

Mapa auto-organizável de Kohonen para identificação de ideótipo agrônômico de grão-de-bico

Vithória M. Ortiz^{1†}, Alberto C. Filho², Murilo V. Loro¹, João Augusto Andretta³, Mikael B. dos Reis³, Bruno Raul Schuller³

¹ Discente do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

² Docente do Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Santa Maria.

³ Discente do Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

Resumo: Identificar um ideótipo de planta de grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) que maximize o desempenho produtivo, proporciona a melhor eficiência dos programas de melhoramento genético para o desenvolvimento de genótipos superiores. O objetivo deste trabalho foi identificar o ideótipo agrônômico de grão-de-bico de alto desempenho produtivo. Foram realizados ensaios de uniformidade com a cultura de grão-de-bico, cultivar BRS Cristalino, em Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul. Cada ensaio foi composto por quatro fileiras de plantas com 5 m de comprimento e espaçadas a 0,5 m entre fileiras. Em cada ensaio, foram marcadas, aleatoriamente, 20 plantas nas duas fileiras centrais, totalizando 160 plantas. Nessas plantas foram avaliados os caracteres: altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de nós (NN), número de ramificações primárias (NRP), número de ramificações secundárias (NRS), número de vagens sem grãos (NVSG), número de vagens com um grão (NV1G), número de vagens com dois grãos (NV2G), número de vagens (NV), número de grãos (NG) e produtividade de grãos (PROD). Foi utilizado o mapa auto-organizável de Kohonen, para identificar o ideótipo agrônômico de grão-de-bico. Utilizou-se a estrutura neural de dimensão 3×3 , obtendo-se nove neurônios. A topologia hexagonal foi utilizada para a configuração, e a organização dos dados foi realizada com 300 iterações. O ideótipo agrônômico de grão-de-bico que maximiza a produtividade de grãos é caracterizado por plantas com maiores valores de número de grãos, número de vagens, número de vagens com um grão e número de ramificações primárias e menores valores de número de vagens sem grãos, número de vagens com dois grãos, número de ramificações secundárias, número de nós, número de folhas e altura de planta.

Palavras-chave: *Cicer arietinum* L.; Datas de semeadura; Produtividade; Neurônios.

Kohonen self-organizing map for ideotype identification chickpea agronomic

Abstract: Identifying a chickpea (*Cicer arietinum* L.) plant ideotype that maximizes productive performance, provides the best efficiency of genetic improvement programs for the development of superior genotypes. The objective of this work was to identify the agronomic ideotype of chickpeas with high productive performance. Uniformity trials were carried out with the chickpea crop, cultivar BRS Cristalino, in Santa Maria, state of Rio Grande do Sul. Each trials was composed of four rows of plants 5 m long and spaced at 0.5 m between rows. In each trial, 20 plants were randomly marked in the two central rows, totaling 160 plants. The following characters were evaluated in these plants: plant height (PH), number of leaves (NL), number of nodes (NN), number of primary branches (NPB), number of secondary branches (NSB), number of pods without grains (NPWG), number of pods with one grain (NP1G), number of pods with two grains (NP2G), number of pods (NP), number of grains (NG) and grain productivity (PROD). Kohonen's self-organizing map was used to identify the agronomic ideotype of chickpea. A 3×3 neural structure was used, obtaining nine neurons. The hexagonal topology was used for the configuration, and the data organization was performed with 300 iterations. The chickpea agronomic ideotype that maximizes grain productivity is characterized by plants with higher values of number of grains, number of pods, number of pods with one grain and number of primary branches and lower values of number of pods without grains, number of pods with two grains, number of secondary branches, number of nodes, number of leaves and plant height.

Keywords: *Cicer arietinum* L.; Sowing dates; Productivity; Neurons.

[†] Autor correspondente: vithoria.ortiz159@gmail.com

Manuscrito recebido em: 13/08/2024

Manuscrito revisado em: 16/09/2024

Manuscrito aceito em: 03/10/2024

Introdução

O grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) é uma leguminosa pertencente à família Fabaceae, notável por seu elevado valor nutricional e amplamente utilizada na dieta humana, especialmente na Índia, que lidera a produção e consumo dessa cultura (RAO *et al.*, 2010; JUKANTI *et al.*, 2012).

No Brasil apesar de possuir potencial de aumentar a produção de grão-de-bico, ainda existem poucas pesquisas a respeito do desenvolvimento dessa cultura em diversas partes do país. Diante disso, a Embrapa passou a lançar cultivares de grão-de-bico no mercado a partir de 2015 (NASCIMENTO *et al.*, 2016), fomentando as pesquisas de grão-de-bico no país. Em pesquisas conduzidas a campo com a cultura de grão-de-bico, tem sido avaliados caracteres como o número de ramificações (ABDEREMANE *et al.*, 2023; NABATI *et al.*, 2023), número de vagens (AVELAR *et al.*, 2018a; AVELAR *et al.*, 2018b), número de grãos (AVELAR *et al.*, 2018a) e produtividade de grãos (AVELAR *et al.*, 2018a; AVELAR *et al.*, 2018b; NABATI *et al.*, 2023).

Um dos objetivos dos programas de melhoramento genético de grão-de-bico é desenvolver plantas com maior massa de grãos. Para isso, é necessário identificar um ideótipo agrônomico que combine a expressão de caracteres que maximize a massa de grãos das plantas. A utilização de metodologias, como o Mapa Auto-Organizável de Kohonen (KOHONEN, 2001), pode facilitar a identificação de ideótipos agrônomicos com alto desempenho produtivo. Este método promove a formação de um mapeamento topologicamente ordenado, onde neurônios se desenvolvem em decodificadores ou detectores específicos, organizados em uma rede neural artificial. Redes neurais artificiais são sistemas paralelos compostos por unidades de processamento simples (neurônios artificiais) que realizam cálculos matemáticos, geralmente não lineares (HAYKIN, 2001). O processo de formação desses mapeamentos é definido pelo algoritmo *Self-Organizing Map* (SOM) (KOHONEN, 2001).

Atualmente, os SOMs são considerados ferramentas essenciais em estatística multivariada e inteligência computacional, uma vez que seu algoritmo organiza dados de alta dimensionalidade em grupos com base em suas semelhanças (KOHONEN, 2001). Estudos demonstraram a aplicação da metodologia do mapa auto-organizável de Kohonen na cultura do grão-de-bico (GHAMARI, 2012), soja (COSTA *et al.*, 2022; SÁ *et al.*, 2022), milho (CLOVIS *et al.*, 2020) e na avaliação da população de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) na rizosfera de cafeeiros (MIRANDA *et al.*, 2015). No grão-de-bico, a metodologia foi utilizada para classificar sementes segundo comprimento, espessura e largura, mostrando eficácia na classificação (GHAMARI, 2012). Em soja, foi possível identificar grupos de cultivares com divergências no tipo de crescimento (COSTA *et al.*, 2022) e em caracteres morfológicos e produtivos, como altura da planta, número de vagens e massa de grãos (SÁ *et al.*, 2022). No tratamento de dados de avaliações da população de FMA na rizosfera de cafeeiro, a rede de Kohonen avaliou a relação entre tratamentos e variáveis do solo (MIRANDA *et al.*, 2015). No milho, o uso do mapa de Kohonen permitiu identificar genótipos com maior estabilidade e produtividade de grãos (CLOVIS *et al.*, 2020).

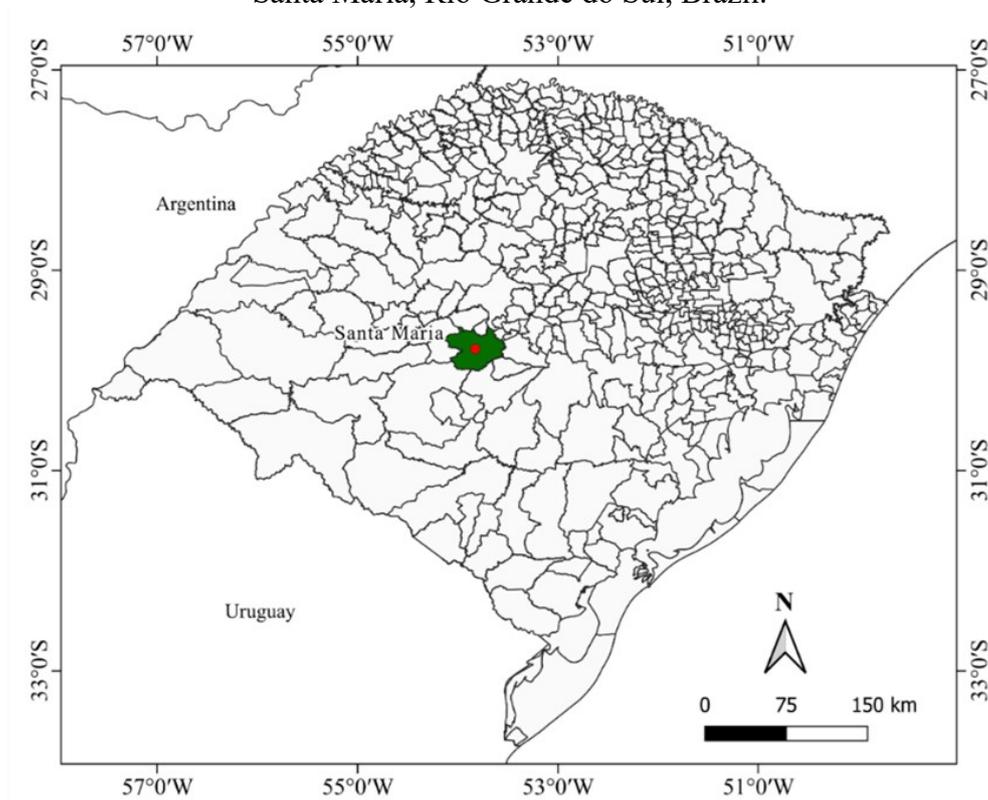
Ideótipos são representações teóricas ou modelos que ajudam a compreender comportamentos. O estudo de ideótipos fornece uma base teórica e prática para entender e alcançar a produtividade ideal das culturas. Identificar um ideótipo de planta de grão-de-bico que maximize o desempenho produtivo, proporciona a melhor eficiência dos programas de melhoramento genético para o desenvolvimento de genótipos superiores. A combinação de caracteres importantes em um genótipo poderá melhorar a sua adaptação a novos ambientes de cultivo. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi identificar um ideótipo agrônomico de grão-de-bico de alto desempenho produtivo.

Material e métodos

Foram conduzidos oito ensaios de uniformidade (experimentos sem tratamentos, em que a cultura e demais procedimentos realizados são homogêneos em toda a área experimental) com a cultura do grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.), cultivar BRS Cristalino, em área experimental localizada a 29°42'S, 53°49'W e a 95 m de altitude (Figura 1). O clima do local é Cfa subtropical úmido (ALVARES *et al.*, 2013) e o solo é Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (SANTOS *et al.*, 2018).

A análise do solo na profundidade de 0 - 20 cm revelou: pH água 1:1: 5,4, Ca: 6,1 cmolc dm⁻³, Mg: 2,3 cmolc dm⁻³, Al: 0,1 cmolc dm⁻³, H+Al: 6,2 cmolc dm⁻³, índice SMP: 5,7, matéria orgânica: 2,3%, teor de argila: 26,0%, S: 13,4 mg dm⁻³, P (Mehlich): 29,9 mg dm⁻³, K: 0,573 cmolc dm⁻³, CTCpH7: 15,2 cmolc dm⁻³, Cu: 2,4 mg dm⁻³, Zn: 1,04 mg dm⁻³ e B: 0,82 mg dm⁻³.

Figure 1: Geographical representation of the location where the uniformity trials were conducted in Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil.



Source: from the authors (2024).

Os oito ensaios de uniformidade (19/08/2022, 26/08/2022, 02/09/2022, 09/09/2022, 16/09/2022, 23/09/2022, 04/10/2022, 13/10/2022) foram constituídos de quatro fileiras com 5 m de comprimento ocupando área de 5 m × 16 m (80 m²). Todas as sementeiras de grão-de-bico foram realizadas manualmente, utilizando o espaçamento de 0,50 m entre fileiras e 16 sementes por metro de fileira.

Após a emergência das plântulas da parcela foram marcadas, aleatoriamente, 20 plantas em cada uma das datas de sementeira totalizando 160 plantas (20 plantas/data de sementeira × 8 datas

de semeadura), e avaliados os caracteres morfológicos altura de planta (AP), número de folhas (NF), número de nós (NN), número de ramificações primárias da planta (NRP) e número de ramificações secundárias da planta (NRS) até o estágio R3 de plena floração da cultura, onde a maior parte das flores está aberta. Quando as plantas atingiram o estágio reprodutivo R11 (90% das vagens maduras, com coloração amarelo-dourado) (CARVALHO *et al.*, 2021), realizou-se a colheita das plantas marcadas para avaliação dos caracteres produtivos número de vagens sem grãos (NVSG), número de vagens com um grão (NV1G), número de vagens com dois grãos (NV2G), número de vagens (NV = NVSG + NV1G + NV2G), número de grãos (NG = NV1G + NV2G × 2) e produtividade de grãos (em Mg ha⁻¹). As colheitas das datas de semeadura foram realizadas em 04/01/2023 para as datas de semeadura 19/08/2022 e 26/08/2022, 10/01/2023 para as datas de semeadura 02/09/2022 e 09/09/2022 e 20/01/2023 para as datas de semeadura 16/09/2022, 23/09/2022, 04/10/2022, 13/10/2022.

Para cada caractere calcularam-se os valores mínimos, médios e máximos e o coeficiente de variação. Para identificar o ideótipo agrônomico de grão-de-bico utilizou-se a metodologia do mapa auto-organizável de Kohonen (KOHONEN, 2001). Utilizou-se a estrutura neural de dimensão 3 × 3, obtendo-se nove neurônios. A topologia hexagonal foi utilizada para a configuração, e a organização dos dados foi realizada com 300 iterações. Durante esse processo, a taxa inicial de aprendizado de 0,05 foi reduzida gradativamente de forma linear até o valor de 0,01. Após, identificou-se o neurônio de maior potencial produtivo, caracterizado por ser o ideótipo agrônomico. Com os valores médios dos caracteres dos dois neurônios de maior desempenho e do neurônio de pior desempenho foi gerado um gráfico de linhas para evidenciar as diferenças na magnitude dos caracteres. Todas as análises foram realizadas por meio do software R (R CORE TEAM, 2024) utilizando o pacote *kohonen* (WEHRENS; KRUISSELBRINK, 2018).

Resultados e discussão

Os valores mínimos e máximos de altura de planta foram de 8,00 e 50,00 cm, respectivamente, entre os ensaios (Tabela 1). A média de altura de planta foi de 30,19 cm nos oito ensaios. Queiroga *et al.* (2021) observaram plantas de grão-de-bico com altura de até 70 cm. Os valores mínimo e máximo de número de folhas foram de 10 e 32 folhas, respectivamente. A média de número de folhas foi de 20,25 folhas nos oito ensaios.

Para o caractere número de nós (NN), os valores observados variaram de 11,00 a 34,00 nós, com uma média de 22,23 nós (Tabela 1). O número de ramificações primárias (NRP) variou de 1,00 a 3,00 ramificações, com uma média de 2,12 ramificações primárias. O número de ramificações secundárias (NRS) apresentou uma média de 2,69 ramificações secundárias. Observou-se que o número de ramificações em grão-de-bico varia conforme a cultivar, com a cultivar BRS Kalifa apresentando até cinco ramos principais e os nós inferiores da planta produzindo de 1 a 8 ramificações secundárias (CARVALHO *et al.*, 2021).

Table 1: Minimum, average, maximum values, and coefficient of variation (CV %) of the traits evaluated in chickpea (*Cicer arietinum L.*) plants, BRS Cristalino cultivar, across eight sowing dates.

Caracteres	Mínimo	Média	Máximo	CV (%)
AP	8,00	30,19	50,00	30,85
NF	10,00	20,25	32,00	19,80
NN	11,00	22,23	34,00	19,52
NR	1,00	2,12	3,00	30,58
NRS	0,00	2,69	13,00	83,27
NVSG	0,00	3,18	12,00	89,04
NV1G	1,00	16,16	45,00	59,32
NV2G	0,00	0,55	4,00	165,41
NV	2,00	19,89	58,00	58,03
NG	1,00	17,26	48,00	59,12
PROD	0,35	5,13	13,50	56,92

Source: from the authors (2024).

Legend: AP – altura de plantas (cm), NF – número de folhas, NN – número de nós, NR – número de ramificações, NRS – número de ramificações secundárias, NVSG – número de vagens sem grãos, NV1G – número de vagens com um grão, NV2G – número de vagens com dois grãos, NV – número de vagens, NG – número de grãos, PROD – produtividade (Mg ha⁻¹) em oito datas de semeadura.

Com relação ao caractere número de vagens sem grãos (NVSG), os valores mínimos e máximos foram de 0,00 e 12,00 vagens sem grãos nas oito datas de semeadura, com média de 3,18 vagens sem grãos. Para número de vagens com um grão (NV1G) os valores mínimos e máximos foram 1,00 e 45,00 vagens com um grão, respectivamente, com média de 16,16 vagens com um grão. O caractere número de vagens com dois grãos (NV2G) apresentou valores mínimo e máximo de 0,00 e 4,00 vagens com dois grãos, respectivamente, nas oito datas de semeadura, com média de 0,55 vagens com dois grãos. Em grão-de-bico o número de vagens com um e dois grãos variou de 10,50 a 85,90 vagens e de 1,40 a 11,60 vagens, respectivamente, em dois ambientes e três datas de semeadura em Minas Gerais (AVELAR *et al.* 2018b). A percentagem do número de vagens com um e dois grãos de grão-de-bico variou de 34 a 88%, com média de 78,73 e 12 a 66%, com média de 21,27%, respectivamente (AVELAR *et al.* 2018a).

Para o caractere número de vagens (NV) os valores mínimo e máximo foram de 2,00 e 58,00 vagens por planta, com média de 19,89 vagens. Na literatura já foram encontradas vagens com um a dois grãos, raramente três (SAJJA *et al.*, 2017), e até quatro grãos foram observados (NASCIMENTO *et al.*, 2016). Em outro estudo, o número de vagens por planta variou de 7,33 a 262 com média de 134,66 (NABATI *et al.*, 2023).

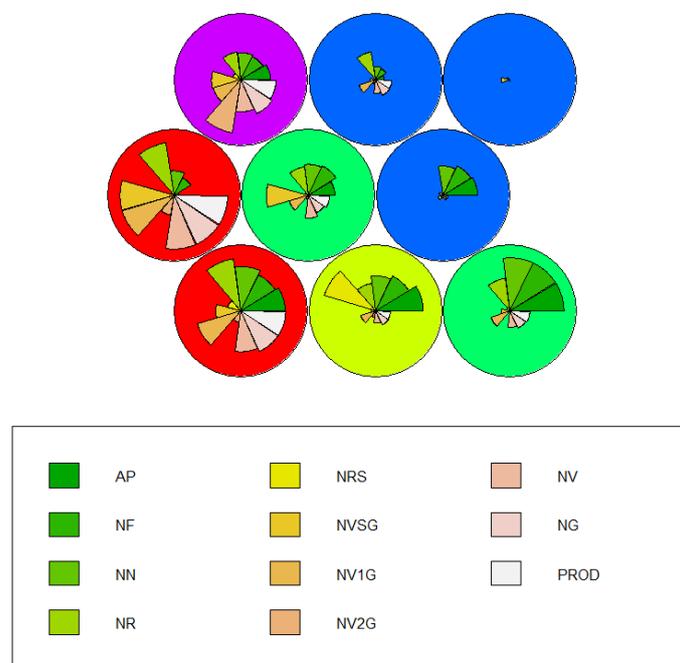
Para número de grãos (NG) os valores mínimo e máximo foram de 1,00 e 48,00 grãos, respectivamente com média de 17,26 grãos. O número de vagens de grão-de-bico depende da cultivar e das condições ambientais (SAJJA *et al.*, 2017; CARVALHO *et al.*, 2021). Em um experimento com a cultivar BRS Aleppo, conduzido em Minas Gerais, em três datas de semeadura e cinco períodos de colheita, o número de grãos variou de 41 a 147, com média de 79,20 grãos por planta (AVELAR *et al.*, 2018a). O caractere produtividade de grãos (PROD) apresentou valores mínimo e máximo de 0,35 e 13,50mg, respectivamente com média de 5,13mg. Em grão-de-bico a

média de produtividade de grãos foi de 5,76, 1,50 e 1,66 toneladas por hectare, respectivamente, em semeaduras em maio, junho e julho em Minas Gerais (AVELAR *et al.*, 2018a).

A respeito dos coeficientes de variação (CV, em %), estes variaram de 19,52 a 165,41%, e de acordo com as faixas de classificação estabelecidas por Pimentel-Gomes (2009), para ensaios agrícolas de campo, esses coeficientes de variação situam-se nas classes de baixa ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito baixa ($CV > 30\%$) precisão experimental.

Foi observada a capacidade de agrupamento das plantas em nove neurônios (Figura 2). Esses neurônios foram formados por plantas com similaridade nas magnitudes dos caracteres avaliados. Os neurônios 1 e 4 apresentaram maior divergência em relação aos neurônios vizinhos e exibiram o maior desempenho produtivo. O neurônio 1 foi caracterizado por plantas com altos valores de AP, NF, NN, NR, NV, NG e PROD e baixos valores de NRS, NVSG e NV1G. O neurônio 4, por sua vez, incluiu plantas com altos valores de NG, NV, NV1G, NVSG, NR e PROD, mas baixos valores de NV2G, NRS, NN, NF e AP. No neurônio 4, a associação entre um maior número de NVSG e uma maior PROD foi observada devido à correlação entre NV e NVSG, ou seja, quanto maior o NV, maior tende a ser o NVSG. Portanto, o NVSG foi desconsiderado na formação do ideótipo agrônomo de grão-de-bico. Menores alturas de plantas relacionadas a baixas produtividades foram igualmente observadas em estudos com soja utilizando a mesma metodologia (SÁ *et al.*, 2022). Esses resultados levaram à formação de agrupamentos de plantas com distintas magnitudes dos caracteres, facilitando a seleção de plantas para melhoramento.

Figure 2: Identification of the agronomic ideotype of chickpea, BRS Cristalino cultivar, using a Kohonen self-organizing map.



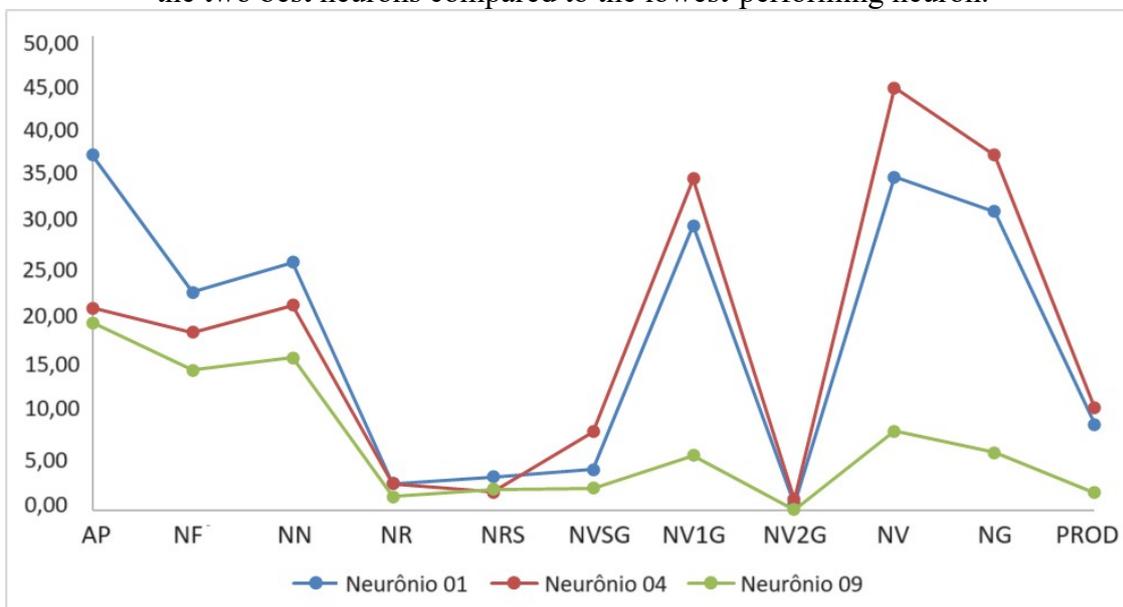
Source: from the authors (2024).

Altos níveis de PROD estão associados a plantas que apresentam maiores valores de NG, NV, NV1G e NRP. Sá *et al.* (2022) em estudo sobre a dissimilaridade genética entre genótipos de soja identificaram que altos valores de número de vagens são indicadores significativos de produtividade em cultivares de soja, destacando a importância desse caráter para o rendimento da cultura.

Em estudo de diversidade genética em soja, Costa *et al.* (2022) utilizaram o mapa auto-organizável de Kohonen para identificar a proximidade entre neurônios de diferentes cultivares de soja. Os autores concluíram que a alta diversidade de caracteres reflete uma base genética ampla para a soja no Brasil. Clovis *et al.* (2020) demonstraram que a aplicação de redes neurais artificiais se revelou prática e eficiente na análise do rendimento de grãos de híbridos de milho. Em estudo com Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) na rizosfera de cafeeiro, o uso de redes neurais aplicadas sobre o SOM foi capaz de separar os agrupamentos, o que permitiu a interpretação do comportamento da simbiose dos FMA em relação às variáveis em estudo (MIRANDA *et al.*, 2015).

Na Figura 3, os neurônios 1 e 4 foram destacados como os melhores em comparação com o neurônio 9, o qual apresentou o menor desempenho para o caractere PROD. Observa-se que, de modo geral, os neurônios 1 e 4 apresentaram semelhança em todas as variáveis analisadas, mas se destacaram nas variáveis 7 (NV1G), 8 (NV2G), 9 (NV) e 10 (NG), em comparação com o neurônio 9. Isso sugere que essas variáveis são determinantes para a expressão do potencial produtivo máximo de grão-de-bico. Ferreira *et al.* (2018) corroboraram que as redes *Self-Organizing Map* (SOM) (KOHONEN, 2001) podem oferecer resultados mais precisos e informativos em comparação com análises de agrupamento tradicionais.

Figure 3: Average performance of chickpea plants (*Cicer arietinum L.*), BRS Cristalino cultivar, in the two best neurons compared to the lowest-performing neuron.



Source: From the authors (2024).

Legend: AP – altura de plantas (cm), 2: NF – número de folhas, 3: NN – número de nós, 4: NR – número de ramificações, 5: NRS – número de ramificações secundárias, 6: NVSG – número de vagens sem grãos, 7: NV1G – número de vagens com um grão, 8: NV2G – número de vagens com dois grãos, 9: NV – número de vagens, 10: NG – número de grãos, 11: PROD – produtividade (Mg ha⁻¹) em oito datas de semeadura.

Conclusões

O ideótipo agronômico de grão-de-bico que maximiza a produtividade de grãos é caracterizado por plantas com maiores valores de número de grãos, número de vagens, número de vagens com um grão e número de ramificações principais da planta e menores valores de número de vagens sem grãos, número de vagens com dois grãos, número de ramificações secundárias da planta, número de nós, número de folhas e altura de planta.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Processo 304878/2022-7), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes, Finance Code 001) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (Fapergs) pela concessão de bolsas aos autores.

Referências

- ABDEREMANE, B.A. et al. Evaluation of the Productive Potential of a World Collection of Chickpeas (*Cicer arietinum* L.) for the Initiation of Breeding Programs for Adaptation to Conservation Agriculture. *Sustainability*, v.15, p.11927, 2023. DOI: 10.3390/su151511927.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- AVELAR, R. I. S. et al. Production and quality of chickpea seeds in different sowing and harvest periods. *Journal of Seed Science*, v. 40, p. 146-155, 2018a. DOI: 10.1590/2317-1545v40n2185719.
- AVELAR, R. I. S. et al. Yield of chickpeas sown at different times. *Revista Caatinga*, v. 31, p. 900-906, 2018b. DOI: 10.1590/1983-21252018v31n412rc.
- CARGNELUTTI FILHO, A. et al. Correlação e regressão linear entre caracteres de grão-de-bico. *Caderno Pedagógico*, v. 21, e3555, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n4-013.
- CHAUDHARY, V. et al. A novel self-organizing map (SOM) learning algorithm with nearest and farthest neurons. *Alexandria Engineering Journal*, v. 53, p. 827-831, 2014. DOI: 10.1016/j.aej.2014.09.007.
- CLOVIS, L. R. et al. Yield stability analysis of maize hybrids using the self-organizing map of Kohonen. *Euphytica*, v. 216, n. 161, 2020. DOI: 10.1007/s10681-020-02683-x.
- COSTA, W. G. et al. Genetic diversity and interaction between the maintainers of commercial soybean cultivars using self-organizing maps. *Crop Science*, v. 62, p. 2233-2245, 2022. DOI: 10.1002/csc2.20816.

- FERREIRA, F. et al. SSR-based genetic analysis of sweet corn inbred lines using artificial neural networks. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 18, p. 309-313, 2018. DOI: 10.1590/1984-70332018v18n3n45.
- GHAMARI, S. Classification of chickpea seeds using supervised and unsupervised artificial neural networks. *African Journal of Agricultural Research*, v. 7, p. 3193-3201, 2012. DOI: 10.5897/AJAR11.2071.
- HAYKIN, S. *Redes Neurais: Princípios e Prática*. Bookman, Ed. 2, 898p., 2001.
- JUKANTI, A. et al. Nutritional quality and health benefits of chickpea (*Cicer arietinum* L.): A review. *British Journal of Nutrition*, v. 108, p. 11-26, 2012. DOI: 10.1017/S0007114512000797.
- KOHONEN, T. *Self-Organizing Maps*. Springer-Verlag, Ed. 3, 501p., 2001.
- MIRANDA, V. F. L. et al. Rede Neural artificial aplicada na avaliação da População de Fungos Micorrízicos Arbusculares na Rizosfera de Cafeeiros. *Sigmae*, v. 4, p. 24-30, 2015. Disponível em: <https://publicacoes.unifal-mg.edu.br/revistas/index.php/sigmae/article/view/240>.
- MOREIRA, E. G. S. Grão-de-bico cultivado sob condições de manejo em sequeiro e irrigado. 2020. 81p. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Universidade Estadual de Goiás.
- NABATI, J. et al. Identification of diverse agronomic traits in chickpea (*Cicer arietinum* L.) germplasm lines to use in crop improvement. *Legume Science*, v. 5, e167, 2023. DOI: 10.1002/leg3.167.
- NASCIMENTO, W. M. et al. Grão-de-bico. In: Nascimento, W. M. [ed.]. *Hortaliças leguminosas*. Brasília: Embrapa, p. 89-118, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1054423/hortalicas-leguminosas>.
- PIMENTEL-GOMES, F. *Curso de estatística experimental*, Piracicaba-FEALQ, Ed. 15, 451p., 2009.
- QUEIROGA, V. P. et al. *Grão de bico (Cicer arietinum L.) tecnologias de plantio e utilização*. AREPB, Ed 1., 199p., 2021.
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. 2024. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- RAO, P. P. et al. *Chickpea and Pigeon pea Economies in Asia: Facts, Trends, and Outlook*. International Crop Reserarch Institute for the Semi-Arid Tropics, Ed 1, 76p., 2010.
- SÁ, L. G. et al. Kohonen's self-organizing maps for the study of genetic dissimilarity among soybean cultivars and genotypes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 57, e02722, 2022. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02722.

SANTOS, H. G. et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Brasília: Embrapa, Ed 5, 356p., 2018.

SWAMY, K. R. M. Origin, domestication, taxonomy, botanical description, genetics and cytogenetics, genetic diversity and breeding of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *International Journal of Development Research*, v. 13, p. 63107-63127, 2023. DOI: 10.37118/ijdr.26892.06.2023.

WEHRENS, R.; KRUISSELBRINK, J. Flexible Self-Organizing Maps in kohonen 3.0. *Journal of Statistical Software*, v. 87, p. 1-18, 2018. DOI: 10.18637/jss.v087.i07.

YADAV, S. S. et al. *Chickpea breeding and management*. CABI, 664p., 2007.