 2013).

Estresses bióticos (parasitismo de micro-organismos) e abióticos (flutuações de temperatura, umidade e radiação solar) sofridos pelas plantas durante o ciclo de vida estimulam diferentes respostas (Dvořák et al., 2021) e mecanismos de defesa (enzimáticos e não enzimáticos) (Jovanovic et al., 2018). Compreender esses mecanismos é relevante para o desenvolvimento de variedades resistentes (Kaur et al., 2022) e essencial para um manejo mais eficiente e duradouro. Contudo, no campo, esses estresses não ocorrem de forma isolada. Ao contrário, ocorrem associados a vários fatores e em diferentes

intensidades, aumentando a complexidade do problema.

A correta identificação das espécies de nematoides presentes e a determinação dos níveis populacionais são fundamentais para que se defina o manejo adequado. Entretanto, outros fatores, a exemplo do estado nutricional da cultura, constituem elementos importantes para o sucesso efetivo do manejo. Além do mais, os nematoides se distribuem no campo de forma agregada (Barker, 1985) e a geoestatística é a ferramenta mais adequada para dados com esse tipo de distribuição (Župunski et al., 2017). Os mapas de isolinhas criados após a krigagem dos dados auxiliam no controle de nematoides e na melhoria da qualidade do solo, pois torna mais fácil a identificação de regiões problemáticas para o desenvolvimento da cultura (Silva et al., 2008).

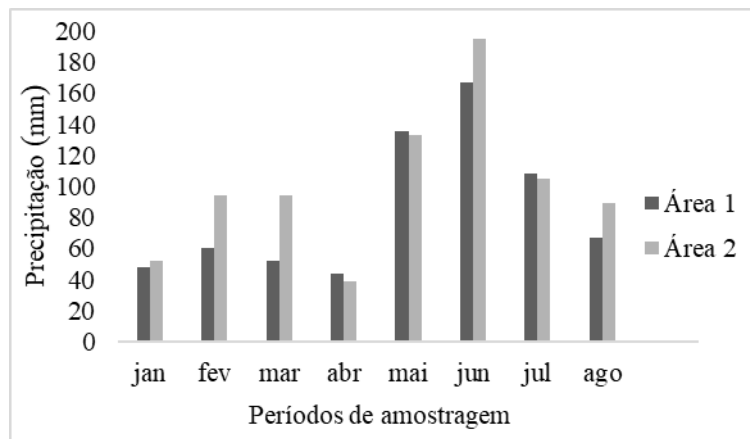
Diante do exposto, objetivou-se avaliar as relações entre a distribuição espaço-temporal dos nematoides endoparasitas *Meloidogyne* e *Pratylenchus* e atributos biométricos, nutricionais e enzimáticos da cana-de-açúcar (cana-planta e cana-soca).

## 2. Metodologia

### 2.1 Área de Estudo

O estudo foi conduzido em duas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, em manejo de sequeiro, situadas no Município de Camutanga, Pernambuco, Brasil. A área 1 (A1) (25°71'00"S, 91°85'24"W) era cultivada com cana-planta, variedade RB86-7515, e a área 2 (A2) (26°70'54"S, 91°95'12"W), com cana-soca, variedade RB 86-3129. A seleção das áreas fundamentou-se no histórico de nematoides fornecido pelas unidades produtoras. A região é caracterizada por clima tropical com chuvas de inverno e verão seco, tipo As, segundo Köppen, com temperatura média anual de 25,2 °C e precipitação média de 1.211 mm (Alvares et al., 2013). A precipitação no período de amostragem é representada na Figura 1.

**Figura 1** - Distribuição das chuvas nas áreas de cultivo de cana-planta e de cana-soca durante o período experimental.



Fonte: Autores (2023).

Os solos das áreas de estudo foram classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo, com composição granulométrica média de 21% de argila, 11% de silte e 68% de areia (A1), e Argissolo Amarelo distrófico com composição granulométrica média de 16% de argila, 1% de silte e 83% de areia (A2). O histórico de adubação das áreas é baseado em aplicações de fertilizantes amoniacais.

Inicialmente, realizou-se o georreferenciamento das áreas a partir da demarcação do seu perímetro, utilizando-se aparelho de GPS de navegação portátil. Posteriormente, uma malha amostral foi gerada e sobreposta em cada área, com dimensões 6 × 6 m, totalizando 36 pontos, distantes entre si de 10 m. As amostras foram coletadas aos 6, 9 e 12 meses após o plantio da cana (A1) e corte para renovação da soca (A2).

## **2.2 Análise nematológica**

Foram retiradas amostras de raiz, nas malhas amostrais, para as análises nematológicas. Após a coleta, as amostras de raiz foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente etiquetados e encaminhadas ao Laboratório de Fitonematologia, Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco. Os fitonematoides foram extraídos por trituração rápida em liquidificador, seguido pelo método de flotação centrífuga em solução de sacarose de acordo com (Hussey and Barker, 1973). A identificação dos gêneros foi efetuada segundo a chave de Mai et al., (1996).

## **2.3 Análise biométrica**

Para a análise dos padrões de crescimento da cana-de-açúcar, medições de variáveis biométricas foram realizadas durante as três amostragens, nas quais foram mensurados altura do colmo, diâmetro dos colmos no 3º nó, número de colmos e perfilhos. A altura do colmo foi medida com auxílio de uma fita métrica a partir do solo até o colarinho da folha<sup>+1</sup> e o diâmetro do colmo dimensionado utilizando um paquímetro no terço médio da planta.

## **2.4 Análise nutricional da planta**

A diagnose foliar foi efetuada por amostragens da folha<sup>+3</sup> (Malavolta, 1992), contada de cima para baixo, sendo cada amostra constituída de 3 folhas, coletadas aleatoriamente em cada ponto amostrado. As amostras foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, moídas em moinho tipo Wiley, e o teor de nutrientes extraído por digestão nitroperclórica. O potássio foi determinado por fotometria de chama, o cálcio e o magnésio, por espectrofotometria de absorção atômica, e o fósforo foi quantificado por espectrofotometria (Silva, 2009).

## **2.5 Análise enzimática da folha**

Foram coletados, aos seis e aos nove meses, folhas de cana-de-açúcar para a análise da atividade enzimática. Para isto, utilizou-se a 3ª folha (de cima para baixo) de cada planta que, em seguida, foi envolvida em papel alumínio, mergulhada em nitrogênio líquido e transferida para freezer a -26 °C, até o momento das análises enzimáticas.

O extrato das amostras foi preparado para as análises, pela homogeneização de 0,1 g de matéria fresca em 4 mL do tampão fosfato de sódio 0,1 M (pH 6,5) adicionado de 0,05 g de polivinilpirrolidona (PVP). O homogenato foi centrifugado a 10.000 x g a 4 °C por 10 minutos (Zeraik et al., 2008) e coletado o sobrenadante. Com este, foram determinadas as atividades das enzimas ascorbato peroxidase (APX) e superóxido dismutase (SOD) (Giannopolitis; Ries, 1977).

A atividade da ascorbato peroxidase foi determinada pela adição de 0,1 mL do extrato ao meio de reação, constituído por 2,7 mL de tampão fosfato de potássio a 50 mM, pH 6,0, e 75 µL de ácido ascórbico 0,8 mM. O consumo de ascorbato foi detectado pelo decréscimo da absorbância a 290 nm (Nakano; Asada, 1981).

A atividade da superóxido dismutase foi determinada de acordo com o método de Giannopolitis e Ries (1977), tendo como base a capacidade da enzima em inibir a redução do NBT (nitroblue tetrazolium) por radicais superóxido. Alíquotas de 100 µM do extrato foram transferidas para tubos de ensaio contendo meio de reação composto por tampão fosfato de potássio 50 mM (pH 7,8), EDTA 0,1 mM, metionina 13 mM e NBT 75 µM. A reação foi iniciada pela adição de riboflavina 2 µM, seguido da iluminação do meio de reação com lâmpadas fluorescentes de 30 W em caixa fechada. Após 5 min, a reação foi interrompida pelo desligamento das luzes e as leituras foram realizadas em espectrofotômetro no comprimento de onda de 560 nm.

## **2.6 Geoestatística**

A análise descritiva (média, mediana, desvio padrão, coeficientes de variação, assimetria e curtose) foi realizada para

descrever o comportamento das variáveis durante os três períodos de amostragem. Também foi realizada a análise de distribuição espacial das variáveis. Para efetuar esta análise, os dados relativos à nematofauna e à atividade enzimática foram transformados para  $\log(x+1)$ . O coeficiente de variação foi classificado de acordo com Warrick e Nielsen (1980) em baixo ( $CV \leq 12\%$ ), médio ( $12 < CV \leq 60\%$ ) e alto ( $CV > 60\%$ ).

Os dados foram avaliados quanto à distribuição normal por meio do teste de aderência à normalidade de Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância. A análise geoestatística foi realizada com os dados obtidos nas diferentes épocas de amostragem, utilizando o programa GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software) (Englund; Sparks, 1991). A análise da dependência espacial foi realizada por meio do ajuste do semivariograma clássico construído a partir da estimativa dos semivariâncias (Equação 1) (Journel; Huijbregts, 1978).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad \text{Eq. 1}$$

onde:

$\hat{\gamma}(h)$  - é o valor da semivariância estimada a partir dos dados experimentais;

$Z(x_i + h)$  e  $Z(x_i)$  - São valores observados referentes às variáveis regionalizadas;

$N(h)$  - Número de pares dos valores, separados pela distância  $h$ .

Verificada a existência de tendência dos dados, uma superfície residual foi construída pela diferença entre uma superfície polinomial ajustada e os dados originais. Os resíduos passam a ser a variável regionalizada que possui, localmente, médias iguais a zero (Landim, 2006), sendo, assim, ajustados semivariogramas experimentais aos resíduos.

Depois de gerados os semivariogramas experimentais, procedeu-se o ajuste dos dados a um modelo teórico, testando-se os mais comuns: esférico, exponencial e gaussiano, cujas fórmulas (Equações 2a e 2b, 3 e 4) encontram-se abaixo:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1.5 * \frac{h}{A} - 0.5 \left( \frac{h}{A} \right)^3 \right] \text{ para } h < A \quad (2a)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \quad h \geq A \quad (2b)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{h}{A}\right) \right] \quad (3)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{A}\right)^2\right) \right] \quad (4)$$

O grau de dependência espacial foi determinado de acordo com Cambardella et al. (1994), observando a proporção dos efeitos pepita ( $C_0$ ) em relação ao patamar ( $C_0+C_1$ ), considerando grau de dependência forte ( $GDE < 25\%$ ), moderado ( $25 > GDE \leq 75\%$ ) e fraco ( $GDE > 75\%$ ).

Os modelos ajustados foram submetidos à validação cruzada, utilizando-se o teste de *Jack-Knifing* (Vauclin et al., 1983), observando os valores das médias próximas a zero e do desvio padrão próximo à unidade. Para a validação dos modelos, também foi observado o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os mapas de contorno, que representam a distribuição espacial das variáveis, foram elaborados com o auxílio do programa Surfer Software (Golden Software, 1995), com base nos valores estimados por krigagem, realizada com o programa GEO-EAS. Nos mapas, linhas próximas indicam regiões com maior variabilidade (heterogeneidade), enquanto linhas mais distantes representam menor variabilidade, ou seja, maior homogeneidade de certos atributos (Oliveira, 2014).

### 3. Resultados

#### 3.1 Estatística descritiva

Os resumos estatísticos descritivos para nematoides da raiz, variáveis de crescimento, enzimas e nutrição da cana-planta e cana-soca encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1** - Estatística descritiva dos nematoides em raiz, variáveis de crescimento, nutrição e enzimas em cana-planta e em cana-soca em diferentes épocas de amostragem.

| Var    | Máx    | Mín    | Média  | Mediana | Curt  | Assimetria | CV(%)  | DP    | KS |
|--------|--------|--------|--------|---------|-------|------------|--------|-------|----|
| Área 1 |        |        |        |         |       |            |        |       |    |
| T6     |        |        |        |         |       |            |        |       |    |
| Alt    | 50,00  | 17,00  | 33,12  | 34,50   | -0,51 | -0,20      | 24,26  | 8,04  | *  |
| Diam   | 3,63   | 2,20   | 2,57   | 2,53    | 12,21 | 2,67       | 9,00   | 0,23  | *  |
| Col    | 7,67   | 4,00   | 5,85   | 6,00    | -0,63 | -0,10      | 16,70  | 0,98  | *  |
| Perf   | 7,33   | 1,67   | 3,69   | 3,67    | 1,70  | 0,91       | 31,55  | 1,16  | ns |
| Melo   | 2,60   | 0,00   | 1,68   | 1,91    | 1,38  | -1,54      | 44,27  | 0,74  | ns |
| Praty  | 2,15   | 0,00   | 1,10   | 1,49    | -1,68 | -0,42      | 78,55  | 0,86  | ns |
| Ca     | 0,34   | 0,01   | 0,14   | 0,13    | 0,83  | 0,93       | 55,88  | 0,08  | *  |
| Mg     | 19,75  | 1,07   | 2,83   | 2,34    | 34,48 | 5,81       | 103,68 | 2,93  | *  |
| K      | 7,81   | 5,09   | 6,54   | 6,52    | 0,86  | -0,33      | 8,59   | 0,56  | *  |
| P      | 5,71   | 1,09   | 2,82   | 2,48    | 0,22  | 0,89       | 41,99  | 1,18  | *  |
| APX    | 4,35   | 3,04   | 3,89   | 3,93    | 2,23  | -1,43      | 7,09   | 0,28  | *  |
| SOD    | 2,89   | 1,74   | 2,35   | 2,41    | 1,04  | -1,01      | 9,58   | 0,23  | ns |
| T9     |        |        |        |         |       |            |        |       |    |
| Alt    | 94,33  | 43,33  | 61,99  | 63,17   | 0,98  | 0,70       | 18,07  | 11,20 | *  |
| Diam   | 2,87   | 2,13   | 2,54   | 2,55    | -0,23 | -0,44      | 7,13   | 0,18  | *  |
| Col    | 13,67  | 8,00   | 11,32  | 11,33   | -0,02 | -0,23      | 11,42  | 1,29  | *  |
| Perf   | 1,67   | 0,00   | 0,64   | 0,67    | -0,35 | 0,49       | 73,12  | 0,47  | ns |
| Melo   | 2,34   | 0,00   | 1,47   | 1,65    | 0,80  | -1,29      | 46,03  | 0,68  | ns |
| Praty  | 0,46   | 0,00   | 0,04   | 0,00    | 8,42  | 3,15       | 336,51 | 0,12  | ns |
| Ca     | 0,57   | 0,00   | 0,17   | 0,09    | 0,27  | 1,31       | 113,92 | 0,19  | *  |
| Mg     | 2,23   | 1,05   | 1,43   | 1,41    | 2,44  | 1,24       | 17,13  | 0,24  | *  |
| K      | 9,76   | 1,64   | 7,96   | 8,07    | 15,60 | -3,32      | 16,44  | 1,31  | ns |
| P      | 7,31   | 0,69   | 2,81   | 2,14    | 0,90  | 1,21       | 61,44  | 1,73  | ns |
| APX    | 4,34   | 3,56   | 3,90   | 3,89    | 0,05  | -0,19      | 4,20   | 0,16  | *  |
| SOD    | 2,60   | 0,93   | 2,10   | 2,04    | 0,68  | -0,59      | 16,97  | 0,36  | ns |
| T12    |        |        |        |         |       |            |        |       |    |
| Alt    | 197,67 | 106,33 | 164,13 | 163,50  | 2,80  | -1,28      | 11,63  | 19,09 | *  |
| Diam   | 22,33  | 2,10   | 3,07   | 2,53    | 35,73 | 5,97       | 107,63 | 3,31  | *  |
| Col    | 22,33  | 12,33  | 17,94  | 18,00   | 0,79  | -0,69      | 11,93  | 2,14  | *  |
| Perf   | 9,67   | 2,33   | 5,53   | 5,17    | 0,14  | 0,69       | 32,60  | 1,80  | ns |
| Melo   | 3,40   | 0,00   | 1,97   | 2,01    | 1,45  | -1,07      | 42,95  | 0,85  | *  |
| Praty  | 3,88   | 0,00   | 2,08   | 2,21    | 1,69  | -1,05      | 42,81  | 0,89  | ns |
| Ca     | 0,46   | 0,17   | 0,30   | 0,28    | -0,47 | 0,27       | 22,47  | 0,07  | *  |

|        |        |       |       |        |       |       |        |       |    |
|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|----|
| Mg     | 9,43   | 0,79  | 2,22  | 1,56   | 9,28  | 2,71  | 75,42  | 1,68  | *  |
| K      | 12,17  | 6,53  | 9,27  | 9,29   | -0,07 | 0,16  | 13,05  | 1,21  | *  |
| P      | 4,55   | 0,10  | 1,65  | 1,35   | -0,40 | 0,66  | 71,30  | 1,18  | *  |
| Área 2 |        |       |       |        |       |       |        |       |    |
| T6     |        |       |       |        |       |       |        |       |    |
| Alt    | 134,00 | 68,67 | 99,07 | 98,67  | -0,57 | 0,15  | 17,87  | 17,70 | *  |
| Diam   | 2,67   | 1,93  | 2,27  | 2,30   | -0,58 | -0,07 | 7,97   | 0,18  | ns |
| Col    | 12,33  | 5,67  | 9,38  | 9,67   | -0,19 | -0,55 | 16,69  | 1,57  | *  |
| Perf   | 7,33   | 1,00  | 2,62  | 2,33   | 10,39 | 2,64  | 40,81  | 1,07  | *  |
| Melo   | 2,70   | 0,00  | 1,48  | 1,78   | -0,91 | -0,79 | 62,52  | 0,93  | ns |
| Praty  | 2,16   | 0,00  | 1,13  | 1,50   | -1,56 | -0,53 | 74,24  | 0,84  | ns |
| Ca     | 0,89   | 0,26  | 0,59  | 0,61   | 0,11  | -0,22 | 25,00  | 0,15  | *  |
| Mg     | 2,53   | 0,19  | 1,16  | 1,13   | 1,81  | 0,60  | 40,47  | 0,47  | *  |
| K      | 4,18   | 2,60  | 3,34  | 3,31   | 0,84  | 0,40  | 10,12  | 0,34  | *  |
| P      | 7,67   | 1,29  | 4,06  | 4,38   | -0,13 | -0,09 | 36,12  | 1,47  | ns |
| APX    | 4,25   | 3,35  | 3,91  | 3,88   | 0,03  | -0,29 | 5,13   | 0,20  | ns |
| SOD    | 2,60   | 1,77  | 2,45  | 2,54   | 4,35  | -2,13 | 8,24   | 0,20  | ns |
| T9     |        |       |       |        |       |       |        |       |    |
| Alt    | 118,00 | 48,67 | 78,58 | 76,33  | -0,54 | 0,22  | 22,02  | 17,31 | *  |
| Diam   | 2,77   | 2,03  | 2,40  | 2,35   | -0,88 | 0,11  | 8,24   | 0,20  | *  |
| Col    | 14,33  | 7,33  | 11,72 | 11,67  | 0,16  | -0,42 | 13,84  | 1,62  | *  |
| Perf   | 3,00   | 0,67  | 1,40  | 1,33   | 0,18  | 0,76  | 41,42  | 0,58  | ns |
| Melo   | 2,21   | 0,00  | 1,46  | 1,72   | 0,65  | -1,41 | 48,31  | 0,71  | ns |
| Praty  | 2,06   | 0,00  | 1,14  | 1,27   | -0,50 | -0,83 | 58,58  | 0,67  | ns |
| Ca     | 0,98   | 0,26  | 0,48  | 0,48   | 2,66  | 1,16  | 30,34  | 0,15  | ns |
| Mg     | 7,18   | 0,39  | 1,17  | 1,04   | 31,01 | 5,38  | 91,33  | 1,07  | *  |
| K      | 4,49   | 2,26  | 3,78  | 3,93   | 2,42  | -1,40 | 13,04  | 0,49  | *  |
| P      | 36,42  | 1,67  | 4,35  | 3,42   | 31,69 | 5,48  | 130,13 | 5,66  | ns |
| APX    | 4,28   | 3,78  | 4,06  | 4,07   | -1,17 | -0,17 | 3,57   | 0,14  | *  |
| SOD    | 2,61   | 1,73  | 2,33  | 2,49   | -0,62 | -0,92 | 11,56  | 0,27  | ns |
| T12    |        |       |       |        |       |       |        |       |    |
| Alt    | 132,00 | 69,67 | 99,75 | 102,33 | -0,91 | -0,12 | 127,65 | 16,66 | ns |
| Diam   | 2,92   | 1,70  | 2,15  | 2,13   | 2,26  | 0,74  | 92,98  | 0,23  | *  |
| Col    | 18,00  | 12,67 | 15,90 | 16,00  | -0,35 | -0,53 | 113,22 | 1,33  | *  |
| Perf   | 5,33   | 0,67  | 2,31  | 2,17   | 0,20  | 0,62  | 231,33 | 1,07  | ns |
| Melo   | 3,00   | 0,00  | 1,66  | 1,77   | 1,04  | -0,73 | 181,13 | 0,70  | ns |
| Praty  | 2,15   | 0,00  | 0,69  | 0,00   | -1,68 | 0,40  | 191,17 | 0,80  | ns |
| Ca     | 0,72   | 0,25  | 0,45  | 0,43   | 0,29  | 0,47  | 119,37 | 0,11  | ns |
| Mg     | 1,56   | 0,31  | 0,84  | 0,86   | 0,79  | 0,22  | 119,38 | 0,25  | ns |
| K      | 4,79   | 3,49  | 4,08  | 4,05   | -0,79 | 0,30  | 112,12 | 0,33  | *  |
| P      | 8,68   | 1,97  | 4,82  | 4,89   | 0,07  | 0,12  | 86,46  | 1,60  | *  |

Var: Variáveis; Alt: Altura; Diam: Diâmetro; Col: Colmo; Perf: Perfilho; Melo: Meloidogyne sp.; Praty: Pratylenchus sp.; Apx: Ascorbato peroxidase; Sod: Superóxido dismutase; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; P: Fósforo; Max: máximo; Min: mínimo; Curt: curtose; CV: Coeficiente de Variação; DP: Desvio Padrão; KS: Teste de aderência à normalidade de Kolmogorov-Smirnov com significância a 1%. Os dados de Melo, Praty, Apx e Sod foram transformados em log (x+1.); A1: Área de Livramento (cana-planta); A2: Área de Jatiúca (cana-soca); T6 - aos seis meses, T9 - aos nove meses, T12 - aos doze meses. Fonte: Autores (2023).

Na A1, aos seis, nove e 12 meses, as variáveis de crescimento apresentaram distribuição normal de acordo com o Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), exceto o número de perfilhos. Com relação às variáveis nematológicas, apenas *Meloidogyne*, aos 12 meses, apresentou distribuição normal. Para variáveis nutricionais da planta, a maior parte das variáveis apresentaram distribuição normal, com exceção de potássio e fósforo aos nove meses. Para as variáveis enzimáticas, o teste KS foi significativo para APX nos dois tempos de coletas (T9 e T12), entretanto, SOD não apresentou distribuição normal em nenhuma das épocas (Tabela 1).

Na A2, dentre as variáveis de crescimento, apenas o diâmetro não apresentou distribuição normal aos seis meses; aos nove meses, apenas a variável número de perfilhos não apresentou distribuição normal, enquanto que, aos 12 meses, as variáveis altura e número de perfilhos não apresentaram distribuição normal. Considerando as variáveis nematológicas, na A2, nenhum fitonematoide apresentou distribuição normal nos períodos de coleta das amostras (Tabela 1).

O coeficiente de variação (CV) indica o grau de homogeneidade ou heterogeneidade de determinada variável na área de estudo. Fundamentado nos limites de CV propostos por Warrick e Nielsen (1980), a variabilidade das variáveis estudadas oscilou de baixa (< 12%) a alta (> 60%), sendo o menor valor atribuído à enzima APX (CV = 3,57%), na A2, aos nove meses, e o maior valor, a *Pratylenchus* (336,51%), aos nove meses, na A1 (Tabela 1).

Para as variáveis nutricionais da cana-de-açúcar, na A1, com exceção de Mg (T6 e T12), Ca (T9) e P (T9 e T12), as variáveis exibiram variabilidade média e baixa. Na A2, a maioria das variáveis também apresentaram variação de baixa a média, exceto as variáveis nutricionais, aos 12 meses, que se mostraram com alta variabilidade (Tabela 1). As variáveis de crescimento apresentaram variabilidade média a baixa, em ambas as áreas, com exceção do diâmetro na A1, no T6. O mesmo ocorreu com as enzimas, que exibiram baixa ou média variabilidade, nas duas áreas amostradas (Tabela 1).

### 3.2 Estrutura espacial das variáveis nematológicas e de crescimento, de nutrição e de enzimas da cana-de-açúcar

Os resultados da análise geoestatística para os fitonematoides, variáveis de crescimento, enzimas e nutrição da planta em cana-planta e em cana-soca encontram-se na Tabela 2. Na A1, *Pratylenchus* apresentou distribuição aleatória (efeito pepita puro) aos seis meses, o que também foi observado com *Meloidogyne* aos seis e aos 12 meses. Na A2, com *Pratylenchus* também não apresentou dependência espacial, aos nove meses. Nas demais épocas, nas duas áreas estudadas, a distribuição espacial dos dois gêneros de nematoides foi ajustada ao modelo exponencial.

**Tabela 2** - Parâmetros dos semivariogramas teóricos, grau de dependência espacial (GDE) e validação cruzada (Jack-Knifing) das variáveis de crescimento, nutrição e enzimas em cana-de-açúcar em duas áreas e diferentes tempos amostrais.

| Var    | Modelo             | C <sub>0</sub> | C <sub>1</sub> | a (m)  | R <sup>2</sup> | C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> ) (%) | GDE  | Jack-Knifing |       |  |
|--------|--------------------|----------------|----------------|--------|----------------|---|------|--------------|-------|--|
|        |                    |                |                |        |                |   |      | Média        | DP    |  |
| Área 1 |                    |                |                |        |                |   |      |              |       |  |
| T6     |                    |                |                |        |                |   |      |              |       |  |
| Melo   | Exponencial        | 0,252          | 0,401          | 16,591 | 0,562          | 38,591  | Mod. | 0,021        | 1,071 |  |
| Praty  | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |      |              |       |  |
| Alt    | Esférico           | 42,988         | 21,197         | 17,11  | 0,246          | 66,975  | Mod. | -0,025       | 1,013 |  |
| Diam   | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |      |              |       |  |
| Colm   | Exponencial        | 0,713          | 0,296          | 14,805 | 0,787          | 70,664  | Mod. | 0,029        | 0,893 |  |
| Perf   | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |      |              |       |  |
| P      | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |      |              |       |  |
| Ca     | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |      |              |       |  |
| Mg     | Esférico           | 0,115          | 0,066          | 18     | 0,404          | 63,536  | Mod. | 0,058        | 0,989 |  |



| K      | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
|--------|--------------------|----------------|----------------|--------|----------------|---|-------|--------------|-------|
| APX    | Esférico           | 0,047          | 0,029          | 17,931 | 0,026          | 61,842  | Mod.  | -0,023       | 1,143 |
| SOD    | Esférico           | 0,002          | 0,049          | 11     | 0,028          | 3,922   | Forte | 0,003        | 1,047 |
| T9     |                    |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Melo   | Esférico           | 0,09           | 0,37           | 18     | 0,771          | 19,565  | Forte | 0,003        | 1,025 |
| Praty  | Gaussiano          | 0,004          | 0,012          | 10,158 | 0,601          | 25,000  | Mod.  | 0,041        | 1,044 |
| Alt    | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Diam   | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Colm   | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Perf   | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| P      | Esférico           | 1,827          | 1,249          | 15,95  | 0,85           | 59,395  | Mod.  | 0,001        | 1,12  |
| Ca     | Esférico           | 0,021          | 0,021          | 48,406 | 0,995          | 50,000  | Mod.  | 0,024        | 1,049 |
| Mg     | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| K      | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| APX    | Esférico           | 0,014          | 0,014          | 14,899 | 0,34           | 50,000  | Mod.  | 0,024        | 0,968 |
| SOD    | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| T12    |                    |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Melo   | Exponencial        | 0,485          | 0,279          | 15,707 | 0,836          | 63,482  | Mod.  | 0,018        | 0,92  |
| Praty  | Exponencial        | 0,2            | 0,735          | 30     | 0,711          | 21,390  | Forte | 0,019        | 1,127 |
| Alt    | Esférico           | 213,86         | 172,48         | 15,877 | 0,699          | 55,356  | Mod.  | 0,008        | 1,01  |
| Diam   | Gaussiano          | 0,023          | 0,019          | 12,193 | 0,97           | 54,762  | Mod.  | 0,057        | 0,914 |
| Colm   | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Perf   | Esférico           | 1,756          | 1,672          | 47,744 | 0,95           | 51,225  | Mod.  | 0,068        | 1,148 |
| P      | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Ca     | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Mg     | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| K      | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Área 2 |                    |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Var    | Modelo             | C <sub>0</sub> | C <sub>1</sub> | a (m)  | R <sup>2</sup> | C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> ) (%) | GDE   | Jack-Knifing |       |
|        |                    |                |                |        |                |   |       | Média        | DP    |
| T6     |                    |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Melo   | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Praty  | Exponencial        | 0,17           | 0,4            | 8,265  | 0,784          | 29,825  | Mod.  | -0,016       | 1,082 |
| Alt    | Exponencial        | 136,08         | 174,793        | 12,027 | 0,953          | 43,774  | Mod.  | -0,026       | 0,883 |
| Diam   | Exponencial        | 0,022          | 0,014          | 15,008 | 0,917          | 61,111  | Mod.  | 0,008        | 0,964 |
| Colm   | Gaussiano          | 1,131          | 1,543          | 22,319 | 0,996          | 42,296  | Mod.  | -0,018       | 0,932 |
| Perf   | Esférico           | 0,212          | 0,322          | 12,997 | 0,822          | 39,700  | Mod.  | -0,044       | 1,449 |
| P      | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| Ca     | Esférico           | 0              | 0,024          | 10,5   | 0,662          | 0   | Forte | -0,044       | 0,979 |
| Mg     | Exponencial        | 0,071          | 0,161          | 10,996 | 0,864          | 30,603  | Mod.  | 0,067        | 1,078 |
| K      | Esférico           | 0,041          | 0,081          | 22,908 | 0,74           | 33,607  | Mod.  | 0,024        | 1,193 |
| APX    | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| SOD    | Efeito Pepita Puro |                |                |        |                |   |       |              |       |
| T9     |                    |                |                |        |                |   |       |              |       |

|       |                    |        |         |        |       |        |       |        |       |
|-------|--------------------|--------|---------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| Melo  | Exponencial        | 0,092  | 0,386   | 9,645  | 0,917 | 19,247 | Forte | 0,04   | 1,145 |
| Praty | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| Alt   | Esférico           | 79,668 | 209,356 | 13,918 | 0,955 | 27,564 | Mod.  | -0,045 | 1,004 |
| Diam  | Esférico           | 0,017  | 0,023   | 11,5   | 0,846 | 42,500 | Mod.  | 0,07   | 1,064 |
| Colm  | Exponencial        | 1,793  | 1,13    | 20,309 | 0,958 | 61,341 | Mod.  | 0,001  | 0,92  |
| Perf  | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| P     | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| Ca    | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| Mg    | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| K     | Esférico           | 0,078  | 0,19    | 13,501 | 0,454 | 29,104 | Mod.  | 0,028  | 0,998 |
| APX   | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| SOD   | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| T12   |                    |        |         |        |       |        |       |        |       |
| Melo  | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| Praty | Esférico           | 0,414  | 0,262   | 12,595 | 0,544 | 61,243 | Mod.  | 0,046  | 1,013 |
| Alt   | Exponencial        | 120,94 | 196,785 | 15,605 | 0,965 | 38,059 | Mod.  | -0,003 | 0,994 |
| Diam  | Esférico           | 0,016  | 0,039   | 23,089 | 0,947 | 29,091 | Mod.  | 0,019  | 1,087 |
| Colm  | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| Perf  | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| P     | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| Ca    | Gaussiano          | 0,009  | 0,013   | 25,739 | 0,961 | 40,909 | Mod.  | -0,058 | 1,087 |
| Mg    | Efeito Pepita Puro |        |         |        |       |        |       |        |       |
| K     | Esférico           | 0,031  | 0,088   | 14,107 | 0,898 | 26,050 | Mod.  | -0,008 | 1,009 |

Var: variáveis; Melo: *Meloidogyne* sp.; Praty: *Pratylenchus* sp.; Alt: Altura; Diam: Diâmetro; Col: Colmo; Perf: Perfilho; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; P: Fósforo; APX: Ascorbato peroxidase; SOD: Superóxido dismutase; Co – Efeito pepita; C<sub>1</sub> – Soleira; a – Alcance; R<sup>2</sup> – Coeficiente de determinação; DP – Desvio padrão. Valores orginais de nematoídes e enzimas foram transformados para log(x+1). Fonte: Autores (2023).

Ao longo dos períodos de amostragem, observaram-se mudanças no modelo ajustado às variáveis nematológicas (Tabela 2). Na A1, *Meloidogyne* apresentou modelo exponencial aos seis meses; aos nove, se ajustou ao modelo esférico, e voltou a apresentar dependência espacial ajustada ao modelo exponencial ao final do experimento. Na A2, o mesmo comportamento foi observado para *Pratylenchus*, que iniciou ajustado ao modelo exponencial e, ao fim das coletas, apresentou modelo esférico (Tabela 2).

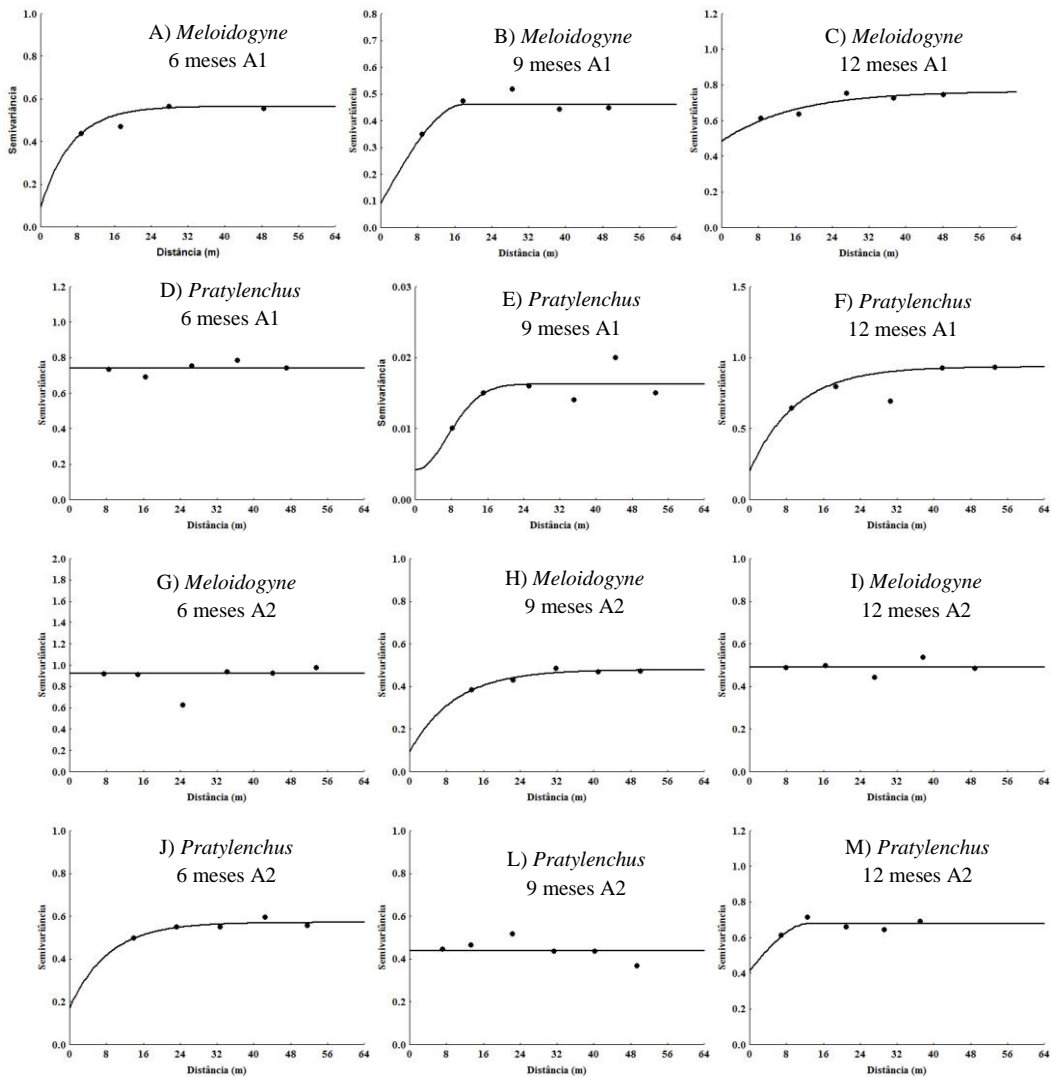
As variáveis de crescimento e de nutrição da cana-de-açúcar, em ambas as áreas, ajustaram-se ao modelo esférico seguido do exponencial. Na A1, ambas as enzimas se ajustaram ao modelo esférico aos seis meses; aos nove meses, apenas a enzima APX se ajustou ao modelo esférico, e a enzima SOD não apresentou dependência espacial aos nove meses. Na A2, em ambos os períodos amostrados, ocorreu padrão de distribuição aleatório (efeito pepita puro) para as enzimas, ou seja, as amostras não mostraram dependência espacial.

### 3.3 Alcance da dependência espacial e semivariogramas

Os semivariogramas teóricos para os fitonematoides, variáveis de crescimento, nutrição e enzimas de cana-planta e cana-soca estão representados nas Figuras 2-7. Em consonância com a Tabela 2, as variáveis que apresentaram dependência espacial foram ajustadas aos modelos esférico, exponencial ou gaussiano. No entanto, algumas variáveis não apresentaram dependência espacial, a exemplo da variável *Pratylenchus* aos seis meses na área 1 (Figura 2D) que mostra efeito pepita puro,

o qual é denotado por uma reta paralela ao eixo das abscissas, com alcance nulo (Shahbazi et al., 2013). Em ambas as áreas (Figuras 2) e em todas as variáveis nematológicas que apresentaram dependência, o grau de dependência espacial foi forte ou moderado, conforme Cambardella et al. (1994).

**Figura 2** - Semivariogramas teóricos para fitonematoides endoparasitas em cana-de-açúcar na Área 1, aos seis, nove e 12 meses após o plantio e na Área 2, aos seis, nove e 12 meses após o corte.



Estes semivariogramas apresentam uma distribuição bidimensional de valores, os quais representam o comportamento do critério em análise na área estudada. Fonte: Autores (2023).

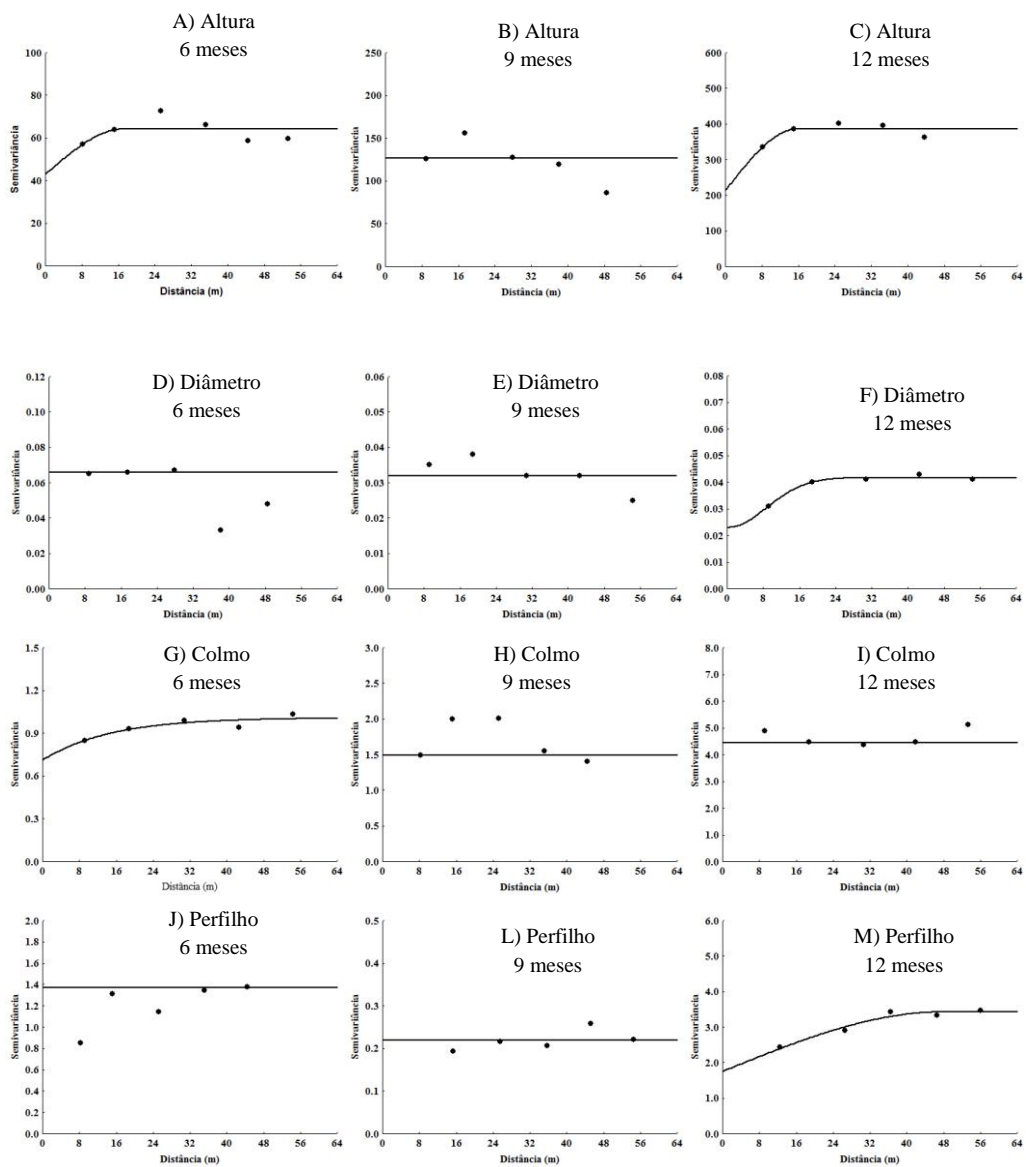
O alcance da dependência espacial demonstra a máxima distância que possibilita identificar o padrão de distribuição espacial de uma dada variável (Lima et al., 2014). Para *Meloidogyne*, na A1, o alcance variou de 15,70m a 18 m, aos 12 e aos nove meses, respectivamente (Figura 2 C, B); na A2, o alcance foi de 9,6 m no T9 (Figura 2-H). Para *Pratylenchus*, na A1, o alcance variou de 10,15 a 30 m, aos nove e aos 12 meses, de modo respectivo (Figura 2 E, F) e, na A2, o alcance variou de 8,2 a 12,59 m, para T6 e T12, respectivamente (Figura 2 J, M).

Para as variáveis de crescimento, o menor e o maior alcance foram encontrados para diâmetro e número de perfilhos, 12,19m (T12) e 47,74 m (T12), respectivamente, na A1 (Figura 3 F, M). Na A2, o menor e o maior alcance foram observados para a variável diâmetro, com alcance variando de 11,50m (T9) a 23,08 m (T12) (Figura 4 E, F), respectivamente. Para as

variáveis nutricionais, os alcances variaram de 15,95 (T9) a 48,40 m (T9) na A1, para fósforo e cálcio, respectivamente (Figura 6 B, E), enquanto, na A2, os menores e maiores alcances foram registrados para o cálcio, que variaram de 10,50 (T6) a 25,73 m (T12) (Figura 7 D, F). O alcance para as enzimas, na A1, variou de 11,00 m (T6) para SOD e 17,93 m (T6) para APX (Figura 5 C, A).

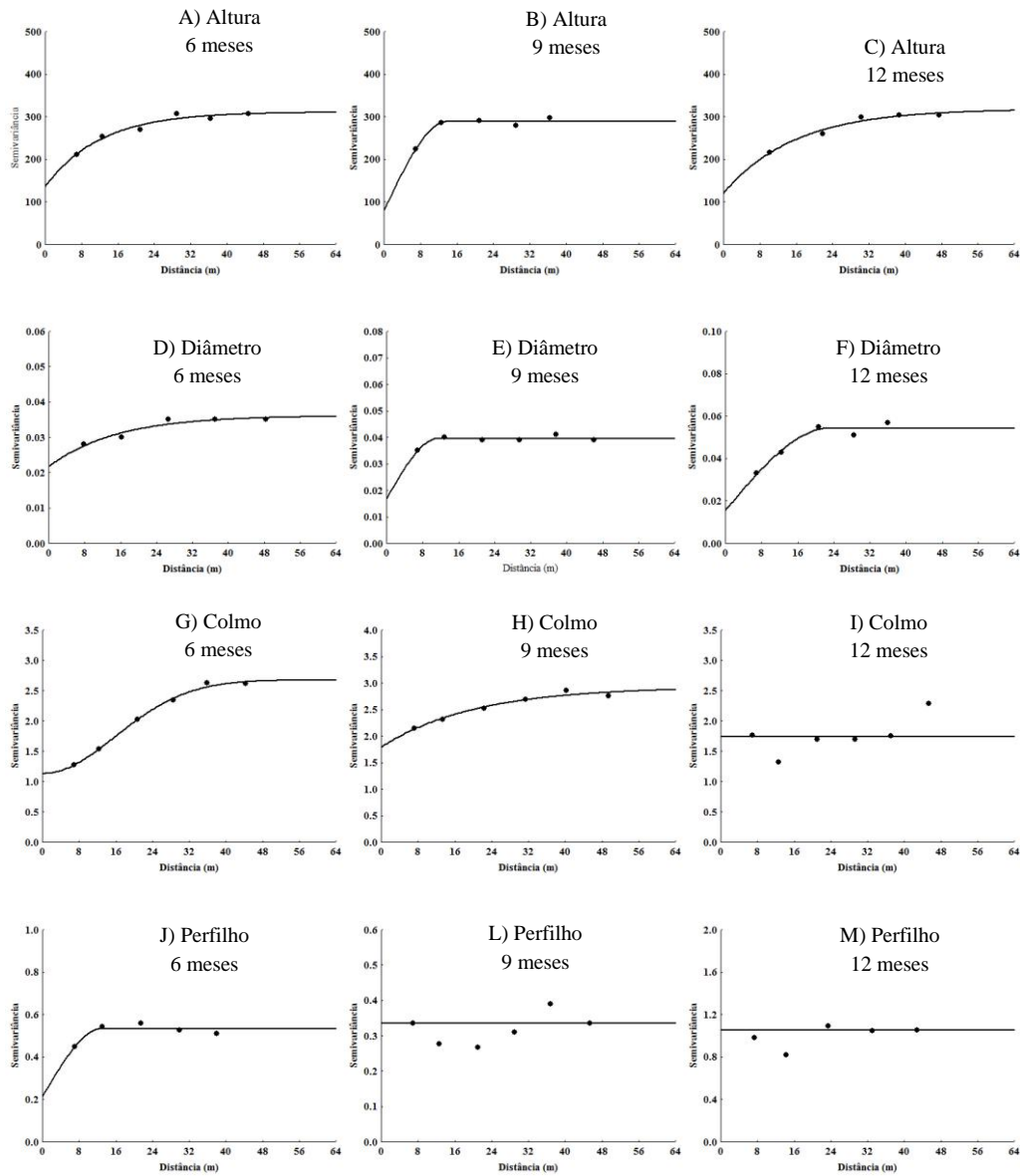
Com relação às épocas de amostragem, os alcances de *Meloidogyne* (A1) aumentaram da primeira para segunda época de amostragem (Figura 2 A, C), como também os de *Pratylenchus* (A2) (Figura 2 J, M). De forma semelhante, também foi observada maior homogeneidade das variáveis altura e diâmetro (Figura 4-A, C, D, E) com o aumento do alcance ao longo do tempo na A2.

**Figura 3** - Semivariogramas teóricos para variáveis biométricas em cana de açúcar, na Área 1, aos seis, nove e 12 meses após o plantio.



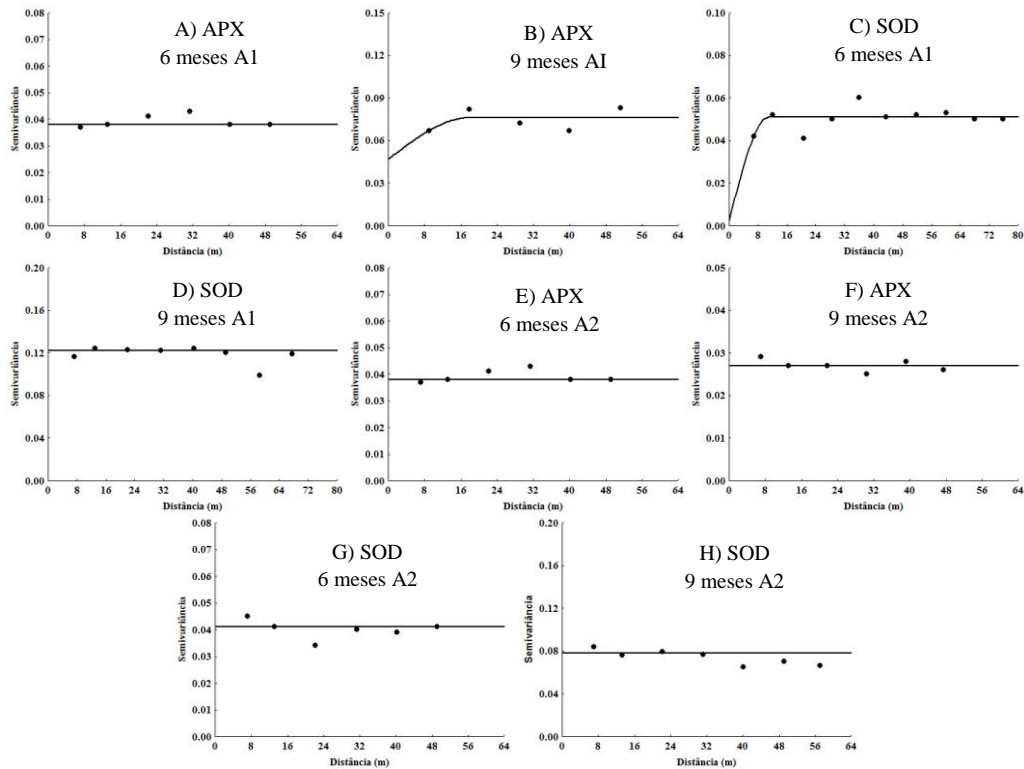
Fonte: Autores (2023).

**Figura 4** - Semivariogramas teóricos para variáveis biométricas em cana-de-açúcar na Área 2, aos seis, nove e 12 meses após o corte.



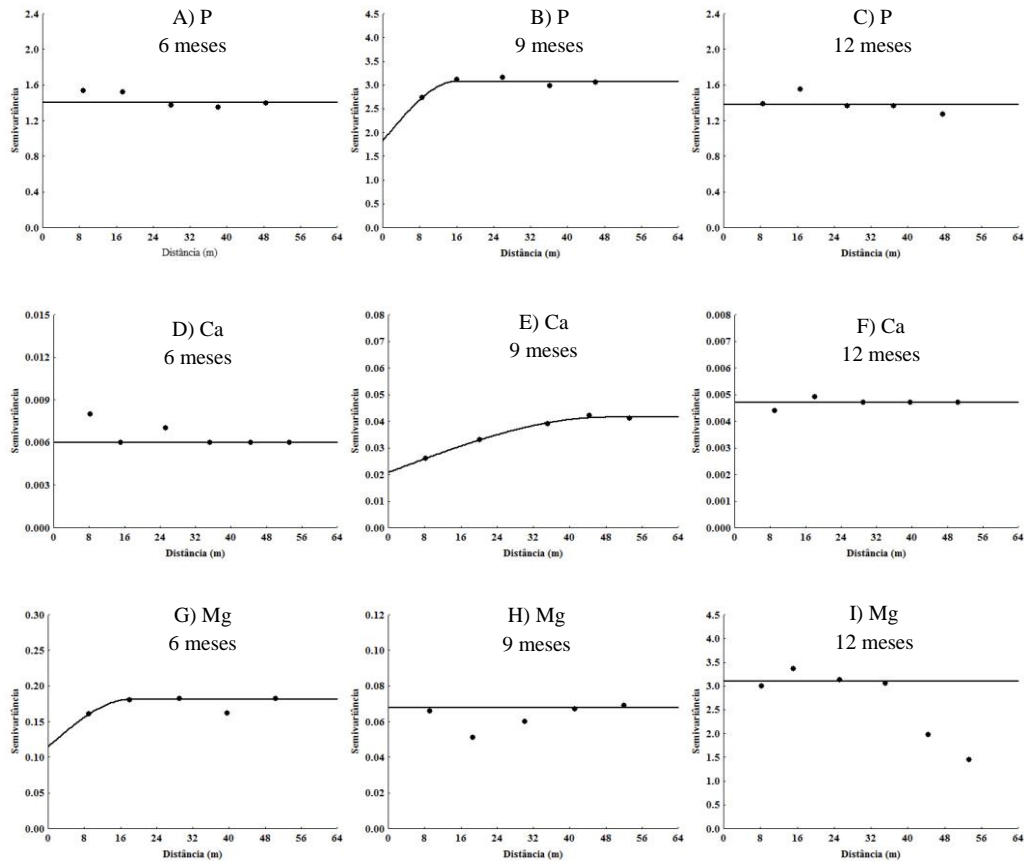
Fonte: Autores (2023).

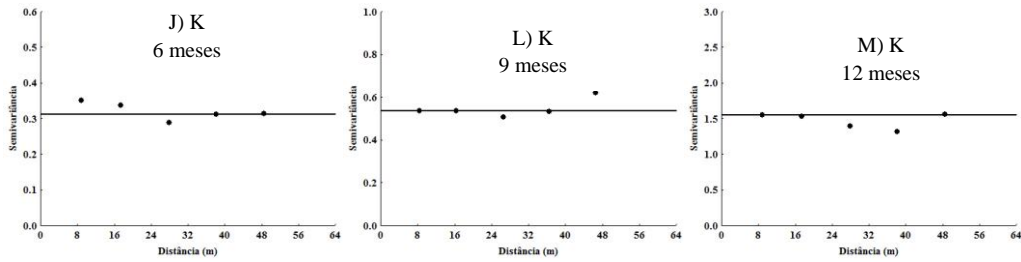
**Figura 5** - Semivariogramas teóricos para as enzimas ascorbato peroxidase (APX) e superóxido dismutase (SOD) em cana-de-açúcar na Área 1, aos seis e nove meses após o plantio e na Área 2, aos seis e nove meses após o corte.



Fonte: Autores (2023).

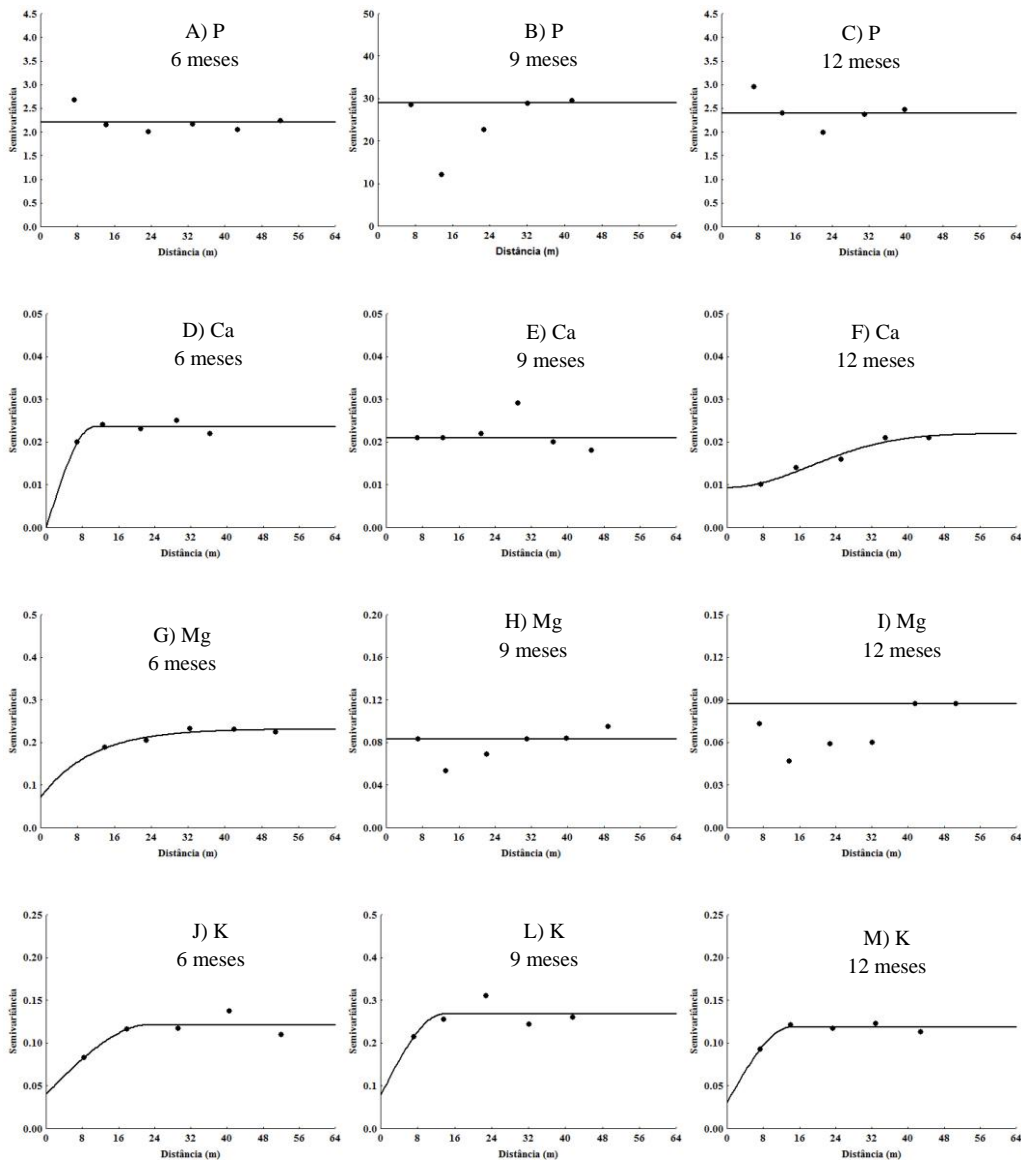
**Figura 6** - Semivariogramas teóricos para os nutrientes fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) em plantas de cana-de-açúcar na Área 1, aos seis, nove e 12 meses após o plantio.





Fonte: Autores (2023).

**Figura 7** - Semivariogramas teóricos para os nutrientes Fósforo – P, Cálcio – Ca, Magnésio – Mg, Potássio – K em plantas de cana de açúcar na Área 2, aos seis, nove e 12 meses após o corte.



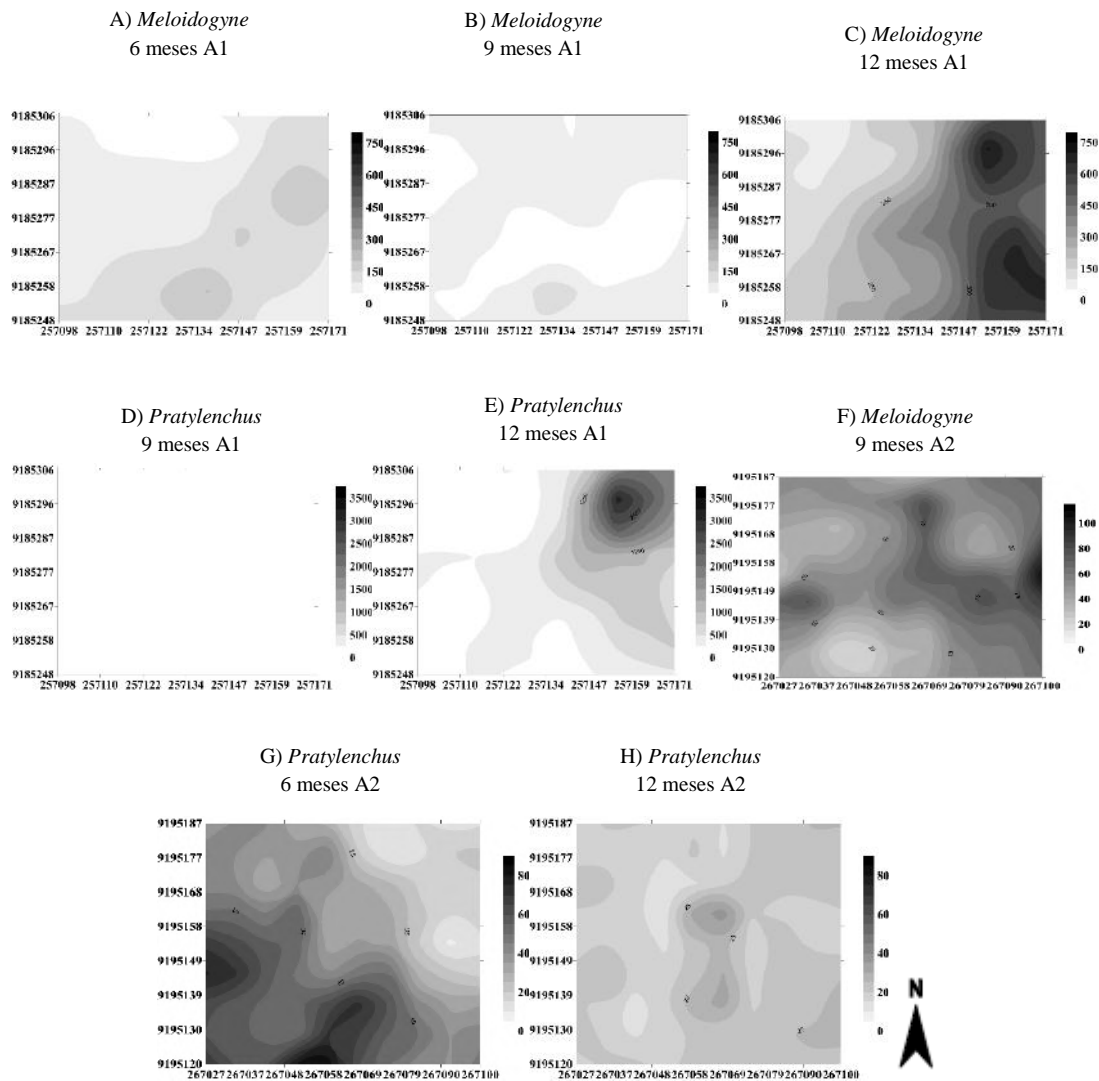
Fonte: Autores (2023).

### 3.4 Mapas das áreas estudadas

Nos mapas de isolinhas, observam-se regiões com maior densidade populacional de fitonematoides (Figura 8), maior concentração de variáveis de crescimento (Figura 9), de teores de nutrientes (Figuras 10) e de enzimas (Figura 10) da planta, indicadas por manchas escuras.

A altura e o diâmetro, aos 12 meses na A1 (Figuras 11B e 12C), se concentram nas regiões de menor densidade de *Meloidogyne* e *Pratylenchus* (Figuras 10C e 10E). Na A2, aos seis meses, as variáveis diâmetro do colmo (Figura 9 I), número de perfilhos (Figura 9 O) e número de colmos (Figura 9 M) se concentraram em regiões de menor população de *Pratylenchus* (Figura 8 G).

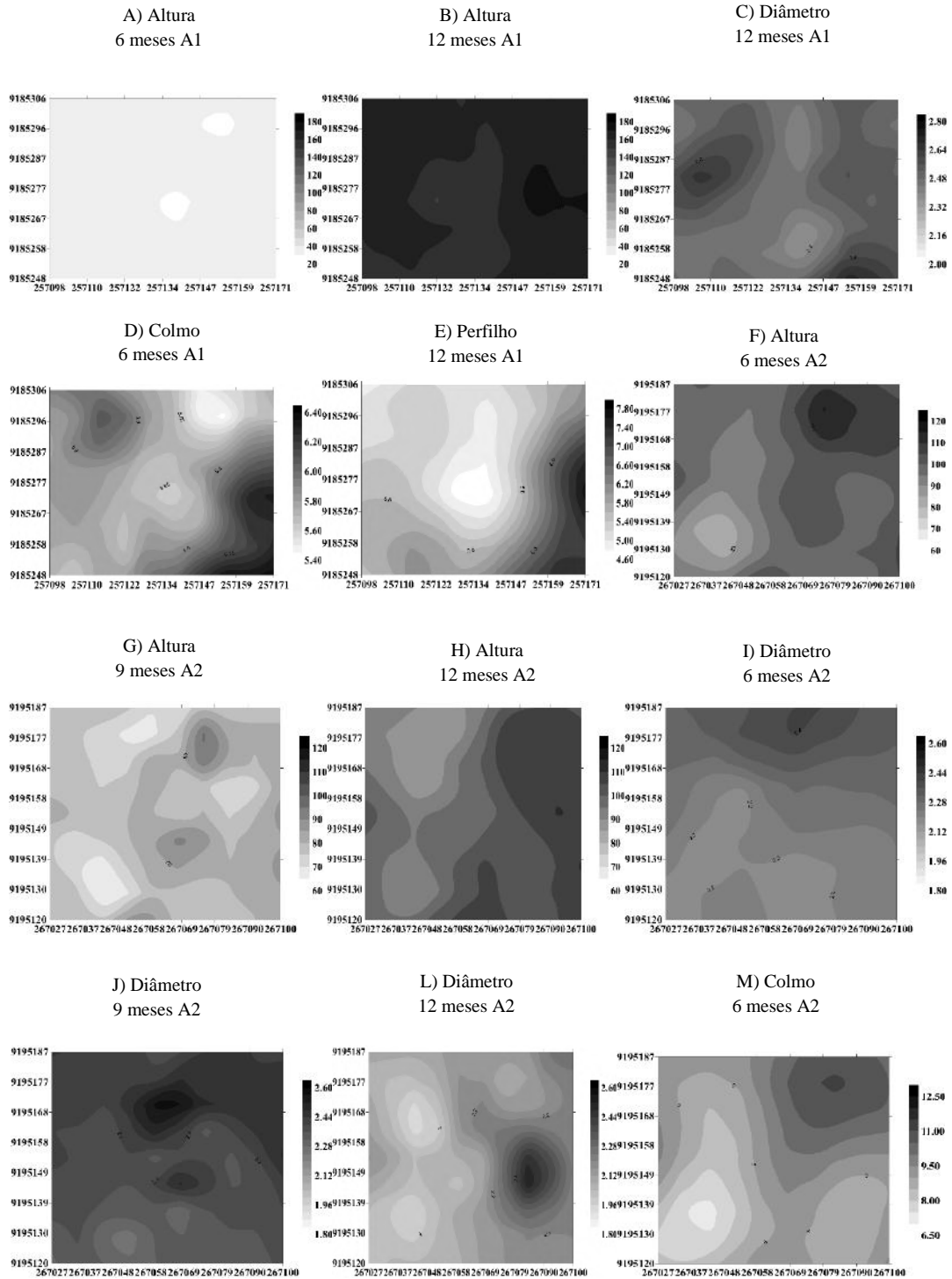
**Figura 8** - Mapas de isolinhas para fitonematoides endoparasitas em cana-de-açúcar na Área 1 e 2 durante as épocas de amostragem.

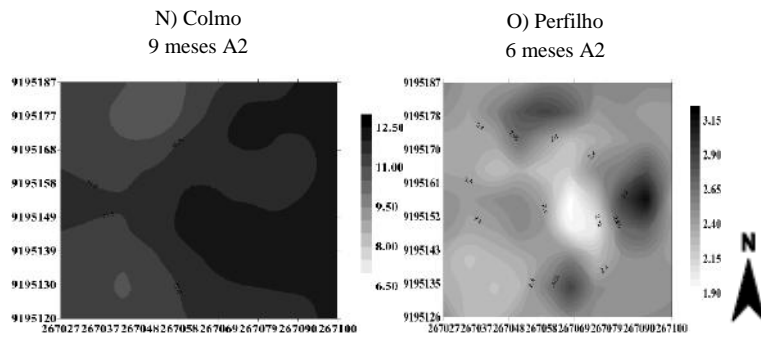


Os mapas de isolinhas mostram a distribuição espacial dos atributos estudados. Fonte: Autores (2023).



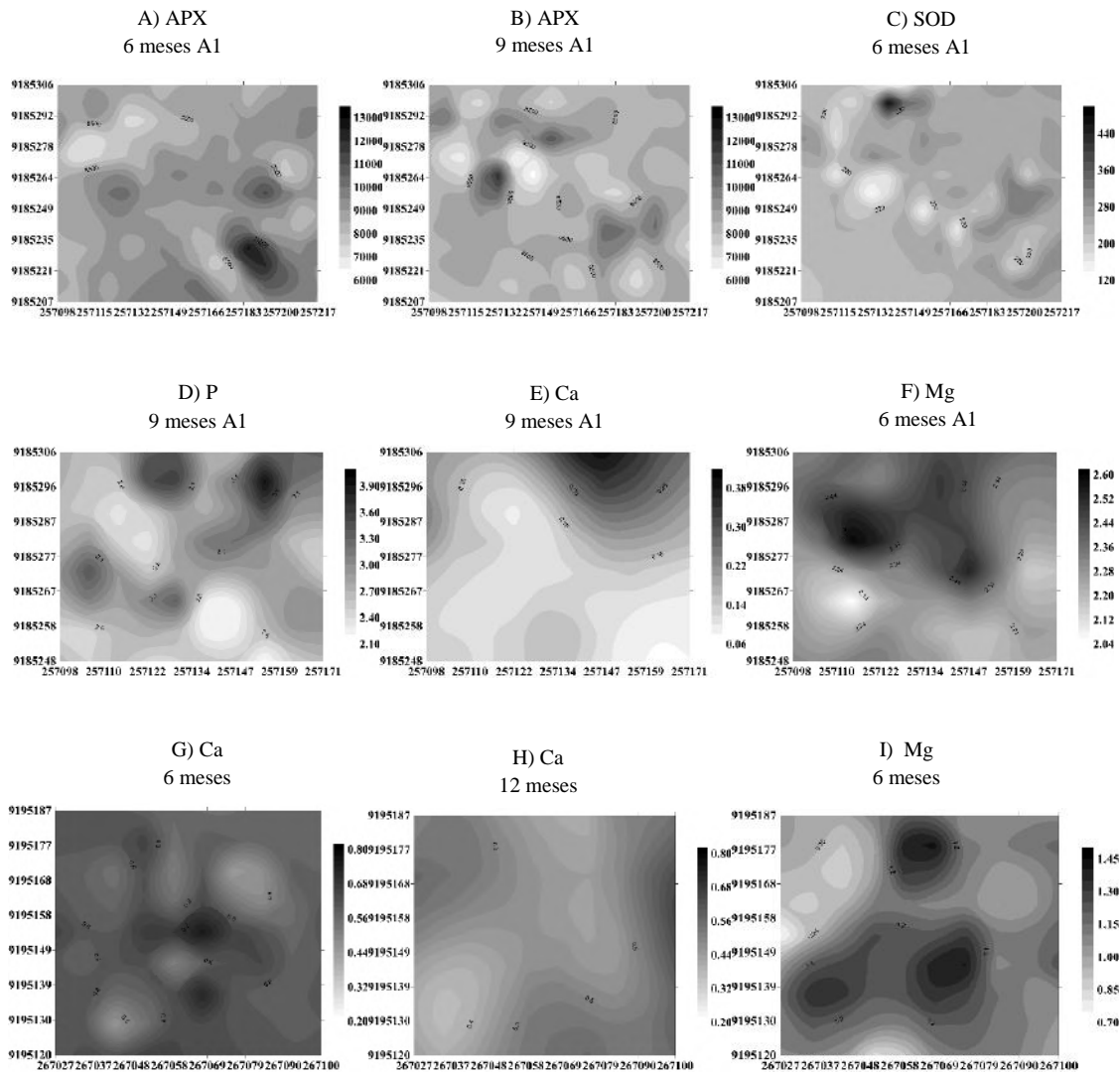
**Figura 9** - Mapas de isolinhas para variáveis biométricas em cana-de-açúcar na Área 1 e 2 durante as épocas de amostragem.

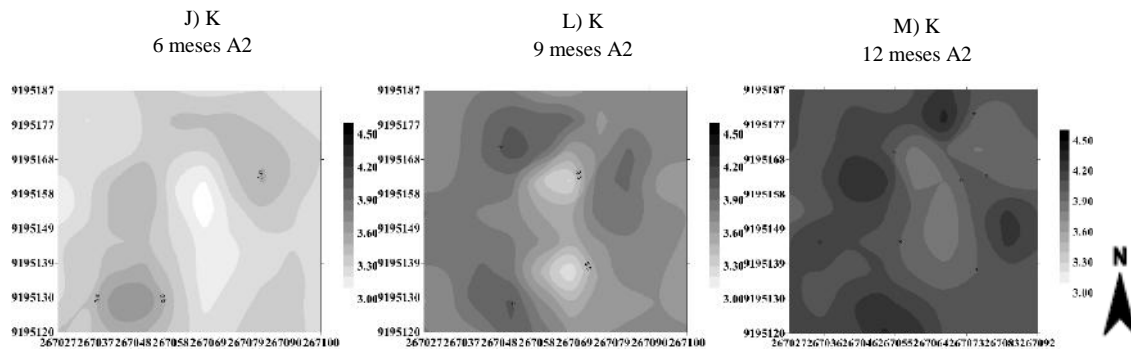




Fonte: Autores (2023).

**Figura 10** - Mapas de isolinhas para as enzimas ascorbato peroxidase (APX), superóxido dismutase (SOD), para os nutrientes fósforo (P), Cálcio – Ca, e Magnésio – Mg na Área 1 e cálcio (Ca) e Potássio – K em plantas de cana-de-açúcar na Área 2 durante as épocas de amostragem.





Fonte: Autores (2023).

#### 4. Discussão

Apesar de alguns dados não apresentarem normalidade, a análise geoestatística pode ser realizada, no entanto, os dados que seguem distribuição normal fornecem maior precisão nas estimativas da krigagem (Njoku et al, 2023).

Os altos valores de CV das variáveis nematológicas, em ambas áreas estudadas, podem ser explicados pelas grandes diferenças entre os valores máximos e mínimos em seu conjunto de dados, ou seja, há uma maior dispersão dos dados em relação à média, sugerindo maior heterogeneidade da variável (Toebe et al., 2018).

A alta variabilidade é frequentemente relatada em estudos com nematoides (Santos da Silva et al., 2021; Pezzoni-Filho, 2018). Os padrões de distribuição espacial de nematoides são geridos por macro e microcomponentes, em que o componente macro é influenciado por variáveis ambientais, de formação do solo e vegetativos; enquanto que o micro está relacionado ao ciclo de vida, à habilidade de dispersão e ao hábito alimentar do próprio nematoide (Maranhão, 2018). Isso explica a distribuição heterogênea dos fitonematoides no campo, nos diferentes períodos de amostragem, nas áreas estudadas.

Para a maioria das variáveis nutricionais estudadas, observaram-se variabilidades média e baixa. Esses resultados corroboram com os obtidos por Bernardi et al. (2002), demonstrando, assim, que os teores foliares de nutrientes para uma mesma espécie vegetal tendem a se manter dentro de uma determinada faixa de variação.

Sugere-se que essa grande variação nas épocas de coletas pode ter ocorrido pelos fatores abióticos que podem interferir no processo de absorção pela planta. Segundo Silva et al. (2021), as propriedades químicas do solo, tipo de planta, propriedades genéticas e variáveis do solo (disponibilidade de água, concentração dos solutos, etc.) podem afetar significativamente a variabilidade química na planta. Meng et al. (2021) também relataram a interferência de fatores abióticos na distribuição do fósforo absorvido pelas plantas. Esses fatores podem ser divididos em externos (disponibilidade do nutriente, aeração, temperatura, o próprio elemento, interação com outros íons, pH, micorrizas e rizosfera) e internos (potencialidade genética, estado iônico interno, nível de carboidratos, intensidade transpiratória, morfologia das raízes) (Malavolta et al., 1997).

A distribuição aleatória encontrada nas variáveis nematológicas se deve, principalmente, à escala de amostragem utilizada (Abd-Elgawad, 2021), ou seja, o espaçamento utilizado não foi satisfatório para caracterizar a distribuição espacial dos nematoides parasitos de planta. Sugere-se, então, a utilização de menor distância entre pontos em trabalhos futuros para determinar a distribuição espacial. No entanto, ainda não há um espaçamento ótimo para caracterização da dependência espacial de nematoides, visto que Souza Júnior et al. (2021) evidenciaram efeito pepita puro para nematoides com espaçamento amostral de 2 m. A distribuição aleatória de nematoides também foi relatada por outros autores (Oliveira, 2014; Cardoso et al., 2012).

Ao longo dos períodos de amostragem, observaram-se mudanças no modelo ajustado às variáveis nematológicas. Este fenômeno pode ter ocorrido por causa da influência de fatores abióticos, tais como a pluviosidade, que diferiu nos períodos de

nove e 12 meses de amostragem. No entanto, em ambas as áreas estudadas, padrões de distribuição espacial dos nematoides foram ajustados, em sua maioria, ao modelo exponencial. Porém, em estudos geoestatísticos, o comportamento de nematoides é melhor ajustado ao modelo esférico (Santos da Silva et al., 2021; Pezzoni-Filho, 2018), que se aplica a atributos com alta continuidade espacial ou menos erráticos a curtas distâncias (Isaaks; Srivastava, 1989).

As variáveis de crescimento e de nutrição da cana-de-açúcar, nas áreas estudadas, ajustaram-se ao modelo esférico seguido do exponencial. Bernardi et al. (2002) também encontraram ajustes de semivariogramas a esses dois modelos quando estudaram os teores foliares de nutrientes em soja, o que evidencia que os modelos esférico e exponencial podem ser utilizados para explicar a distribuição temporal dessas variáveis.

As variáveis nematológicas tiveram significativas variações quanto ao alcance e dependência espacial ao longo do estudo. Outros estudos também mostram diferenças no valor do alcance e dependência espacial de nematoides, indicando que o manejo imposto na área, textura do solo e regime de precipitação local promovem maior ou menor influência para esses patógenos (Souza Júnior et al., 2021). A variação na ocorrência de chuvas ao longo do período de amostragem (Figura 1) corrobora essa oscilação dos atributos avaliados.

Os alcances de *Meloidogyne* (A1) e de *Pratylenchus* (A2) aumentaram da primeira para a segunda época de amostragem. Esse comportamento demonstra que os gêneros de fitonematoides estudados tornaram-se mais homogêneos ao longo dos períodos de amostragem. O aumento de alcance para ambos os nematoides coincide com o aumento nos níveis de pluviosidade, provavelmente, criando regiões com melhores condições de sobrevivência desses fitonematoides durante as segunda e terceira coletas em ambas as áreas.

Também foi observada maior homogeneidade das variáveis de crescimento altura e diâmetro na A2. Infere-se que as boas condições nutricionais e fatores ambientais tenham favorecido o bom funcionamento da planta. De modo geral, quanto melhor o estado nutricional da planta, mais tolerante ela ficará ao parasitismo dos fitonematoides e, conseqüentemente, apresentam melhor desenvolvimento. Essa tolerância pode ainda ser favorecida pelo efeito da nutrição mineral sobre as estruturas anatômicas da planta como, por exemplo, modificação da espessura das células epidérmicas e da cutícula, parede celular com maior ou menor grau de silificação, suberização e lignificação (Marschner, 1997).

As variáveis altura e diâmetro dos colmos, na A1, aos 12 meses se concentram nas regiões de menor densidade de *Meloidogyne* e *Pratylenchus*. Quando na presença de fitonematoides, as plantas de cana-de-açúcar reduzem suas características biométricas, como altura da planta, além da queda no número de perfilhos e colmos malformados (Martinha et al., 2022).

As variáveis diâmetro do colmo, número de perfilhos e número de colmos, aos seis meses na A2, se concentraram em regiões de menor população de *Pratylenchus*, o que sugere que os nutrientes cálcio e magnésio, presentes nesse mesmo período, influenciaram, de forma positiva, o desenvolvimento da cultura, e favoreceu a competição contra esses fitopatógenos.

Em solos que favoreçam a nutrição equilibrada da planta hospedeira, a resistência e, ou tolerância da planta pode ser aumentada, dificultando a penetração e o desenvolvimento dos nematoides (Cheng, 2018). Asano e Moura (1995), estudando a severidade da meloidoginose causada por *M. incognita* raça 1 na cultura da cana-de-açúcar em solos arenosos, verificaram que, com a redução significativa do fitonematoide, houve maior disponibilidade de macronutrientes. Oliveira et al. (2012), ao avaliarem o efeito de diferentes doses de silicato de cálcio e magnésio sobre a reprodução de *M. javanica* e sobre o desenvolvimento de mudas de bananeira ‘Prata Anã’, observaram que a reprodução do fitonematoide foi afetada por aplicações de diferentes doses de nutrientes e que estes proporcionaram incremento na matéria seca do rizoma.

## 5. Considerações Finais

Com o presente trabalho, pode-se concluir que os padrões de distribuição espaço-temporal de *Meloidogyne* e de *Pratylenchus* na A1 diferem com a época de amostragem, tornando-se mais homogêneos ao longo do tempo. O

desenvolvimento da cana-soca foi prejudicado por regiões de alta densidade populacional de *Pratylenchus*, coincidentes com regiões de baixos teores de K e Mg.

Dentre os nutrientes absorvidos pela planta, o cálcio apresentou maior zona de influência em ambas as áreas, caracterizada pelos altos valores de alcance. Além disso, a dependência espacial dos nutrientes, no geral, foi mais representativa na área com cana-soca, gerando-se mapas durante todo o período experimental. O mapeamento das enzimas APX e SOD mostra que a pluviosidade exerce influência na expressão das mesmas. Em condições de baixa pluviosidade, foi possível identificar dependência espacial das enzimas (A1), as quais foram mais expressivas; contudo, as enzimas não apresentaram dependência espacial na A2, onde houve maior pluviosidade.

Sugere-se a continuidade da pesquisa que possa avaliar se houve variação na população de fitonematoides em função das demais variáveis analisadas nos anos subsequentes aos trabalhos realizados visto a importância econômica destes fitopatógenos.

## Referências

- Abd-Elgawad, M. M. M. (2021). Towards the correct use of statistics in nematology. *Bulletin of the National Research Centre*, 45, 1-13.
- Cheng, Z., Melakeberhan, H., Mennan, S., & Grewal, P. S. (2018). Relationship between communities of soybean cyst nematodes, *Heterodera glycines* and soil nematodes under long-term cropping systems and crop rotation. *Nematropica*, 48, 101-115.
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C. Gonçalves, J. L. M & Sparovek, G. (2013). Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22, 711-728.
- Maranhão, S. R. V. L., Pedrosa, E. M. R., Guimaraes, L. M. P., Chaves, A., Leitão, D. A. H. S., & Vicente. T. F. S. (2018). Nematode abundance and diversity in sugarcane fields in Brazil. *Tropical Plant Pathology*, 43, 485- 498.
- Asano, S., & Moura, R. M. (1995). Efeitos dos macro e dos micronutrientes na severidade da Meloidoginose da cana-de-açúcar. *Nematologia Brasileira*, 19, 15-20.
- Barker, K. R. (1985). Sampling nematode communities In Baker, K. R., C. C. Carter, & Sasser, J. N. *An advanced treatise on Meloidogyne: II. Methodology*, Raleigh: North Caroline State University/USAID, p. 3-17.
- Bernardi, A. C. C., Carmo, C. A. F. S., Machado, P. L. O., Silva, C. A., Valencia, L. L. O., & Meirelles, M. S. (2002). *Variabilidade espacial de teores de nutrientes em folhas de soja como ferramenta para agricultura de precisão*. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 5p.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1501-1511.
- Cardoso, M. O., Pedrosa, E. M. R., Rolim, M. M., Silva, E. F. F., & Barros. P. A. (2012). Effects of soil mechanical resistance on nematode community structure under conventional sugarcane and remaining of Atlantic Forest. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184, 3529-3544.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento. (2022). <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>.
- Englund, E., & Sparks, A. (1988). GEO-EAS (Geostatistical Environmental Assessment Software): User's Guide. Las Vegas: *Environmental Protection Agency*. 192p.
- Giannopolitis, C. N., & Ries, S. K. (1977). Superoxide dismutases: I, occurrence in higher plants. *Plant Physiology*, 59, 309-314.
- Golden Software. (1995). *Surfer for Windows: Surface mapping system*. Versão 6.01. Golden.
- Jovanovic, S.V., KukavicA, B., Vidovi'c, M., Morina, F., & Menckhoff, L. (2018). Peroxidases de classe III: Funções, localização e regulação redox de isoenzimas. In: *Antioxidantes e Enzimas Antioxidantes em Plantas Superiores*. Gupta, D., Palma, J., Corpas, F. & Cham, Suíça: Springer, p.269-300.
- Silva, V. E., Nogueira, T. A. R., Abreu-Junior, C. H., Jani, A. A., Buzetti, S. Teixeira Filho, M. C. M., He, Z., Ganga, A., Penido, T. M. A., Silva, A. R., & Capra, G. F. (2021). Variability in soil physical-chemical properties along the root-explored profile in deep Oxisols of commercial eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 494, 119334.
- Santos da Silva, E. P. F., Régis Pedrosa, E. M., Medrado de Melo, J. M., da Silva Vicente, T. F., Lopes, I., Felipe de Moraes, T., & Feitosa e Silva, D. H. (2021). Arranjo espacial da umidade do solo, carbono orgânico e nematofauna às margens do rio brígida em Parnamirim – PE. *Revista Brasileira De Engenharia E Sustentabilidade*, 8(2), 11-20.
- Souza Junior, F. J. C., Pedrosa, E. M. R., Montenegro, A. A. A., Maranhão, S. R. V. L., & Vicente, T. S. F. (2021). Variabilidade espaço-temporal de *meloidogyne* e *pratylenchus* em áreas de cana-de-açúcar sob manejo de irrigação. *Nematropica*, 50, 2.
- Hussey, R. S., & Barker, K. R. (1973). A comparison of methods for collecting inocula of *Meloidogyne* spp. including a new technique. *Plant Disease repórter*, 57, 1025-1028.
- Isaaks, E. H., & Srivastava, M. (1989). *An introduction to applied geostatistics*. Oxford New York: University Press, 600p.

- Journel, A., C. & Huijbregts, C. J. (1978). Mining geostatistics. Londres: Academic Press, 600p.
- Landim, P. M. B. (2006). Sobre geoestatística e mapas. *Terra e Didática*, 2,19-33.
- Lima, J. S. S., Bona, D. A. O., Fiedler, N. C., & Pereira, D. P. (2014). Distribuição espacial das frações granulométricas argila e areia total em um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Árvore*, 38,513-521.
- Mai, W. F., Mullin, P. G., Lyon, H. H., & Loeffle, K. (1996). *Plant-parasitic nematodes: A pictorial key to genera*. Ithaca, NY: Cornell University Press. 277p.
- Martinha, D. D., Silva, M. C. C., Maceda, A., Hahn, M. H., Calegario, R., Ruaro, L. Oliveira, R. A., & Duarte, H. S. S. (2022). Survey of nematodes associated with sugarcane in the state of Paraná, Brazil. *Arquivos do Instituto Biológico*, 89,1-12.
- Pezzoni-Filho, J. C.,Brida, A. L., Campos-Moraes, D. A., Siciliano-Wilcken, S. R., Lopes-Zimback, C. R., & Luiz-Furtado, E. (2018). *Meloidogyne exigua* (Meloidogynidae) in rubber tree clones during two periods of the year Corpoica. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 19(3), 607-620.
- Marschner, H. (1997). *Mineral nutrition of higher plants*. London: Academic Press, 889p.
- Malavolta, E. (1992). *ABC da análise de solos e folhas*. São Paulo: Agronomia Ceres, 124p.
- Malavolta, E., Vitti, G. C. & Oliveira, S. A. (1997). *Avaliação do estado nutricional das plantas*, Piracicaba. 319p.
- Meng, X., Chen, W.W., Wang, Y.Y., Huang, Z.R., Ye, X., Chen, L.S., & Yang, L.T. (2021). Effects of phosphorus deficiency on the absorption of mineral nutrients, photosynthetic system performance and antioxidant metabolism in Citrus grandis. *PLoS One*,16(2), e0246944.
- Nakano, Y., & Asada, K. (1981). Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. *Plant Cell Physiology* 22,867-880.
- Dinardo-Miranda, L. L., Fracasso, J. V., & Miranda, I. D. (2019). Damage caused by *Meloidogyne javanica* and *Pratylenchus zae* to sugarcane cultivars. *Summa Phytopathologica*, 45(2), 146-156.
- Dvořák, P., Krasylenko, Y., Zeiner, A., Šamaj, J., & Takáč, T. (2021). Signaling Toward Reactive Oxygen Species-Scavenging Enzymes in Plants. *Frontiers in Plant Science*, 11,618835.
- Kaur, S., Samota, M. K., Choudhary, M., Choudhary, M., Pandey, A. K., Sharma, A., & Thakur, J. (2022). How do plants defend themselves against pathogens-Biochemical mechanisms and genetic interventions. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 28(2), 485-504.
- Oliveira, A. K. S. (2014). Crescimento do pimenteiro e variabilidade espacial de nematoides e atributos do solo após incorporação da torta de nim. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 164 f.
- Oliveira, R. M., Ribeiro, R. C. F., Xavier, A. A., Pimenta, L., & Korndorfer, G. H. (2012). Efeito do silicato de cálcio e magnésio sobre a reprodução de *Meloidogyne javanica* e desenvolvimento de mudas de bananeira prata-anã. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 34,409-415.
- Santana-Gomes, S. M., Dias-Arieira, C. L., Roldi, M., Dadazio, T. S., Marini, P. M., & Barizão, D. A. O. (2013). Mineral nutrition in the control of nematodes. *African Journal of Agricultural*, 8,2413-2420.
- Shahbazi, F., Aliasgharzarad, N. Ebrahimzad, S. A., & Najafi, N. (2013). Geostatistical analysis for predicting soil biological maps under different scenarios of land use. *European Journal of Soil Biology* 55,20-27.
- Silva, F. C. (2009). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: Embrapa *Informações Tecnológicas*. 627p.
- Silva, J. C. T., Oliveira, R. D. L., Jham, G. N., & Aguiar, N. D. C. (2008). Effect of neem seed extracts on the development of the soybean cysts nematode. *Tropical Plant Pathology*, 33,171-179.
- Ulrike M., & Sofia, R. C. (2021). Plant signals differentially affect rhizosphere nematode populations, *Journal of Experimental Botany*, 72(10), 3496-3499.
- Vauclin, M., Vieira, S. R., Vachaud, G., & Nielsen, D. R. (1983). The use of cokriging with limited field soilobservations. *Soil Science Society of America Journal*, 47,175-184.
- Warrick, A.W., & Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties the field. In: Hilled, D. *Application of soil physics*. Academic Press: Nova Iorque, p. 319-344.
- Zeraik, A. E., Souza, F. S., Fatibello Filho, O., & Leite, O. D. (2008). Desenvolvimento de um spot test para o monitoramento da atividade da peroxidase em um procedimento de purificação. *Química Nova* 31,731-734.
- Župunski, V., Jevtić, R., Jokić, V.S., Župunski, L., Lalošević, M., Ćirić, M., & Ćurčić, Ž. (2017). Sampling error in relation to cyst nematode population density estimation in small field plots. *Journal of Nematology*, 49(2), 150-155.
- Bordonal, R. O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., Figueiredo E. B., Oliveira, B. G. & Scala Jr. (2018). Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(13), 12-23.
- Defante, L. R., Vilpoux, O. F., & Sauer, L. (2020). Importance of the sugarcane industry in the formal employment in the state of Mato Grosso do Sul during the period of 2008 to 2014. *Revista de Econômica Sociologia Rural*, 58(4), e193496.
- Cherubin, M. R., Carvalho, J. L. N., Cerri, C. E. P., Nogueira, L. A. H., Souza, G.M., & Cantarella, H. (2021). Land Use and Management Effects on Sustainable Sugarcane-Derived Bioenergy. *Land*, 10(1),72.
- Njoku, E. A., Akpan, P. E., Effiong, A. E., & Babatunde, I. O. (2023). The effects of station density in geostatistical prediction of air temperatures in Sweden: A comparison of two interpolation techniques. *Resources, Environment and Sustainability*, 11,100092.
- Toebe, M., Machado, L.N., Tartaglia, F.L., Carvalho, J.O., Bandeira, C.T., & Cargnelutti Filho, A. (2018). Sample size for estimating mean and coefficient of variation in species of crotalaria. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2),1705-1715.