

Avaliação da distribuição da lâmina de irrigação em ambiente protegido com métodos geoestatísticos

Evaluation of irrigation depth distribution in a protected environment with geostatistical methods

Ligia Flávia Antunes Batista^{1*} , Marcelo Hidemassa Anami² 

RESUMO

A eficiência do uso da água em atividades agrícolas é fundamental para assegurar a produção de alimentos de forma sustentável. Por isso, avaliar a forma como os sistemas irrigados distribuem a água é de suma importância para garantir a disponibilidade desse recurso natural para as gerações futuras. O objetivo deste trabalho é avaliar a dependência espacial das lâminas de irrigação observadas em ambiente protegido e determinar sua uniformidade. O estudo foi realizado em uma estufa agrícola com uma área irrigada de 36,0 m². A lâmina de irrigação foi medida a cada 0,5 m, em 13 linhas por 13 colunas, totalizando 169 pontos de coleta. Para avaliar a dependência espacial, foram calculados os índices de autocorrelação global e local Moran e *Local Indicator of Spatial Association* (LISA), a partir de cinco métricas de vizinhança: queen e baseadas nas distâncias de 50, 100, 150 e 200 cm, utilizando a ferramenta livre GeoDA. Foi realizada também a análise geoestatística dos dados e a interpolação pelo método da krigagem, por meio do complemento Smart-Map disponível no software QGIS. Verificou-se que os valores do índice de Moran são maiores para as vizinhanças Queen e até 50 cm, sendo acima de 0,8. Quanto ao resultado da interpolação, a área com lâminas de irrigação acima de 10 mm foi de 15,53 m², correspondente a uma área com irrigação uniforme de 43,1% da área total. Isso indicou uma distribuição ineficiente da água e a necessidade de reorganizar o esquema de irrigação para garantir uma lâmina de irrigação homogênea.

Palavras-chave: agricultura; análise espacial; GeoDA; Smart-Map; sustentabilidade.

ABSTRACT

Efficient use of water in agricultural activities is essential to ensure sustainable food production. Therefore, evaluating the way in which irrigated systems distribute water is very paramount to guarantee the availability of this natural resource for future generations. The aim of this work was to evaluate the spatial dependence of irrigation depths observed in a protected environment and to determine its uniformity. The study was carried out in an agricultural greenhouse with an irrigated area of 36.0 m². Irrigation depths were measured every 0.5 m, in 13 lines by 13 columns, totaling 169 collection points. To assess spatial dependence, the Moran and *Local Indicator of Spatial Association* (LISA) global and local autocorrelation indexes were calculated from five neighborhood metrics: queen and based on distances of 50, 100, 150, and 200 cm, using the free tool GeoDA. Geostatistical analysis of the data and interpolation using the Kriging method were also carried out with the Smart-Map plugin, available in the QGIS software. Moran index values were found to be higher for Queen neighborhoods and up to 50 cm, being above 0.8. Regarding the interpolation result, the area with irrigation depths above 10 mm was 15.53 m², totalizing an area with uniform irrigation of 43.1% of the total area, which indicated an inefficient distribution of water and the need to reorganize the irrigation scheme in order to guarantee a homogeneous water depth.

Keywords: agriculture; spatial analysis; GeoDA; plugin Smart-Map; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada consome 52% do volume total de água captada em mananciais superficiais e subsuperficiais, e o uso da água deve crescer em torno de 45% entre

2015–2030 (AYRIMORAES, FONTENELLE e FERREIRA, 2020). O Atlas da Irrigação, que apresenta a análise do uso da água na agricultura irrigada (BRASIL, 2021), confirma que as atividades agrícolas consomem cerca de 50% da

¹Bacharel em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Londrina. Mestre em Informática pela Universidade Federal do Paraná. Doutora em Ciências Cartográficas pela Universidade Estadual Paulista - Presidente Prudente (SP), Brasil.

²Engenheiro Agrônomo pela Universidade Estadual de Londrina. Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Doutor em Agronomia pela Universidade Estadual de Maringá - Maringá (PR), Brasil.

*Endereço para correspondência: Av. Dos Pioneiros 3131 - Jardim Morumbi - Londrina, PR. CEP: 86036-370. E-mail: ligia@utfpr.edu.br

captação de água bruta, enquanto o abastecimento urbano responde por 24% da retirada total.

Apesar do grande potencial efetivo de aumento da área irrigável, estimado em 16,7 milhões de hectares de um potencial total de 55,85 milhões de hectares (BRASIL, 2021), o uso da água na irrigação é ineficiente. Um dos principais fatores para esse uso ineficiente é a carência de conhecimento sobre a distribuição da água em sistemas irrigados (SILVA, AZEVEDO e LIMA, 2002).

Para avaliar a uniformidade da irrigação e, assim, otimizá-la, métodos geoestatísticos que representem a superfície interpolada e análise de dependência espacial podem ser aplicados. A krigagem ordinária é um método de inferência espacial que gera superfícies a partir de pontos amostrais com base em modelos geoestatísticos. Ao contrário de modelos determinísticos, a krigagem pertence à categoria de modelos estocásticos, permitindo quantificar a incerteza associada ao estimador (YAMAMOTO e LANDIM, 2013). Nesse método, os pesos atribuídos às amostras são determinados com base no semivariograma (DRUCK *et al.*, 2004), que descreve a dependência espacial, informando até que distância essa dependência é maior ou menor (FERREIRA, 2014b). A krigagem tem características que minimizam a variância da estimativa e evitam erros sistemáticos (YAMAMOTO, 2020).

Ferramentas de geoestatística que avaliam a existência de dependência espacial foram utilizadas por Nakamura, Ferreira Junior e Zimback (2011) na avaliação de lâminas de irrigação em diferentes espaçamentos de aspersores. O conceito de dependência espacial está associado à presença de dados georreferenciados com valores semelhantes, que tendem a se agrupar em regiões próximas entre si (FERREIRA, 2014b).

Pereira *et al.* (2022) desenvolveram o Smart-Map, um complemento para QGIS, para mapeamento digital utilizando técnicas de aprendizado de máquina e krigagem ordinária. O Smart-Map tem interface amigável, permite testar os parâmetros estatísticos e produz gráficos que facilitam a análise dos resultados. O QGIS é um Sistema de Informação Geográfica livre, um projeto oficial da Open Source Geospatial Foundation – OSGeo. Ele processa

diversos formatos de dados vetoriais e matriciais, permite realizar consultas por atributos, por localização, edição de layouts cartográficos, processamento de imagens de sensoriamento remoto, entre diversas outras funcionalidades (IBGE, 2019).

O objetivo deste trabalho é avaliar a uniformidade de lâminas de irrigação em ambiente protegido com a abordagem de autocorrelação global e local, quantificando a dependência espacial por meio dos índices Moran e *Local Indicator of Spatial Association* (LISA), bem como representá-la por meio de uma superfície gerada por métodos geoestatísticos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma estufa agrícola com uma área irrigada de 36,0 m², conforme apresentado na **Figura 1**, onde foram instalados 9 microaspersores Agrojet, modelo bailarina de saída dupla com base rosca ½ polegada e emissor de 1,2 mm da cor bege (AGROJET, 2018). Valnir Junior *et al.* (2016) observaram que 9 aspersores apresentam resultados aceitáveis para ensaios em sistemas de irrigação localizada.

A vazão de cada aspersor foi medida em quadruplicata e agrupada conforme suas posições na linha, dividida em 3 agrupamentos: início, meio e final da linha. A análise de variância para avaliação da vazão foi realizada pelo software Sisvar (FERREIRA, 2014a), além



Figura 1 - Estufa onde o estudo foi realizado.

das análises de estatística descritiva. A pressão de trabalho foi de 13,25 m.c.a., dentro das especificações dos microaspersores.

Foram realizadas medições a cada 0,5 m em 13 linhas por 13 colunas, totalizando 169 pontos de coleta de dados, dispostos em forma de grade regular, conforme mostrado na **Figura 1**. A variável de resposta foi a lâmina de irrigação, expressa em mm por hora.

A dependência espacial dos dados foi avaliada por meio de análise de autocorrelação global e local, utilizando os índices Moran e LISA, respectivamente (ISAAKS; SRISVASTAVA, 1989; ANSELIN, 1992). O índice global de Moran é dado pela Equação 1, em que n é o número de pontos, z_i é o valor do atributo no ponto i , \bar{z} é o valor médio do atributo na região de estudo, e w_{ij} são os elementos da matriz normalizada de proximidade espacial (DRUCK *et al.*, 2004). Este índice permite verificar a existência de agrupamentos ou um padrão aleatório nos dados.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (1)$$

O índice LISA, dado pela Equação 2 para cada área i a partir dos valores normalizados z_i do atributo, é um indicador local da associação espacial, permitindo identificar a localização dos agrupamentos (DRUCK *et al.*, 2004).

$$I_i = z_i \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n z_j^2} \quad (2)$$

As análises de autocorrelação global e local foram realizadas com a ferramenta livre GeoDA (ANSELIN, SYABRI e KHO, 2005) e dependem da definição de uma vizinhança. Neste trabalho, foram avaliadas as vizinhanças Queen e baseadas em quatro valores de distância (50, 100, 150 e 200 cm), conforme ilustrado na **Figura 2**.

Também foi realizada a análise geoestatística dos dados e os procedimentos de krigagem para gerar uma superfície interpolada, utilizando o Smart-Map. Foi feita a importação dos dados de uma camada vetorial de pontos, a geração do semivariograma isotrópico experimental e teórico, com os modelos: linear, esférico, exponencial e gaussiano, bem como a superfície interpolada por meio de krigagem ordinária (PEREIRA *et al.*, 2022). Após os ajustes do variograma, foi selecionado o modelo que

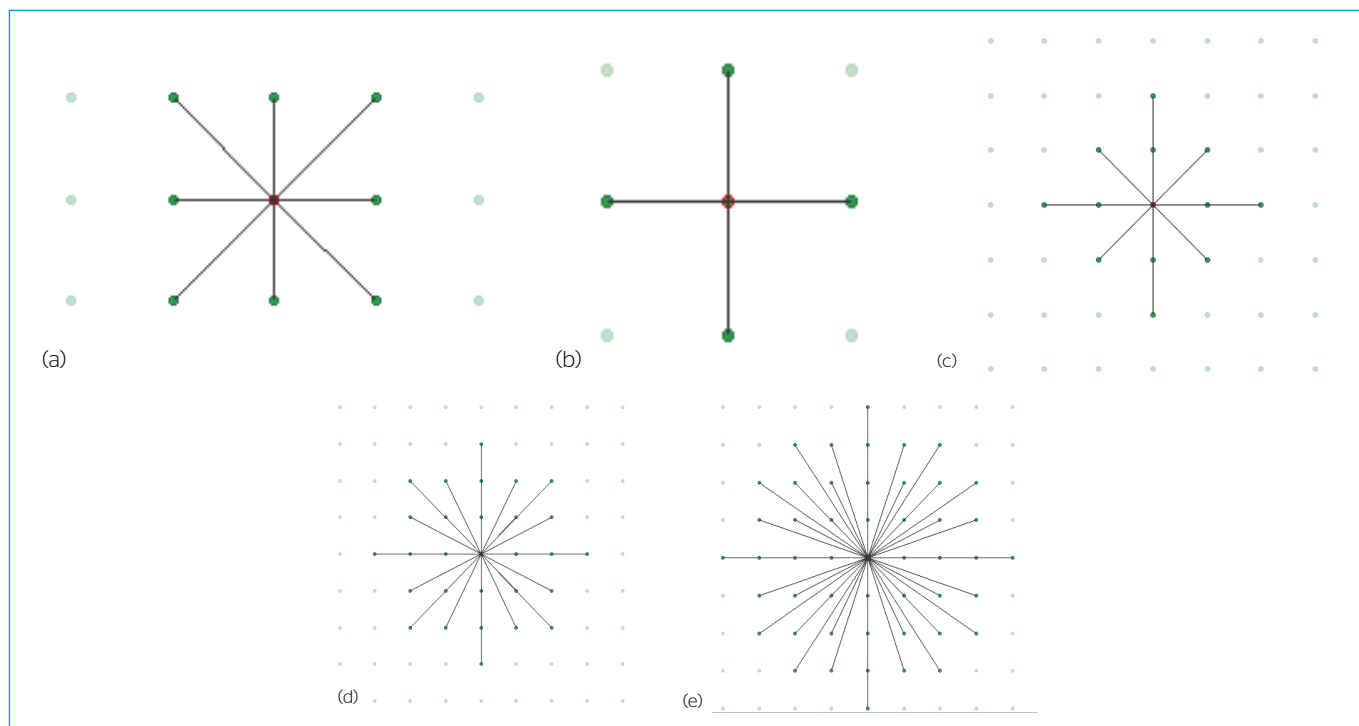


Figura 2 – Definição de vizinhanças a partir de um ponto central, em que os pontos conectados por linhas são considerados vizinhos. (a) Queen; (b) distância de 50 cm; (c) distância de 100 cm; (d) Distância de 150 cm; (e) distância de 200 cm.

resultou em maior coeficiente de determinação. Foi feita ainda a validação cruzada dos dados preditos (interpola-dos) em relação aos observados, bem como o cálculo da raiz do erro médio quadrático (REM_Q) que quantifica a qualidade do ajuste.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A vazão média observada foi de 50,09 L por hora, e o desvio padrão foi de 4,94, gerando um coeficiente de variação de 9,87%. A análise de variância realizada não apresentou diferença significativa entre os três agrupamentos definidos pelo teste de Scott-Knott a 5%. Os pontos medidos de lâmina de irrigação estão apresentados na **Figura 3**.

Em termos de estatística descritiva, os valores para a lâmina de irrigação, expressos em milímetros, variaram de um mínimo de 0,49 mm a um máximo de 17,16 mm, com média de 8,51 mm e desvio padrão de 4,17 mm.

As matrizes de vizinhança geraram os seguintes números de vizinhos por ponto em cada caso: Queen: 8 vizinhos; distância de 50 cm: 4 vizinhos; distância de 100 cm: 12 vizinhos; distância de 150 cm: 29 vizinhos; distância de 200 cm: 48 vizinhos.

A análise de autocorrelação global, expressa pelo índice de Moran, gerou gráficos de espalhamento para cada

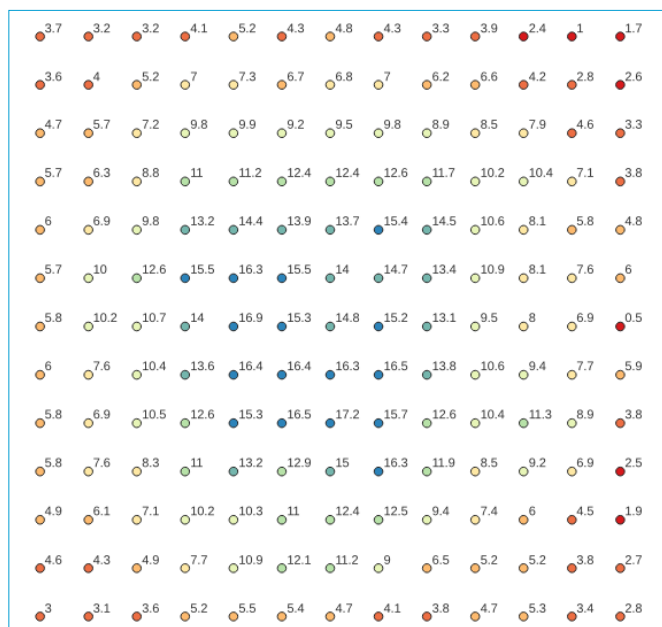


Figura 3 – Pontos e valores de lâmina de irrigação observados (em mm).

matriz de vizinhança, conforme apresentado na **Figura 4**, respectivamente para as definições de vizinhança associadas à Queen, distância máxima de 50, 100, 150 e 200 cm. Verifica-se que o maior valor deste índice se refere à distância de até 50 cm, com o valor de 0,87. Essa medida expressa a associação espacial para todo o conjunto de dados, indicando que, com o aumento da distância, a dependência espacial diminui. Em todos os índices de Moran, o p-valor simulado foi de 0,001, demonstrando significância estatística.

Para os mapas de autocorrelação local (**Figura 5**), observou-se o número de pontos por agrupamentos, listados na **Tabela 1**. Na **Figura 5**, o padrão Alto-alto, que indica pontos com valores acima da média, cuja vizinhança apresenta também esse comportamento, mantém-se na região central e aumenta conforme a distância da vizinhança considerada. De modo análogo, os pontos que apresentam o padrão Baixo-baixo (com valores menores que a média) aumentam à medida que a vizinhança é maior, exceto para o valor de 200 cm, que ultrapassaria o limite da associação espacial entre os pontos. Com essa análise, fica evidente que a dependência espacial, que separa a área em dois grupos distintos: a região central, que recebe irrigação acima da média, e a região próxima às bordas da estufa, com irrigação abaixo da média.

Para o semivariograma que apresentou melhor ajuste para os 169 pontos, foram determinados os seguintes parâmetros: distância máxima de 350 cm; lag de 50 cm; modelo gaussiano; efeito pepita igual a 0; patamar de 24,62; alcance de 319,28 cm.

O gráfico do semivariograma está apresentado na **Figura 6**, captura de tela do complemento Smart-Map, onde podem ser observados todos os parâmetros informados e o gráfico gerado para o modelo matemático gaussiano.

Foi obtido o coeficiente de determinação de 0,94 e a REM_Q de 1,03 na validação cruzada, cujo gráfico de dispersão está apresentado na **Figura 7**. O desvio padrão do mapa interpolado variou entre 0,002 e 0,04.

A área total interpolada foi de 36 m², e a área com lâminas de irrigação acima de 10 mm foi de 15,53 m², indicando uma área com irrigação uniforme correspondente a 43,1% da área total. O mapa interpolado está na **Figura 8**, onde é possível perceber o mesmo padrão de

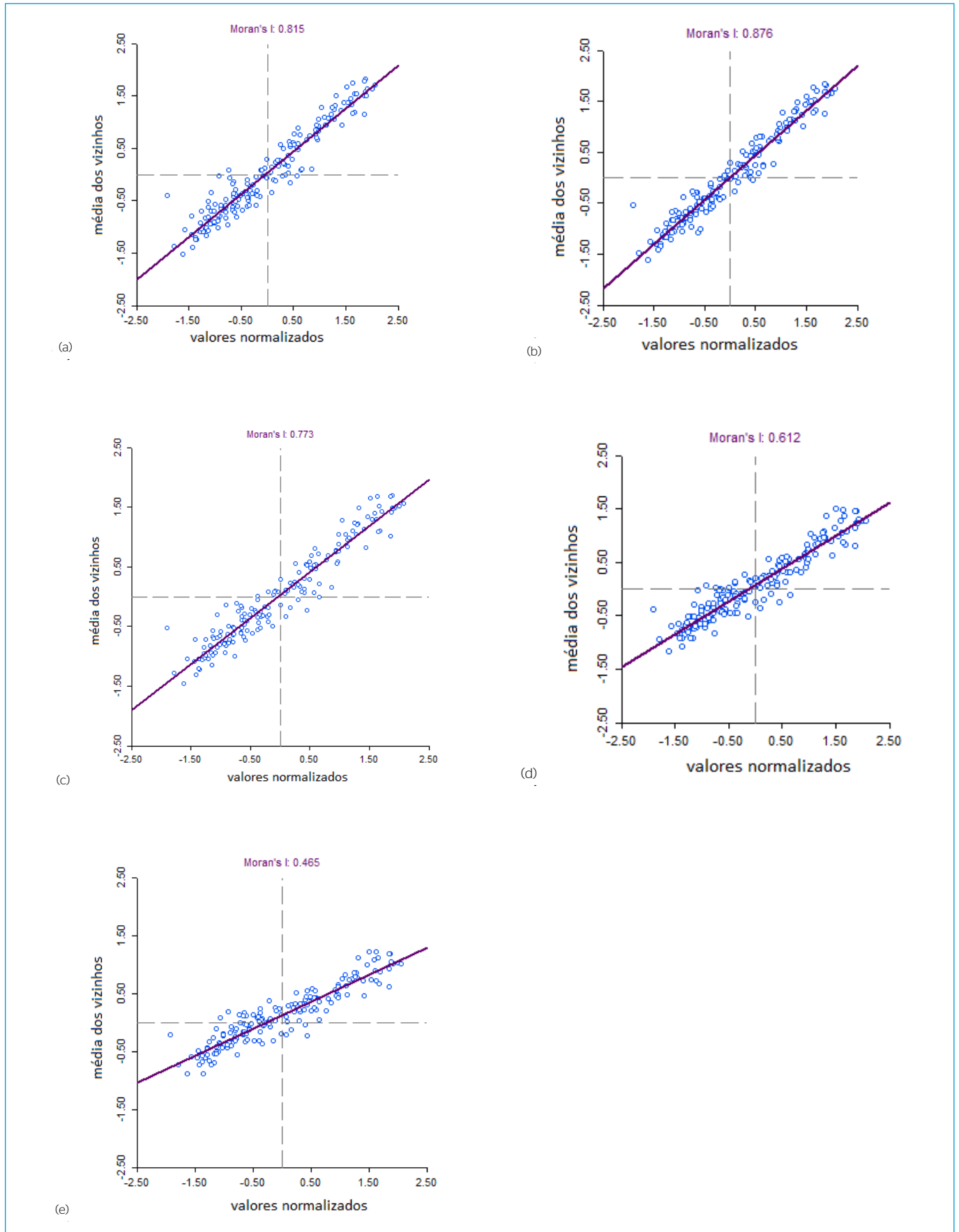


Figura 4 - Gráficos de espalhamento de Moran para cada vizinhança. (a) Queen; (b) 50 cm; (c) 100 cm; (d) 150 cm; (e) 200 cm.

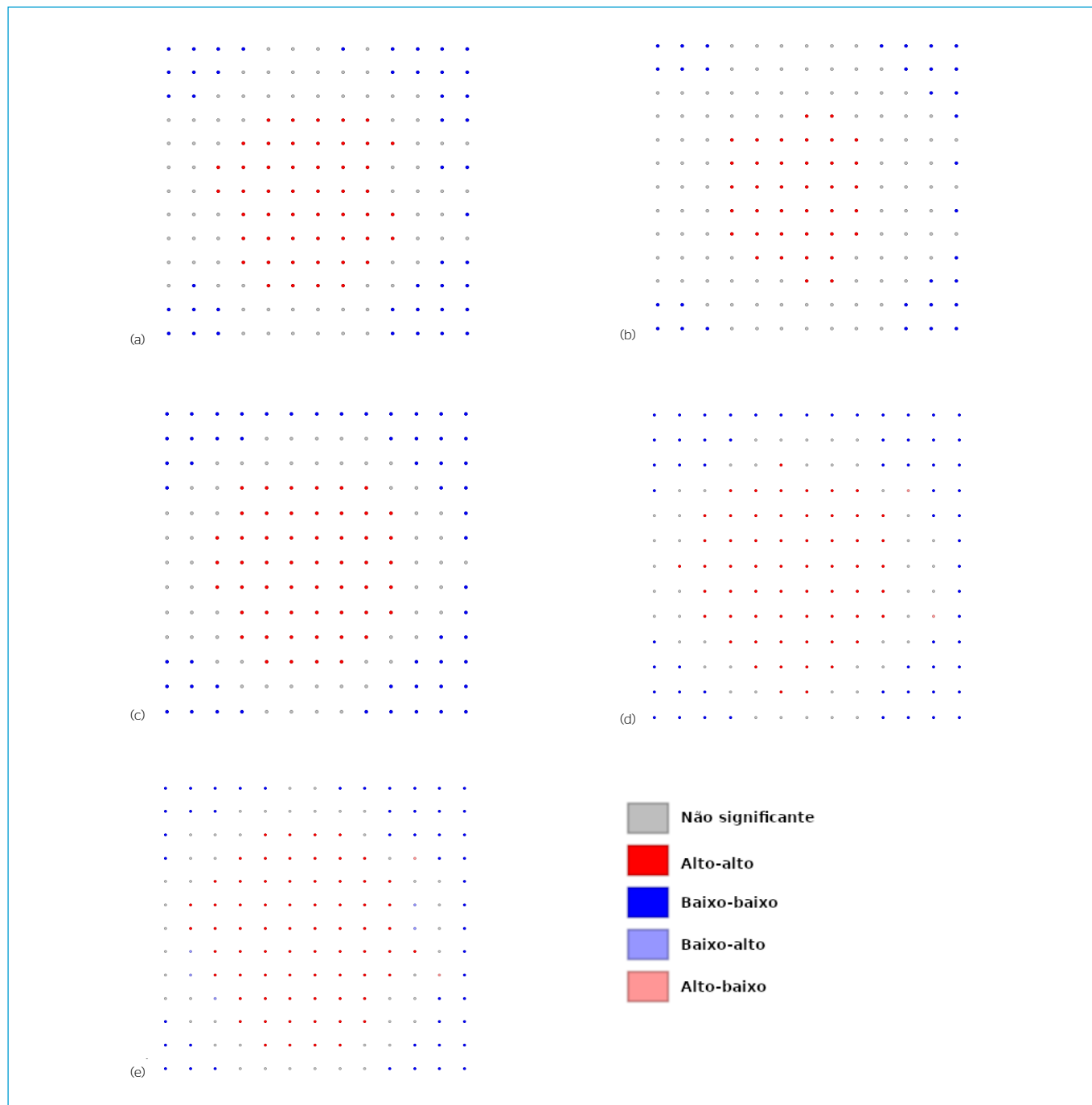


Figura 5 – Autocorrelação local (*Local Indicator of Spatial Association*) para cada métrica de distância avaliada. (a) Queen; (b) distância de 50 cm; (c) distância de 100 cm; (d) distância de 150 cm; (e) distância de 200 cm.

Tabela 1 – Número de pontos amostrais em cada categoria para o índice *Local Indicator of Spatial Association*.

Vizinhança	Alto-alto	Baixo-baixo	Baixo-alto	Alto-baixo	Não significante
Queen	50	45	0	0	74
Distância - 50 cm	38	32	0	0	99
Distância - 100 cm	54	56	0	0	59
Distância - 150 cm	60	60	0	2	47
Distância - 200 cm	69	48	5	2	45

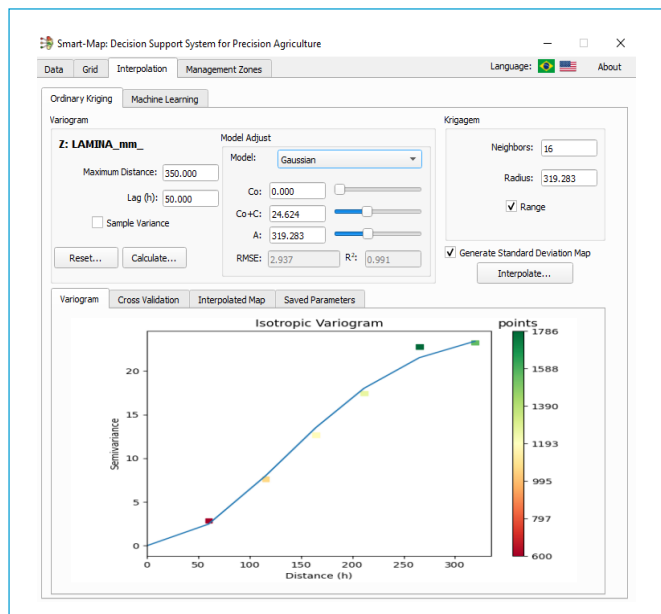


Figura 6 – Semivariograma ajustado com a ferramenta Smart-Map.

dependência espacial observado nos diagramas de autocorrelação local (LISA).

Em relação à análise de autocorrelação global, verifica-se que os valores do índice de Moran são maiores para as vizinhanças Queen e até 50 cm, sendo acima de 0,8. Isso indica que, ao analisar a variabilidade do total de pontos, valores semelhantes são encontrados apenas quando se considera poucos pontos próximos de lâmina de irrigação.

Quando se avalia apenas a autocorrelação local, dada pelo indicador LISA, percebe-se que o número máximo de pontos presentes nos grupos AA ou BB, que indicam valores semelhantes entre pontos próximos, é dado pela vizinhança de 150 cm, em que 120 pontos estavam em um desses grupos, de um total de 169 pontos. Desta forma, percebe-se forte dependência espacial ao considerar o raio de 150 cm no entorno de cada ponto, associada à presença de homogeneidade na irrigação e nos valores de lâmina de irrigação observados.

A partir do ajuste do semivariograma, obteve-se o valor para o parâmetro alcance de 350 cm e o coeficiente de determinação de validação cruzada bastante alto, demonstrando excelente relação entre valores preditos e observados.

Em termos da superfície interpolada, observou-se que a área uniforme com lâmina de irrigação acima de 10 mm foi baixa, denotando uma distribuição deficiente,

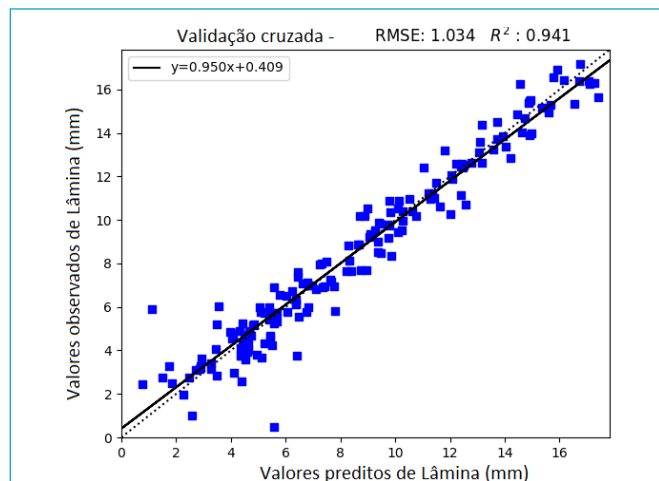


Figura 7 – Gráfico de dispersão entre valores preditos e observados (validação cruzada).

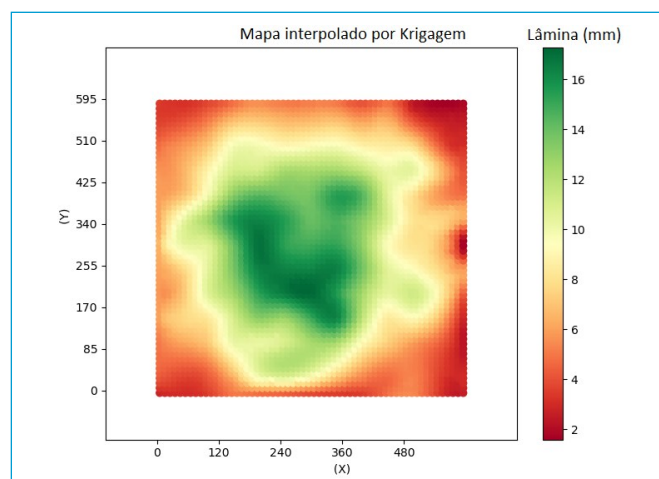


Figura 8 – Resultado da interpolação dos dados de lâmina d'água por krigagem.

o que confirma as informações de Silva, Azevedo e Lima (2002).

Os mesmos dados foram utilizados por Anami e Batista (2023), utilizando indicadores estatísticos para avaliação da uniformidade de irrigação em que foi verificado que somente a área de 12,25 m² tem coeficiente de uniformidade aceitável, com 23,75 m² considerados coeficientes inaceitáveis.

4. CONCLUSÃO

As análises realizadas indicaram que a área uniforme de irrigação representou apenas 43,1% do total, evidenciando a necessidade de modificar a estratégia adotada para garantir uma distribuição melhor da água na área.

Os métodos geoestatísticos possibilitaram a representação da superfície da lâmina de irrigação, estimando valores em locais não amostrados e proporcionando uma avaliação das incertezas pela variância da krigagem, destacando as vantagens dessa abordagem, como apontado por Andriotti (2002).

Outros arranjos no sistema de irrigação serão realizados para aumentar a área irrigada uniforme, como a utilização de outros modelos de microaspersores, variação da pressão na linha de irrigação, aumento do espaçamento dos aspersores, entre outros.

REFERÊNCIAS

- AGROJET. Bailarina de saída dupla com base de ½ polegada. 2018. Dados técnicos. Disponível em: <https://11nq.com/EFEAq>. Acesso em: 04 jul. 2022.
- ANAMI, M.H.; BATISTA, L.F.A. Avaliação da uniformidade de irrigação em área de cultivo protegido. In: *32º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (CBESA)*, Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2023.
- ANDRIOTTI, J.L.S. Notas de Geoestatística. *Acta Geologica Leopoldensia*, v. 25, n. 55, p. 3-14, 2002.
- ANSELIN, L. *Spatial data analysis with GIS: an introduction to application in the social sciences*. Santa Barbara: National Center for Geographic Information and Analysis; University of California, 1992.
- ANSELIN, L.; SYABRI, I.; KHO, Y. GeoDa: an introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*. v. 38, n. 1, p. 5-22, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x>
- AYRIMORAES, S.; FONTENELLE, T.H.; FERREIRA, D.A. Uso da água na agricultura irrigada no Brasil: panorama e estudos de planejamento da Agência Nacional de Águas. In: RODRIGUES, L.N.; ZACCARIA, D. *Agricultura Irrigada: um breve olhar*. Fortaleza: Inovagri, 2020, p. 98-104.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada*. 2. ed. Brasília: ANA, 2021, 130p.
- DRUCK, S.; CARVALHO, M.S.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A.V.M. (Eds.). *Análise espacial de dados geográficos*. Planaltina: Embrapa, 2004.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência E Agrotecnologia*, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014a. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>
- FERREIRA, M.C. *Iniciação à análise geoespacial*. São Paulo: Editora UNESP, 2014b, 343 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Acesso e uso de dados geoespaciais*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019, 147 p.
- ISAAKS, E.H.; SRISVASTAVA, R.M. *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989.
- NAKAMURA, R.; JUNIOR FERREIRA, R.A.; LOPES, R. *Geoestatística aplicada a lâminas de irrigação em diferentes espaçamentos entre aspersores*, Anais... Botucatu - SP: UNESP. ISSN: 2236-2118. Disponível em: <https://11nq.com/ahKGx>. Acesso em: 27 jul. 2022
- PEREIRA, G.W.; VALENTE, D.S.M.; QUEIROZ, D.M.D.; COELHO, A.L.D.F.; COSTA, M.M.; GRIFT, T. Smart-Map: an open-source QGIS Plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. *Agronomy*, v. 12, n. 6, p. 1350, 2022. <https://doi.org/10.3390/agronomy12061350>
- SILVA, E.M.; AZEVEDO, J.A.; LIMA, J.E.F.W. *Análise de desempenho da irrigação*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002, 84p.
- VALNIR JÚNIOR, M.V.; ROCHA, P.; DEMONTIEZO, F.L.L.; LIMA, L.S.S.; CARVALHO, C.M.; CARVALHO, L.L.S. Análise comparativa de metodologia de coleta de dados para avaliação de sistemas de irrigação localizada. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 10, n. 5, p. 965-975, 2016. <https://doi.org/10.7127/rbai.v10n500477>
- YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013, 215 p.
- YAMAMOTO, J.K. *Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais*. São Paulo: Gráfica Paulos, 2020, 308 p.