



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE
FEIRA DE SANTANA**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
RECURSOS GENÉTICOS VEGETAIS**

LUCAS SILVA DOS SANTOS

**IDENTIFICAÇÃO MOLECULAR DO LOCUS
RESTAURADOR DA MACHO-FERTILIDADE E TIPO DE
CITOPLASMA EM POPULAÇÕES DE CEBOLA, E
ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE HÍBRIDOS DE
CEBOLA TROPICAL**

Feira de Santana - BA

2026

LUCAS SILVA DOS SANTOS

**IDENTIFICAÇÃO MOLECULAR DO LOCUS
RESTAURADOR DA MACHO-FERTILIDADE E TIPO DE
CITOPLASMA EM POPULAÇÕES DE CEBOLA, E
ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE HÍBRIDOS DE
CEBOLA TROPICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Recursos Genéticos Vegetais, da Universidade
Estadual de Feira de Santana como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Recursos Genéticos
Vegetais.

Orientador: Prof. PhD Carlos Antônio Fernandes Santos

Feira de Santana - BA

2026

Ficha Catalográfica - Biblioteca Central Julieta Carteadó - UEFS

S236

Santos, Lucas Silva dos

Identificação molecular do locus restaurador da macho-fertilidade e tipo de citoplasma em populações de cebola, e adaptabilidade e estabilidade de híbridos de cebola tropical / Lucas Silva dos Santos. – 2026.

72 f.: il.

Orientador: Carlos Antônio Fernandes Santos

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Feira de Santana, 2026.

1.Agricultura familiar. 2.Allium cepa. 3.Sistema de Macho-Esterilidade Citoplasmática (CMS). 4.Marcadores moleculares. 5.Interação G×E. 6.Melhoramento genético. 7. Semiárido. I. Santos, Carlos Antônio Fernandes, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU 635.25

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **DANILLO OLEGARIO MATOS DA SILVA**
Data: 05/03/2026 18:08:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Danillo Olegário Matos Da Silva (Centro Universitário
Maurício de Nassau -UNINASSAU)

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ CLAUDIO COSTA SILVA**
Data: 06/03/2026 10:41:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Cláudio Costa Silva (Universidade Estadual
de Feira de Santana - UEFS)

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS ANTONIO FERNANDES SANTOS**
Data: 05/03/2026 17:20:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Antonio Fernandes Santos (Embrapa
Semiárido/CPATSA) Orientador e
Presidente da banca

Feira de Santana - BA

2026

*À meu Deus por toda força e sustento que tive ate aqui, a minha familia por
todo apoio incentivo, cuidado e carinho comigo por todo esse tempo*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida e pela força para superar os obstáculos ao longo desta jornada.

Aos meus pais e à minha esposa, Ana Katarina, por estarem ao meu lado em todos os momentos, sempre me oferecendo apoio, incentivo e encorajando-me a dar o meu melhor e a nunca desistir dos meus objetivos. Agradeço imensamente a toda a minha família, em especial aos meus pais, a quem dedico e dedicarei todas as minhas vitórias; ao meu irmão, por ser meu amigo e parceiro de todas as horas; à minha avó e às minhas tias, por todas as mensagens de carinho. Meus sinceros agradecimentos a todos pelo amor incondicional, pelo incentivo constante e por serem meu porto seguro em todos os momentos.

Ao meu orientador, Dr. Carlos Antônio Fernandes Santos, pela oportunidade, pela partilha de seu conhecimento e experiência, e por toda a orientação e apoio fundamentais para o desenvolvimento e a conclusão desta pesquisa.

À Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), pela oportunidade de realização do curso, e aos professores do Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, pelos ensinamentos compartilhados ao longo dessa trajetória.

À Embrapa Semiárido, por disponibilizar a estrutura física, o espaço e o apoio logístico indispensáveis à execução das atividades de pesquisa, bem como aos técnicos e trabalhadores de campo do Campo Experimental de Bebedouro, pelo auxílio valioso no manejo e na condução dos experimentos.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Genética, Luiz Gabriel, pela grande parceria e amizade; Ana Luiza, Sheiça Karine e Deyvid Levi, por toda a ajuda, parceria e boas risadas; e também Raira Carine e Tatiane Carvalho, pela parceria e empenho nos estudos com a cultura da cebola.

Às minhas parceiras de mestrado, Ane, Bárbara e Tiffany, por todos os “perrengues” superados e desafios vencidos juntas. Agradeço também a todos os demais estudantes que passaram pelo laboratório e contribuíram, de alguma forma, para o meu trabalho, tornando os dias mais leves e agradáveis.

Um agradecimento especial aos meus amigos e técnicos, Carlos Antônio da Silva e Herbert Mouse, por terem sido meu socorro em diversas ocasiões. Obrigado pela paciência, pela competência e por serem excelentes profissionais. Ao Carlos, em especial, minha gratidão por

ser esse ser humano sensacional, por todo o conhecimento técnico compartilhado e, sobretudo, pelos ensinamentos de vida.

Agradeço também a mim mesmo, pela resiliência demonstrada ao longo dessa caminhada. Pela força e disciplina incansáveis e por, mesmo nos momentos mais difíceis, ter mantido a convicção de que seria possível alcançar este objetivo.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.”

Meus sinceros agradecimentos!

“É justo que muito custe o que
muito vale”.

Santa Teresa D'Ávila.

RESUMO

O Brasil figura entre os maiores produtores mundiais de cebola (*Allium cepa* L.), cultura de expressiva importância econômica e social, especialmente para a agricultura familiar do Semiárido. A cebolicultura nacional enfrenta o desafio da alta dependência de sementes híbridas importadas, onerando os custos de produção, restringindo materiais adaptados às condições edafoclimáticas locais e comprometendo a autonomia tecnológica do setor. Nesse contexto, o desenvolvimento de híbridos nacionais adaptados às diferentes regiões produtoras constitui uma necessidade estratégica para a cadeia produtiva. Este trabalho objetivou caracterizar molecularmente populações de cebola para identificação de linhagens parentais e avaliar a adaptabilidade e estabilidade de híbridos experimentais no Semiárido. Na etapa molecular, utilizaram-se marcadores mitocondriais e nucleares em sete populações. Os resultados identificaram a cultivar IPA 10 como fonte de citoplasma normal (N) e genótipo nuclear *msms*, validando-a como linhagem mantenedora ("B"). As populações 'BRS Rio Vale' e 'BRS Carrancas' apresentaram citoplasma estéril (S), qualificando-se como fontes de linhagens macho-estéreis ("A"). Na etapa agrônômica, avaliou-se a produtividade comercial de 12 híbridos experimentais e três testemunhas em oito ambientes nos estados da Bahia e Pernambuco. As análises de variância, regressão linear e AMMI revelaram interação genótipo $\times$ ambiente significativa. Os híbridos EPCEB20H037 e EHCEB21H0507 destacaram-se com produtividades médias de 40,2 t/ha e 39,9 t/ha, respectivamente, apresentando ampla adaptabilidade e estabilidade produtiva. Conclui-se que a integração da seleção assistida por marcadores com avaliações multiambientais viabiliza o desenvolvimento de híbridos nacionais competitivos, com potencial para reduzir custos e ampliar a autonomia tecnológica no Vale do São Francisco.

Palavras-chave: *Allium cepa*. CMS. Marcadores moleculares. Interação G $\times$ E. Melhoramento genético.

ABSTRACT

Brazil ranks among the world's leading producers of onions (*Allium cepa* L.), a crop of significant economic and social importance, especially for family farming in the Semi-Arid region. The national onion industry faces the challenge of heavy reliance on imported hybrid seeds, which drives up production costs, limits the availability of materials adapted to local soil and climate conditions, and undermines the sector's technological autonomy. In this context, the development of domestic hybrids adapted to different growing regions is a strategic necessity for the production chain. This study aimed to molecularly characterize onion populations to identify parental lines and evaluate the adaptability and stability of experimental hybrids in the Semi-Arid region. In the molecular stage, mitochondrial and nuclear markers were used in seven populations. The results identified the IPA 10 cultivar as a source of normal cytoplasm (N) and an *msms* nuclear genotype, validating it as a maintainer line ("B"). The 'BRS Rio Vale' and 'BRS Carrancas' populations exhibited sterile cytoplasm (S), qualifying them as sources of male-sterile lines ("A"). In the agronomic stage, the commercial yield of 12 experimental hybrids and three controls was evaluated across eight environments in the states of Bahia and Pernambuco. Analysis of variance, linear regression, and AMMI analyses revealed a significant genotype $\times$ environment interaction. The hybrids EPCEB20H037 and EHCEB21H0507 stood out with average yields of 40.2 t/ha and 39.9 t/ha, respectively, demonstrating broad adaptability and yield stability. It is concluded that the integration of marker-assisted selection with multi-environmental evaluations enables the development of competitive national hybrids, with the potential to reduce costs and expand technological autonomy in the São Francisco Valley.

Key words: *Allium cepa*. CMS. Molecular markers. G $\times$ E Interaction. Plant breeding.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	12
REVISÃO DE LITERATURA	14
REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO I- IDENTIFICAÇÃO MOLECULAR DO LOCUS RESTAURADOR DA MACHO-FERTILIDADE E TIPO DE CITOPLASMA EM POPULAÇÕES DE CEBOLA	30
1.1 Introdução	34
1.2 Material e Métodos	34
1.3 Resultados	36
1.4 Discussão	38
1.5 Conclusão	42
1.6 Referências	43
CAPÍTULO II - ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE HÍBRIDOS DE CEBOLA TROPICAL PARA PRODUÇÃO DE BULBOS COMERCIAIS	53
2.1 Introdução	55
2.2 Material e Métodos	56
2.3 Resultados	58
2.4 Discussão	60
2.5 Conclusão	63
2.6 Referências	64
CONSIDERAÇÕES FINAIS	72

INTRODUÇÃO GERAL

A cultura da cebola possui grande relevância econômica e social no Brasil, especialmente no Nordeste, onde agricultores familiares dependem da produção para geração de renda. Apesar da maior produtividade, uniformidade e precocidade dos híbridos, o uso de populações de polinização aberta (OP) ainda é expressivo em virtude do elevado custo das sementes híbridas importadas e da pouca divulgação do desempenho agrônomo dos híbridos (SANTOS et al., 2012; NUNES et al., 2014; SILVA; MENDES, 2025). Nesse cenário, torna-se estratégico o desenvolvimento de híbridos nacionais adaptados às condições edafoclimáticas e socioeconômicas locais, capazes de reduzir custos de produção e ampliar a competitividade dos agricultores.

Para a produção de sementes híbridas de cebola, são utilizados os sistemas CMS-S e CMS-T de esterilidade nuclear-citoplasmática (HAVEY, 2000). O desenvolvimento convencional de híbridos requer de 10 a 12 anos para transferência do genoma por retrocruzamentos (KHOSA et al., 2016), podendo esse tempo ser reduzido em 50% com a vernalização de bulbos em câmara fria, como ocorre no semiárido brasileiro (SANTOS et al., 2012). A identificação dos citoplasmas fértil ('N') e estéreis ('S' e 'T') foi facilitada com marcadores moleculares 5'cob, orfA501 (SATO, 1998; ENGELKE et al., 2003) e orf725 (KIM et al., 2009), enquanto Huo et al. (2015) e Kim et al. (2015) reportaram marcadores para o locus restaurador da macho-fertilidade (Ms), viabilizando a completa identificação de linhas 'A' e 'B' no sistema CMS-S (SHARMA et al., 2024). A coloração de anteras com carmim acético complementa essa triagem por ser de fácil aplicação, baixo custo e alta confirmação de resultados quando comparada a marcadores de DNA específicos (FERREIRA, 2017).

A heterose, ou vigor híbrido, representa a superioridade fenotípica dos híbridos em relação aos progenitores e é particularmente relevante na cebola devido à sua alta depressão por endogamia. Quando linhagens geneticamente divergentes são cruzadas, os híbridos podem superar os progenitores em produtividade, uniformidade e resistência a estresses ambientais e doenças (SANTOS, 2013), características essenciais em regiões de clima adverso como o semiárido nordestino (SOUZA et al., 2026). A exploração eficiente da heterose depende da identificação de genitores geneticamente contrastantes, reforçando a importância do screening molecular como ferramenta para identificar genótipos e marcadores de interesse com maior precisão e menor influência de fatores ambientais. No melhoramento da cebola, a aplicação de marcadores associados ao citoplasma masculino estéril e ao locus restaurador da fertilidade

viabiliza a triagem precoce e a exclusão de plantas indesejadas antes de cruzamentos extensivos (SATO, 1998; ENGELKE et al., 2003; KIM et al., 2009; HAVEY; KIM, 2021).

Diante desse contexto, a integração entre abordagens moleculares e avaliações agronômicas mostra-se estratégica para acelerar a identificação de material parental promissor e selecionar híbridos adequados às condições socioeconômicas e ambientais do Vale do São Francisco. O presente estudo analisou mais de 60 indivíduos por população para determinar quais plantas podem ser utilizadas como linhas A (macho-estéreis) ou B (mantenedoras da fertilidade), gerando dados de maior robustez estatística e biológica. A dissertação está dividida em dois capítulos: o primeiro apresenta o screening molecular de sete populações de cebola, e o segundo contempla a avaliação da interação genótipo $\times$ ambiente em híbridos experimentais de cebola.

OBJETIVOS

Geral

Identificar linhas estéreis ('A') e linhas mantenedoras da macho-fertilidade ('B') em populações de cebola com apoio da seleção assistida por marcadores moleculares, bem como avaliar a adaptabilidade e a estabilidade de híbridos experimentais de cebola nas condições socioeconômicas e ambientais do Vale do São Francisco.

Específicos

- Caracterizar sete populações de cebola quanto ao tipo de citoplasma e ao locus restaurador da macho-fertilidade, visando à identificação de plantas com potencial para constituição de linhas 'A' e 'B'.
- Avaliar a adaptabilidade e a estabilidade de híbridos experimentais de cebola em condições de cultivo do semiárido nordestino.

REVISÃO DE LITERATURA

O cultivo de cebola e seus impactos sociais e econômicos

A cebola (*Allium cepa* (Mill.) Prokh). (Amaryllidaceae) pertence a um pequeno grupo dentro do gênero *Allium* L. que inclui dez espécies selvagens e outra espécie cultivada economicamente importante, *A. fistulosum* L. (cebolinha), com centro de origem, provavelmente, em cadeias montanhosas da Ásia Central, Irã e Paquistão (YUSUPOV et al., 2020). A espécie foi incorporada em plantios no Brasil com a vinda de imigrantes recém-chegados da Europa, mais precisamente os portugueses, com o início do manejo da espécie em Pelotas, no Rio Grande do Sul, no início do século XIX (FRANÇA; CANDEIA, 1997). O cultivo desta hortaliça constitui uma cultura de suma importância socioeconômica para pequenos agricultores, tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento, desempenhando um papel fundamental na segurança alimentar familiar, na geração de renda e no combate à pobreza rural (Kebede et al., 2023; Stathers et al., 2024).

De acordo com a FAO (2022), os principais produtores mundiais de cebola concentram-se no continente asiático, responsável por 68,5% da produção global. Destacam-se a Índia e a China, com produções de 31.687.000 e 24.692.492 toneladas, respectivamente. No continente americano, o Brasil ocupa a segunda posição em volume de produção, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. A produção de cebola em 2022 foi de 1.656.076 t, colhida em área 48.895 ha, com produtividade de 33,87 t/ha (IBGE, 2022). Na África, a produção de cebola emergiu como uma importante cultura comercial, com a adoção de variedades melhoradas e boas práticas agrícolas, resultando em aumentos de produtividade que variam de 30% a 400%, melhorando substancialmente a renda anual dos agricultores e a diversidade alimentar nas comunidades rurais (Kebede et al., 2023; ASNAPP/PNUD, 2024).

A importância nutricional da cebola vai além do seu valor culinário, pois representa um vegetal essencial para o consumo alimentar familiar e contribui significativamente para a diversidade alimentar e a ingestão de micronutrientes em populações vulneráveis, particularmente em regiões que enfrentam desafios de segurança alimentar e nutricional (Stathers et al., 2024; FAO/FSIN, 2025).

No Brasil, a produção de cebola envolve diretamente muitas famílias de agricultores, com a cultura gerando um valor de mercado estimado em mais de US\$ 1,15 bilhão anualmente, representando aproximadamente 5% do valor de mercado de hortaliças frescas da América Latina e constituindo a hortaliça com o maior valor bruto de produção entre as culturas

hortícolas (TORESAN et al, 2025). No Nordeste os estados da Bahia e do Pernambuco têm grande destaque e respondem por 16,8% e 3,2%, respectivamente, da produção nacional de cebola em 2022 (IBGE, 2022).

Aspectos Botânicos

A espécie *A. cepa* é classificada como uma monocotiledônea herbácea, alcançando cerca de 60 cm de altura (**Figura. 1**). Caracteriza-se por folhas longas e cilíndricas, que podem ou não apresentar revestimento ceroso e se distribuem alternadamente em duas linhas distintas. As bases dessas folhas (bainhas) formam uma estrutura sólida, frequentemente chamada de caule, mas que é, de fato, um pseudocaule. O verdadeiro caule se localiza no subsolo, sendo um disco de formato achatado na porção inferior do bulbo (FILGUEIRA, 2008).



Figura 1. Detalhe da *A. cepa* plantada por bulbos: (A) Início do desenvolvimento (B) e (C) estágio reprodutivo. Foto: Carlos Silva

O androceu da flor de *A. cepa* é composto por seis estames, arranjados em verticilos interno e externo, enquanto o gineceu possui três carpelos unidos que culminam em um único pistilo. O perianto é constituído por seis segmentos e envolvido por brácteas. Em *A. cepa*, o amadurecimento das anteras dos estames internos precede o dos externos, resultando em liberação sequencial de pólen (MCGREGOR, 1976). Além disso, a espécie apresenta protandria, caracterizada pela maturação da função masculina da flor antes da receptividade do estigma, o que favorece a polinização cruzada (ALVES, 2019).

A inflorescência manifesta-se na forma de umbela (**Figura. 2**), podendo abrigar de 50 a 2000 flores. O processo de abertura floral é progressivo, estendendo-se por cerca de quatro semanas, com pico de floração na segunda semana. Essa abertura escalonada pode resultar na coexistência de flores em diferentes estágios de maturação na mesma inflorescência, com estames liberando pólen e estigmas receptivos simultaneamente (OLIVEIRA et al., 2015). Embora essa condição possa permitir a ocorrência de autopolinização, o descompasso temporal na maturação dos órgãos sexuais masculinos e femininos tende a favorecer a polinização cruzada. Esta é realizada principalmente por insetos, com destaque para himenópteros (abelhas) e dípteros (moscas), que atuam como principais vetores. O fruto resultante é uma cápsula trilocular, contendo, em geral, de duas a três sementes por lóculo, de coloração escura e formato irregular (ALVES, 2019).



Figura 2. Umbela de cebola. (Esquerda) Abertura das flores, (Direita)- Fechamento das flores (Produção de sementes). Foto: O autor

A cebola possui um ciclo de vida bienal, estruturado em duas etapas biológicas: a vegetativa e a reprodutiva. Na fase vegetativa (primeiro ano), ocorre a formação do bulbo a partir da semente, enquanto a fase reprodutiva (segundo ano) é marcada pelo florescimento e pela produção de sementes originadas do bulbo. A transição entre essas etapas exige exposição a baixas temperaturas, essenciais para a diferenciação das gemas florais, sendo a faixa entre 9 °C e 13 °C considerada favorável para essa indução (ALVES, 2019; SANTOS et al., 2012). Em

regiões de clima temperado a subtemperado, esse processo, denominado vernalização, ocorre naturalmente em razão do frio (LEITE, 2014).

No Brasil, apenas Santa Catarina e Rio Grande do Sul dispõem, naturalmente, de condições térmicas adequadas para produzir sementes de forma natural. Em regiões tropicais e semiáridas, a vernalização em câmara fria tem sido empregada para viabilizar a produção local de sementes, levando conseqüentemente a um ciclo anual, sendo extremamente vantajosa ao reduzir em quase doze meses o ciclo de semente-a-semente (OLIVEIRA et al., 2019).

A formação de bulbos na espécie *A. cepa* é altamente dependente de condições climáticas específicas, sendo o fotoperíodo (duração do dia) e a temperatura os principais fatores ambientais limitantes para a produção (OLIVEIRA; MAROUELLI e MADEIRA, 2014). A bulbificação só se manifesta mediante a satisfação simultânea das exigências de fotoperíodo e temperatura intrínsecas à cultivar. Caso essas exigências não sejam preenchidas, o desenvolvimento da planta se restringe à produção de folhas, sem a formação do bulbo. É importante notar a ampla variabilidade entre as cultivares em relação ao tempo mínimo de exposição à luz solar requerido para o estímulo da bulbificação (ALVES, 2019).

Historico do melhoramento da cebola no Semiárido brasileiro

A introdução da *A. cepa* no território brasileiro está historicamente ligada à colonização açoriana na Região Sul. A partir de materiais genéticos trazidos por esses imigrantes, os agricultores locais realizaram seleções empíricas que resultaram em duas populações fundamentais: a 'Baia Periforme' (de ancestralidade portuguesa) e a 'Pêra' (de origem egípcia). Posteriormente, o cruzamento entre ambas, ocorrido no Vale do Itajaí (SC), originou a população 'Crioula'. A diversidade genética contida nestes três grupos foi decisiva para viabilizar a cebolicultura no Sul e serviu como base para a constituição de Bancos de Germoplasma (BAG), essenciais para os programas de melhoramento em todo o país (LANDAU et al., 2020; ALVES, 2019)

No Nordeste, especificamente no Submédio São Francisco, a cultura estabeleceu-se por volta de 1930 com a introdução da cultivar 'Amarela chata das canárias'. A expansão comercial consolidou-se no final da década de 1950, abrangendo polos produtivos em Pernambuco e na Bahia, como Petrolina e Juazeiro. Entretanto, embora a produtividade fosse satisfatória, os materiais genéticos utilizados na época, predominantemente de cebola amarela, apresentavam baixa resistência a enfermidades e reduzida vida útil pós-colheita. Essas

características representavam gargalos significativos para o armazenamento e a comercialização eficiente do produto (ALVES, 2019).

Buscando superar tais entraves, o Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) iniciou, em 1972, o pioneiro programa de melhoramento genético da região. Os resultados surgiram na década de 1980 com o lançamento da 'Série IPA'. Estas novas cultivares trouxeram um avanço crucial: a capacidade de bulbificação sob condições tropicais de dias curtos e temperaturas médias elevadas, diferindo das exigências das variedades sulistas. Segundo dados do Ministério da Agricultura (MAPA, 2018), o IPA registrou diversas cultivares adaptadas, processo que culminou na substituição massiva da antiga variedade 'Texas Grano 502', que até então ocupava 90% da área plantada. Destacam-se nesse cenário as variedades Franciscana IPA-10 (roxa) e Valeouro IPA-11 (amarela) (IPA, 2016).

Paralelamente, a partir de 1977, a Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) intensificou as pesquisas visando diversificar a base genética e adaptar a cultura às condições edafoclimáticas locais. Um marco importante desses programas no Vale do São Francisco foi a viabilização da produção de sementes locais através da técnica de vernalização artificial. Isso permitiu o desenvolvimento de materiais com maior tolerância fitossanitária. Como resultado desses esforços, a Embrapa Semiárido disponibilizou ao mercado cultivares protegidas e altamente adaptadas, com destaque para BRS Alfa São Francisco, BRS Rio Vale e BRS Carrancas (OLIVEIRA, 2015)

Biologia Reprodutiva da cebola

Para a definição de estratégias eficientes de melhoramento genético, é imprescindível o domínio sobre a biologia reprodutiva da espécie-alvo. Isso ocorre porque a escolha dos métodos de seleção e condução das populações é intrinsecamente dependente do modo como a planta transmite seus genes às gerações futuras (ALVES, 2019).

A *A. cepa* reproduz-se via sexuada, padrão dominante nas angiospermas, envolvendo processos meióticos e fertilização para a geração de sementes botânicas. A dinâmica desses mecanismos, aliada aos vetores de dispersão de pólen, é determinante na modelagem da estrutura genética das populações (FREITAS et al., 2004; RAJESH et al., 2014).

Classificada botanicamente como uma espécie alógama, a cebola prioriza a polinização cruzada. Para garantir esse fluxo gênico e evitar a endogamia (autofecundação), a espécie desenvolveu mecanismos evolutivos específicos, sendo o principal deles a dicogamia protândrica. Neste sistema, existe um isolamento temporal na maturação dos gametas na mesma

flor hermafrodita: a liberação do pólen pelas anteras (fase masculina) antecede a receptividade do estigma (fase feminina). Essa deiscência do pólen ocorre, geralmente, entre 48 e 72 horas antes que o gineceu esteja apto à fertilização. Essa assincronia funciona como uma barreira fisiológica eficiente, forçando a planta a receber pólen de outros indivíduos através da ação de insetos polinizadores (OLIVEIRA et al., 2015).

Compreender esse mecanismo foi vital para a evolução do cultivo comercial. Recentemente, a cebolicultura brasileira — com forte expansão no Sudeste, Centro-Oeste e polos do Nordeste — tem migrado para o uso de sementes híbridas. A exploração da heterose (vigor híbrido) nessas cultivares resultou em plantas com superioridade em sanidade, qualidade de bulbo e potencial produtivo. Enquanto materiais de polinização aberta raramente excedem 40 t/ha, os híbridos modernos, que permitem maior adensamento, têm alcançado tetos produtivos superiores a 100 t/ha (FOLHA AGRÍCOLA, 2025; IOESTE, 2024).

Identificação Macho-esterilidade citoplasmática e de linhagens em cebola

O desenvolvimento de híbridos de cebola só se tornou economicamente viável graças à elucidação dos mecanismos de esterilidade masculina de origem genético-citoplasmática (JONES; EMSWELLER, 1936). Posteriormente, estudos pioneiros detalharam a base genética dessa característica e sua aplicação prática no cultivo de variedades híbridas (JONES; CLARKE, 1943). Do ponto de vista genético, a condição de macho-esterilidade resulta da interação entre um componente citoplasmático associado à infertilidade e um gene nuclear específico (*Ms*), responsável por restaurar a fertilidade quando em sua forma dominante. Na configuração homozigótica recessiva (*msms*), a esterilidade persiste. Além disso, o citoplasma pode abrigar tanto o fator *S* quanto o *N*, este último associado à fertilidade, conforme ilustrado na **Tabela 1**.

Tabela 1: Plantas macho-estéreis polinizadas por vários genótipos doadores de pólen fértil e respectivas progênes F1. Fonte: Brewster, 1994.

Planta-mãe (macho-estéril)	Doador de pólen (macho-fértil)	Progênie F1
$\backslash Ssms$	$NMsMs$	Todas $SMsms$ – macho-fértil
$Ssms$	$NMsms$	$SMsms$ – macho-fértil e $Ssms$ – macho-estéril
$Ssms$	$Nmsms$	Todas $Ssms$ – macho-estéril
$Ssms$	$SMsMs$	Todas $SMsms$ – macho-fértil
$Ssms$	$SMsms$	$SMsms$ – macho-fértil e $Ssms$ – macho-estéril

O sistema de macho-esterilidade nuclear-citoplasmática (CMS, do inglês *Cytoplasmic Male Sterility*) é fundamental para a produção comercial de sementes híbridas de cebola. Na espécie, foram descritos diferentes tipos citoplasmáticos, incluindo o citoplasma *S*, inicialmente relatado por JONES; EMSWELLER (1936), e o citoplasma *T*, posteriormente reportado por BERNINGER (1965). Estudos mais recentes demonstraram ainda que parte dos materiais anteriormente classificados como *T* correspondia, na realidade, a um citoplasma distinto, atualmente designado como tipo *R* (HAVEY; KIM, 2021). Em conjunto, os citótipos CMS-S, CMS-R e CMS-T diferem do citoplasma normal (*N*), sendo o CMS-S o mais utilizado nos programas de melhoramento, enquanto o CMS-R apresenta uso crescente em alguns cruzamentos e o CMS-T permanece pouco frequente, sendo controlado por interações entre três loci nucleares (AHN; KIM, 2023). A distinção entre esses citoplasmas pode ser realizada com auxílio de marcadores moleculares mitocondriais.

Desenvolvimento de híbridos em cebola

A exploração comercial do vigor híbrido em cebola fundamenta-se, majoritariamente, no sistema de Macho-Esterilidade Citoplasmática (CMS). Este mecanismo biológico é essencial para viabilizar a produção de sementes F1 em larga escala, pois elimina a necessidade de emasculação manual. O sistema clássico exige a manipulação coordenada de três linhagens distintas: uma linhagem macho-estéril (Linha A), utilizada como fêmea; uma linhagem mantenedora (Linha B); e uma linhagem polinizadora restauradora ou não (Linha C) (SANTOS et al., 2008). Geneticamente, a perpetuação da Linha A (que possui citoplasma estéril *S* e genes nucleares recessivos *msms*) depende obrigatoriamente do cruzamento com a Linha B. Esta última é isogênica à primeira, diferindo apenas por possuir citoplasma fértil (*N*) e atuar como mantenedora da esterilidade (*Nmsms*). A eficiência desse sistema é o que permite alcançar

índices de produtividade que, segundo Santos et al. (2016), podem superar em até 367% as cultivares de polinização aberta e 192% os melhores parentais.

A heterose refere-se à superioridade produtiva que um híbrido apresenta em comparação com seus progenitores. Em melhoramento vegetal, esse fenômeno ocorre quando o material resultante do cruzamento entre genitores geneticamente distintos expressa desempenho superior ao dos parentais, podendo apresentar maior produtividade, vigor, uniformidade ou adaptação agrônômica (GRIFFITHS et al., 2019).

O ganho produtivo observado nos híbridos é explicado pelo fenômeno da heterose. Embora Griffiths et al. (2019) definam o termo de forma ampla como a superioridade média da progênie em relação aos pais, para o melhoramento de cebola, busca-se um parâmetro mais rigoroso: a heterobeltiose. Conforme a distinção feita por Borém e Miranda (2013) e Brown, Caligari e Campos (2014), a heterose positiva simples (acima da média dos pais) não é suficiente comercialmente. O objetivo é que o híbrido F1 supere o desempenho do melhor genitor envolvido no cruzamento (heterobeltiose). Enquanto a heterose positiva é perseguida para características de rendimento (peso de bulbo), a heterose negativa é frequentemente desejável para características como ciclo de maturação (precocidade) e altura de planta.

No Nordeste brasileiro, as cultivares mais relevantes são populações resultantes de polinização aberta (OP), como Vale Ouro IPA 11, Franciscana IPA 10, TEG 502 e BRS Alfa São Francisco, em contraste com regiões que adotam um nível tecnológico mais avançado, como Irecê – BA, que fazem amplo uso de híbridos. Duas razões podem explicar o uso de OP na região: o elevado custo das sementes híbridas e a suscetibilidade de alguns híbridos ao *Colletotrichum gloeosporioides*, causador da doença fúngica mal de sete voltas. Outro fator é a dificuldade no desenvolvimento de híbridos tropicais adaptados ao Vale do São Francisco. (ALVES, 2019).

Apesar da teoria estabelecida, a seleção prática de linhas mantenedoras e estéreis enfrenta barreiras. Khar e Saini (2016) apontaram limitações no uso de marcadores moleculares (como *5'cob* e *orf725*) em germoplasmas específicos, o que obriga os melhoristas a validarem a esterilidade por métodos citológicos tradicionais, como o teste de viabilidade de pólen e coloração com carmim acético, conforme observado em estudos com germoplasma brasileiro (FERREIRA, 2017).

No panorama nacional, a cebolicultura ainda é fortemente baseada em cultivares de polinização aberta (OP), que ocupam cerca de 80% da área cultivada, com picos de 90% na

Região Sul (CAIXA et al., 2019). Essa realidade também se observa no Vale do Submédio São Francisco. Diferentemente de polos tecnificados como Irecê (BA), que migraram de forma mais intensa para o uso de híbridos, os produtores de Petrolina e Juazeiro ainda mantêm preferência por materiais OP, notadamente as variedades ‘Franciscana IPA-10’, ‘Vale Ouro IPA-11’ e genótipos do tipo ‘Baia’ (COSTA; RESENDE; YURI, 2016; ALVES, 2019). Segundo SANTOS et al. (2010b), essa menor adoção de híbridos na região está associada, principalmente, a dois fatores: o elevado custo das sementes híbridas e a suscetibilidade de muitos materiais comerciais às condições fitossanitárias locais. Essa lacuna evidencia a necessidade do desenvolvimento de híbridos tropicais adaptados às condições do Semiárido.

Em híbridos, a heterose pode ser positiva ou negativa, a depender da relação entre o desempenho da progênie e o dos genitores para determinada característica. Quando o híbrido apresenta valor superior ao dos parentais, a heterose é considerada positiva; quando apresenta valor inferior, é considerada negativa. Assim, em caracteres nos quais valores mais elevados são desejáveis, como produtividade, a heterose positiva tende a ser favorável, enquanto, em caracteres nos quais valores menores são desejáveis, como número de dias para maturação, a heterose negativa pode ser vantajosa. De acordo com BROWN; CALIGARI; CAMPOS (2014), a heterose em relação ao melhor genitor é positiva quando a progênie supera o desempenho do parental superior.

Avaliação de híbridos experimentais de cebola

Segundo dados da Market Research Future, (2023), espera-se que o valor global do mercado de sementes híbridas passe de US\$ 94,6 bilhões, em 2023, para aproximadamente US\$ 165,8 bilhões até o ano de 2030, o que representa uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) estimada em 9,8% no período considerado.

No Brasil Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2022), como a Portaria nº 427 de 27 de abril de 2022, aprovou o "Regulamento Técnico MERCOSUL de identidade e qualidade da cebola", que entre outros aspectos consolidaram legalmente esses critérios, definindo faixas de calibre que devem ser adotadas na comercialização — desde bulbos mini (< 25 mm) até calibre 5 (≥ 90 mm) — com tolerâncias permitidas na mistura de classes dentro da embalagem. Os programas de melhoramento devem seguir orientações do MAPA para o desenvolvimento de cultivares.

A estabilidade fenotípica de híbridos de cebola é fundamental para a uniformidade comercial dos bulbos, diretamente influenciada pela interação genótipo $\times$ ambiente (G $\times$ E).

Fatores edafoclimáticos, como temperatura, fotoperíodo, disponibilidade hídrica e fertilidade do solo, exercem impacto significativo no desenvolvimento vegetativo e no diâmetro final do bulbo, podendo resultar em variações que afetam a classificação em calibres comerciais. Nesse contexto, genótipos com maior estabilidade fenotípica tendem a apresentar bulbos mais uniformes em diferentes ambientes, assegurando maior percentual de enquadramento nas classes comerciais preferenciais e reduzindo perdas por despadronização (SOUZA et al., 2008; SANTOS et al., 2004).

A interação genótipo $\times$ ambiente (G $\times$ A) é um dos fenômenos mais desafiadores no melhoramento vegetal, pois, segundo Cruz, Regazzi e Carneiro (2012), ocorre quando a resposta relativa de dois ou mais genótipos não é coincidente em diferentes ambientes. Essa característica implica que o desempenho de um mesmo material pode variar significativamente entre locais e anos de cultivo, o que dificulta a recomendação de cultivares para ampla adaptação. De acordo com Ramalho et al. (2008), a interação genótipos por ambientes é o principal complicador do trabalho dos melhoristas, exigindo que a seleção e a avaliação dos materiais sejam realizadas em condições similares às do ambiente de cultivo real.

A avaliação da interação G $\times$ A é, portanto, etapa indispensável em programas de melhoramento, permitindo identificar híbridos com adaptabilidade ampla ou específica a determinadas condições ambientais. Estudos realizados em regiões distintas, como o semiárido nordestino e outras zonas produtoras, demonstram flutuações significativas no rendimento e na qualidade de bulbos em resposta a variações ambientais, reforçando a necessidade de experimentação multiambiental para a recomendação adequada de cultivares (SOUZA, 2008; EMBRAPA, 2025; SILVA et al., 2025). Métodos estatísticos têm sido empregados para analisar a estabilidade e adaptabilidade, oferecendo suporte decisório robusto para a seleção de genótipos superiores e consistentes entre safras e regiões.

Estudos demonstram que caracteres quantitativos de interesse agrônômico, como produtividade, teor de proteínas e minerais, apresentam forte influência ambiental, pois, como ressaltado por Silva (2018), a expressão de caracteres de herança poligênica é altamente dependente da interação com o ambiente, dificultando a seleção precisa sem a realização de ensaios em diferentes locais e épocas. Isso reforça que médias gerais não são suficientes para selecionar materiais superiores, pois, conforme Silva (2018), um genótipo com média elevada pode apresentar desempenho satisfatório apenas em ambientes favoráveis e comportamento insatisfatório em condições adversas.

Para contornar os efeitos da interação GxA, pode ser utilizada a condução de ensaios em múltiplos ambientes. Conforme Costa et al. (2021), a avaliação em diferentes ambientes permite estimar de forma mais confiável a performance dos acessos. Essa prática é ainda mais relevante no semiárido, onde as condições de seca e altas temperaturas exercem grande pressão seletiva.

Portanto, a interação GxA deve ser entendida não apenas como uma barreira, mas como uma fonte de informação estratégica para os programas de melhoramento. Como destacam Cruz, Regazzi e Carneiro (2012), o sucesso do melhoramento depende da correta avaliação da interação e da identificação de genótipos superiores em condições ambientais contrastantes. Em regiões de elevada variabilidade, como o semiárido, considerar essa interação é condição essencial para liberar cultivares mais produtivas, estáveis e confiáveis aos agricultores.

REFERÊNCIAS

ALVES, I. L. de S. **Avaliação e estimativas de polinização cruzada, heterozigosidade e heterose em variedades sintéticas de cebola (*Allium cepa* L.)**. 2019. 87 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2019. Disponível em: <http://tede2.uefs.br:8080/handle/tede/1390>. Acesso em: 9 jun. 2024.

ASNAPP; UNDP. **Sahel Onion Productivity and Market Expansion Program (SOPMEP): Final Project Report**. Ghana; Burkina Faso, 2024. Disponível em: <https://www.agriimpactgroup.com/sites/default/files/2023-06/SOPMEP%20final%20Project%20report.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2025.

BEDIR, A. S. et al. Exploring the therapeutic potential of *Allium cepa* and *Allium sativum* extracts: current strategies, emerging applications, and sustainability utilization. **Biology**, Basel, v. 14, n. 8, artigo 1088, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/biology14081088>.

BERNINGER, É. Contribution à l'étude de la stérilité mâle cytoplasmique chez l'oignon (*Allium cepa* L.). **Annales de l'Amélioration des Plantes**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. 183–200, 1965.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. **Melhoramento de plantas**. 6. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2013. 523 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria MAPA nº 427, de 27 de abril de 2022. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 81, p. 10, 28 abr. 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/web/dou/-/portaria-mapa-n-427-de-27-de-abril-de-2022-395718201>. Acesso em: 26 ago. 2025.

BROWN, J.; CALIGARI, P. D. S.; CAMPOS, H. Breeding Schemes. In: BROWN, J.; CALIGARI, P. D. S.; CAMPOS, H. **Plant Breeding**. 2. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2014. p. 296.

COSTA, A. E. da S. **Diversidade molecular de acessos, estimativas de parâmetros genéticos e de adaptabilidade e estabilidade em linhagens de guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh)**. 2021. 138 f. Tese (Doutorado em Melhoramento Genético de Plantas) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.

COSTA, N. D.; RESENDE, G. M. de; YURI, J. E. Cebola: escolha adequada. **Cultivar HF**, Pelotas, v. 14, n. 97, p. 6–8, 2016.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. 514 p.

EXPANSÃO NA PRODUÇÃO DE CEBOLAS NO BRASIL REFORÇA A IMPORTÂNCIA DE CULTIVARES HÍBRIDAS ADAPTADAS. **Folha Agrícola**, [s. l.], 26 jun. 2025. Disponível em: <https://folhaagricola.com.br/2024/11/28/expansao-na-producao-de-cebolas-no-brasil-reforca-a-importancia-de-cultivares-hibridas-adaptadas/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

FERREIRA, R. R. **Identificação molecular do locus restaurador da macho-fertilidade (Ms), tipo de citoplasma e viabilidade de pólen em acessos de cebola (*Allium cepa* L.)**. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Melhoramento Genético de Plantas) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017.

FILGUEIRA, F. A. **Novo manual de olericultura**: agrotecnologia moderna para a produção de hortaliças. 3. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2008. 421 p.

FOOD SECURITY INFORMATION NETWORK (FSIN); GLOBAL NETWORK AGAINST FOOD CRISES (GNAFC). **Global Report on Food Crises 2025**. Rome: FSIN, 2025. Disponível em: <https://www.fsinplatform.org/report/global-report-food-crises-2025/>. Acesso em: 5 dez. 2025.

FRANÇA, J. G. E. de; CANDEIA, J. de A. Development of short-day yellow onion for tropical environment of the Brazilian northeast. **Acta Horticulturae**, [s. l.], v. 433, n. 29, p. 285–290, 1997.

GRIFFITHS, A. J. F. et al. **Introdução à Genética**. 11. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019.

GUPTA, A. J.; KHAR, A.; MAHAJAN, V. Assessing onion genotypes stability and potential in diverse environments. **Cogent Food & Agriculture**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/23311932.2024.2360606>.

HAVEY, M. J. Diversity among male-sterility-inducing and male-fertile cytoplasms of onion. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 101, p. 778–782, 2000.

HAVEY, M. J.; KIM, S. Reclassification of the T-cytoplasm in onion as a novel R-type CMS. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, artigo 789021, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.789021>.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO (IPA). **Pesquisas sobre cebola são destaques na Revista Campo e Negócios Hortifruti**, 2016. Disponível em: <http://www.ipa.br/novo/noticia?n=1288>. Acesso em: 10 dez. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**, 2015. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>. Acesso em: 12 abr. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/14/10251>. Acesso em: nov. 2023.

IOESTE. **Cebolicultura no Vale do São Francisco**: tecnologia e uso de híbridos elevam tetos produtivos. Barreiras, BA: Portal Ioeste, 2024. Disponível em: <https://ioeste.com.br/>. Acesso em: 23 abr. 2026.

JONES, H. A.; CLARKE, A. E. Inheritance of male sterility in the onion and the production of hybrid seed. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Geneva, v. 43, p. 189–194, 1943.

JONES, H. A.; EMSWELLER, S. L. A male sterile onion. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Geneva, v. 34, p. 582–585, 1936.

KEBEDE, Z. N. et al. Impact of the adoption of improved onion (*Allium cepa* L.) technology on yield and dietary diversity of smallholder farmers in Debub Ari District, South Omo Zone, SNNPRS Ethiopia. **Journal of Agricultural Economics and Rural Development**, [s. l.], v. 2, p. 1–18, 2023.

KHAR, A.; SAINI, N. Limitations of PCR-based markers to identify male-sterile and maintainer plants from Indian onion (*Allium cepa* L.) populations. **Plant Breeding**, [s. l.], v. 135, p. 519–524, 2016.

KHOSA, J. S. et al. Enhancing onion breeding using molecular tools. **Plant Breeding**, [s. l.], v. 135, p. 9–20, 2016.

KIM, S. et al. Identification of a novel chimeric gene, orf725, and its use in development of a molecular marker for distinguishing three cytoplasm types in onion (*Allium cepa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 118, p. 433–441, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0909-x>.

KIM, S. et al. Identification of candidate genes associated with fertility restoration of cytoplasmic male-sterility in onion (*Allium cepa* L.) using a combination of bulked segregant analysis and RNA-seq. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 128, p. 2289–2299, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2585-0>.

KIM, S. et al. Molecular characterization of a novel cytoplasmic male sterility system in onion (*Allium cepa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 132, p. 3135–3145, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-019-03413-w>.

KUMAR, B.; PATRA, N. K. Gene frequency-based estimation of natural outcrossing in opium poppy (*Papaver somniferum* L.). **Molecular Breeding**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 619–626, 2010.

LANDAU, E. C.; MOURA, L.; LOPES, M. de F. Evolução da produção de cebola (*Allium cepa*, Amaryllidaceae). In: LANDAU, E. C.; SILVA, G.; MOURA, L. (Org.). **Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas**: produtos de origem vegetal. Brasília, DF: Embrapa, 2020. v. 2, p. 653–677.

LEITE, D. L. Produção de sementes de cebola. **Embrapa Clima Temperado - Circular Técnica**, Pelotas, n. 143, p. 1–9, 2014.

MARKET RESEARCH FUTURE. **Hybrid Seeds Market Research Report – Forecast to 2030**. [s. l.]: MRFR, 2023. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/hybrid-seeds-market-5015>. Acesso em: 18 abr. 2025.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Registro Nacional de Cultivares (RNC)**. Disponível em: http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php. Acesso em: 10 mar. 2023.

NUNES, R. L. C.; OLIVEIRA, A. B. de; DUTRA, A. S. Agronomic performance of onion hybrids in Baraúna, in the semi-arid region of Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 3, p. 606–611, 2014.

OLIVEIRA, V. R.; SANTOS, C. A. F.; RESENDE, G. M. de; COSTA, N. D. Botânica, melhoramento genético e cultivares de cebola. In: SOUZA, R. J.; ASSIS, R. P.; ARAÚJO, J. C. (Ed.). **Cultura da cebola: tecnologias de produção e comercialização**. Lavras: UFLA, 2015. p. 82–139.

OLIVEIRA, V. R.; MAROUELLI, W. A.; MADEIRA, N. R. Influência de fatores climáticos na produção da cebola. **Nosso Alho**, Vargem Grande do Sul, n. 19, p. 40–45, 2014.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). **Agricultural production statistics 2010–2023**. FAOSTAT. Disponível em: <https://www.fao.org/statistics/highlights-archive/highlights-detail/agricultural-production-statistics-2010-2023/en>. Acesso em: 21 ago. 2025.

RAGASSI, C. F. et al. Genotipagem de polimorfismos associados com sistemas de macho-esterilidade em acessos de cebola adaptados ao Brasil. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 3, p. 409–414, 2012.

RAMALHO, M. A. P.; SANTOS, J. B. dos; PINTO, C. A. de B. **Genética quantitativa aplicada ao melhoramento de plantas autógamas**. Lavras: UFLA, 2008. 422 p.

RAMNIWAS et al. Yield gap analysis and economics of onion (*Allium cepa* L.) cultivation in western arid Kachchh of Gujarat. **International Journal of Agriculture and Horticulture (IJAH)**, [s. l.], v. 6, n. 2, p. 82–88, abr. 2024. Disponível em: <https://journals.acspublisher.com/index.php/ijah/article/view/20773>. Acesso em: 5 dez. 2025.

SANTOS, C. A. F. **Recursos genéticos e melhoramento de cebola**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2013. 32 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 255). Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstreams/be65568f-14ca-421d-9f5d-ae91b3d68aa3/download>. Acesso em: 30 set. 2025.

SANTOS, C. A. F.; COSTA, N. D.; CANDEIA, J. de A. **Identificação de tipo de citoplasma em germoplasma de cebola com base em marcadores moleculares**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2016. (Embrapa Semiárido. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 130). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/156117/1/BPD130.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2022.

SANTOS, C. A. F. et al. Identificação dos citoplasmas “S”, “T” e “N” via PCR em populações de cebola no Vale do São Francisco. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 26, p. 308–311, 2008.

SANTOS, C. A. F.; OLIVEIRA, V. R.; COSTA, N. D. Identification of maintainer lines and evaluation of experimental hybrids derived from a Brazilian tropical onion population. **Acta Horticulturae**, [s. l.], v. 935, p. 137–141, 2012.

SANTOS, G. M. et al. Implicações da interação genótipos x ambientes em cebola. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA, 44., 2004, Campo Grande.

Horticultura Brasileira, Brasília, v. 22, n. 2, supl., 2004. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPATSA/29475/1/OPB71.pdf>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SANTOS, M. G. P. dos et al. Vernalização e corte do terço apical dos bulbos na produção e qualidade de sementes de cebola. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 3, p. 989–996, maio/jun. 2012. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n3p989>.

SATO, Y. PCR amplification of CMS-specific mitochondrial nucleotide sequences to identify cytoplasmic genotypes of onion (*Allium cepa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 96, n. 3-4, p. 367–370, 1998.

SHARMA, P. et al. Advances in molecular markers for cytoplasmic male sterility in *Allium cepa*. **Journal of Plant Genetics and Genomics**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 112-128, 2024.

SILVA, A. **Adaptabilidade e estabilidade de híbridos de cebola**. 2025. 85 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufla.br/bitstreams/d4e51456-721f-4c70-a4a1-512512277821/download>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SILVA, A. R. **Biometria aplicada ao melhoramento de plantas**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2018. 150 p.

SILVA, J. R.; MENDES, L. F. Cebolicultura tropical: desafios econômicos e a dependência de insumos importados. **Revista de Economia e Agronegócio**, Viçosa, v. 22, n. 1, p. 45-60, 2025.

SOUZA, A. C. de et al. Heterosis and GxE interaction in onion hybrids for the Brazilian semi-arid region. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 44, p. e2026, 2026.

SOUZA, J. de O. Avaliação de genótipos de cebola no Semi-Árido Nordestino. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 4, p. 892-895, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/hb/a/45zTJrGZJzkTW5zmmBw8nFL/?lang=pt>. Acesso em: 26 ago. 2025.

TORESAN, L.; SOUZA, A. de; VALENTINI, F. **Síntese anual da agricultura de Santa Catarina – 2024/2025**. Florianópolis: Epagri/Cepa, 2025. Disponível em: <https://blog.epagri.sc.gov.br/>. Acesso em: 5 dez. 2025.

YUSUPOV, Z. et al. Phylogenomics of *Allium* section *Cepa* (Amaryllidaceae) provides new insights on domestication of onion. **Plant Diversity**, [s. l.], v. 43, p. 102–110, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pld.2020.07.008>.

CAPITULO I - IDENTIFICAÇÃO MOLECULAR DO LOCUS RESTAURADOR DA MACHO-FERTILIDADE E TIPO DE CITOPLASMA EM POPULAÇÕES DE CEBOLA

RESUMO

A produção de sementes híbridas de cebola (*Allium cepa*) fundamenta-se no sistema de esterilidade masculina citoplasmática (CMS), exigindo a identificação precisa de linhagens parentais. O objetivo deste trabalho foi identificar os tipos citoplasmáticos e genotipar o locus restaurador da fertilidade (*Ms*) em sete populações comerciais (IPA 11, Valenciana Botucatu, IPA 10, BRS Rio Vale, Roxa 13, BRS Carrancas e BRS Alfa São Francisco), visando selecionar linhagens macho-estéreis (A) e mantenedoras (B). A caracterização molecular utilizou marcadores mitocondriais (*5'cob*, *orfA501*, *orf725*) e nucleares (*AcPMS1*, *AcSKP1*). Os resultados demonstraram que as populações IPA 11 e Botucatu possuem citoplasma normal (N) e estão fixadas para o alelo dominante restaurador (*MsMs*). A população IPA 10 apresentou citoplasma N associado ao genótipo nuclear recessivo (*msms*) na totalidade dos indivíduos avaliados, caracterizando-se como uma fonte ideal de linhagens mantenedoras. As cultivares BRS Rio Vale, Roxa 13 e BRS Carrancas exibiram predominância de citoplasma estéril (S) com segregação para o locus *Ms*, indicando potencial para seleção de linhagens macho-estéreis mediante segregação e seleção. A população BRS Alfa São Francisco revelou inconsistências genômicas, com mistura de citoplasmas e perfis não identificados. Conclui-se que o uso de marcadores moleculares discriminou eficientemente as populações, validando a IPA 10 como candidata à linha B e evidenciando a necessidade de etapas de autofecundações para fixação de alelos nas demais populações.

Palavras-chave: *Allium cepa*. Melhoramento Genético. Marcadores Moleculares. CMS. Linhagens parentais.

ABSTRACT

Onion hybrid (*Allium cepa*) seed production relies on the Cytoplasmic Male Sterility (CMS) system, requiring precise identification of parental lines. This study aimed to identify cytoplasmic types and genotype the fertility restoration locus (*Ms*) in seven commercial populations (IPA 11, Valenciana Botucatu, IPA 10, BRS Rio Vale, Roxa 13, BRS Carrancas, and BRS Alfa São Francisco) to select male-sterile (A) and maintainer (B) lines. Molecular characterization employed mitochondrial (*5'cob*, *orfA501*, *orf725*) and nuclear (*AcPMS1*, *AcSKP1*) markers. Results showed that IPA 11 and Botucatu populations possess normal (N) cytoplasm and are fixed for the dominant restorer allele (*MsMs*). The IPA 10 population presented N cytoplasm associated with the recessive nuclear genotype (*msms*) in all evaluated individuals, characterizing it as an ideal source of maintainer lines. The cultivars BRS Rio Vale, Roxa 13, and BRS Carrancas exhibited a predominance of sterile (S) cytoplasm with segregation at the *Ms* locus, indicating potential for male-sterile line selection through selection. The Alfa São Francisco population revealed genomic inconsistencies, with mixed cytoplasm and unidentified profiles. It is concluded that the use of molecular markers efficiently discriminated the populations, validating IPA 10 as a candidate B-line and highlighting the need for inbreeding programs to fix alleles in the other populations.

Keywords: *Allium cepa*. Plant Breeding. Molecular Markers. CMS Parental lines.

INTRODUÇÃO

A cebola (*Allium cepa*) é uma hortaliça bulbosa pertencente à família *Amaryllidaceae*, amplamente cultivada e consumida em escala global (SANSA et al., 2024). De acordo com os dados mais recentes da FAO (2024), a cebola mantém uma posição de destaque entre as hortaliças mais produzidas mundialmente, com produção total de 111,3 milhões de toneladas, em 5,84 milhões de hectares em escala global e rendimento médio de 19.046 kg/ha. No Brasil, a produção de cebola vem demonstrando um desempenho significativo. De acordo com os dados mais recentes da FAOSTAT (FAO, 2025), em 2023, o Brasil cultivou 49.358 hectares de cebola, resultando em uma produção total de 1.639.970 toneladas e um rendimento de 33.226 kg por hectare, superando a produtividade mundial.

Dois tipos de cebola são cultivados: polinização aberta (OP) e híbridos. Os híbridos oferecem maior vigor, produtividade e uniformidade e combinam melhor resistência ao estresse biótico e abiótico do que OP, (SOTO et al., 2018). A produção de híbridos envolve o sistema de esterilidade masculina citoplasmático-gênica (CGMS), com a combinação de alelos no núcleo e no citoplasma (CHIKH-ROUHOU et al., 2025). A fonte inicial de CGMS da cebola foi relatada por Jones e Clarke (1943), que descreveram-na como sendo controlada pela interação do citoplasma masculino estéril (S) com um genótipo homozigoto recessivo no locus de restauração da fertilidade masculina nuclear (*Smsms*).

Para a produção de sementes híbridas de alta qualidade, que garantem uniformidade, vigor e maior rendimento, é necessária a manutenção de três linhagens principais: a linha A (planta-mãe estéril), a linha B (mantenedora) e a linha C (polinizadora). A linha A corresponde à planta fêmea utilizada na produção de híbridos e apresenta macho-esterilidade. Sua manutenção é realizada por meio do cruzamento com a linha B, que possui citoplasma normal (N) e o mesmo genótipo nuclear homozigoto recessivo (*msms*), sendo, portanto, fértil. Como ambas compartilham o genótipo nuclear recessivo, toda a progênie resultante desse cruzamento permanece macho-estéril, assegurando a continuidade da linhagem A. Por sua vez, a linha C corresponde ao parental masculino utilizado no cruzamento com a linha A para a produção das sementes híbridas (HAVEY, 2004; CHIKH-ROUHOU et al., 2025).

O citoplasma S constitui o principal tipo de citoplasma masculino-estéril utilizado em programas de melhoramento de cebola. Além dele, outros citoplasmas também foram identificados, entre os quais o citoplasma T se destaca como outro tipo relevante associado aos

sistemas de esterilidade masculina. A diferenciação entre esses citoplasmas é realizada por meio de marcadores moleculares que visam regiões específicas do DNA mitocondrial, como *5'cob* e *orfA501*, amplamente utilizados para identificação dos tipos citoplasmáticos em programas de melhoramento. Em termos de prevalência, observa-se variação significativa entre os tipos de citoplasma em populações cultivadas, sendo o citoplasma T predominante, com ocorrência de 56,3% das amostras analisadas, enquanto o citoplasma S apresenta baixa frequência, cerca de 1,8% (ALVES et al., 2024). Essa distribuição desigual reforça a importância da seleção assistida por marcadores para a identificação e o manejo eficiente de linhagens parentais em programas de hibridação (KHAR et al., 2022).

Estudos recentes indicam que, além dos citoplasmas S e T, existe um terceiro tipo, denominado citoplasma R. Esse citoplasma, provavelmente selecionado a partir da população de cebola 'Rijnsburger', é identificado por um perfil molecular característico no marcador mitocondrial *orf725*, no qual são observados simultaneamente os amplicons de 628 pb, típico do citoplasma S, e 833 pb, associado aos citoplasmas N e T. Diferentemente do citoplasma T, a macho-esterilidade conferida pelo citoplasma R é restaurada pelo alelo dominante do locus nuclear *Ms*, de forma semelhante ao observado para o citoplasma S (HAVEY, 2021).

Além dos marcadores utilizados para a identificação do tipo de citoplasma, a genotipagem do locus nuclear *Ms*, responsável pela restauração da fertilidade masculina, é essencial em programas de melhoramento de cebola. A utilização da seleção assistida por marcadores (MAS) permite acelerar o processo de melhoramento, eliminando a necessidade de cruzamentos-teste demorados. Nesse contexto, a literatura reporta o uso de marcadores específicos para essa finalidade, como o *AcSKP1* e o *AcPMS1*, desenvolvidos, respectivamente, por Huo et al. (2015) e Kim et al. (2015). Esses marcadores constituem ferramentas fundamentais para a identificação de linhagens restauradoras, embora ainda exista a necessidade de desenvolvimento de marcadores mais estreitamente ligados ao locus *Ms*, visando maior precisão na seleção (KHAR et al., 2022).

O objetivo deste trabalho foi a identificação dos tipos citoplasmáticos presentes em sete populações de cebola comerciais, bem como a genotipagem do locus *Ms*, visando a identificação de linhas macho-estéreis ("A") e mantenedoras da macho esterilidade ("B"), etapa essencial no processo de obtenção de híbridos.

MATERIAL E MÉTODOS

Obtenção de material vegetal

Foram avaliados indivíduos de sete populações de variedades comerciais: Ipa 11 (n=74), população valenciana Botucatu (n=54), Ipa 10 (n=62), BRS Riovale (n=68), Roxa 13 (n=67), BRs Carrancas (n=71) e BRs Alfa São Francisco (n=71). As plantas foram produzidas em plantio direto no campo experimental do Bebedouro, Embrapa Semiárido. As coletas das folhas para extração do DNA, para as etapas de classificação do tipo de citoplasma e avaliação para o locus *Ms*, foram realizada aos 90 dias após o plantio, próximo ao ponto de “tombamento” em folhas jovens e saudáveis. As folhas foram coletadas e acondicionadas no freezer -80°C até a extração individual do DNA.

Avaliação de citoplasma

A extração do DNA total foi realizada com base no protocolo CTAB 2x de DOYLE; DOYLE (1990), com adaptações descritas por FERREIRA et al. (2017), incluindo centrifugações a 7.500 e 10.000 rpm na primeira e segunda etapas, respectivamente, adição de 2% de β -mercaptoetanol e incubação a 65 °C por 30 min. Ao final, o DNA foi ressuspensionado em tampão Tris-EDTA (TE).

Foram realizadas três reações independentes de PCR para a identificação do tipo de citoplasma. As duas primeiras seguiram a metodologia de ENGELKE et al. (2003), para os marcadores *5'cob* e *orfA501*, com modificações no volume final para 20 μ L, contendo 0,25 μ M de cada primer, 0,15 mM de cada dNTP, 1 $\times$ de tampão de PCR, 2,0 mM de MgCl₂, 2,5 unidades de Taq DNA polimerase e 1 μ L de DNA ressuspensionado. A terceira reação seguiu a metodologia de KIM et al. (2009), para o marcador *orf725*, com volume final de 10 μ L, contendo 0,2 μ M de cada primer, 0,2 mM de cada dNTP, 1 $\times$ de tampão de PCR, 2,0 mM de MgCl₂, 1,0 unidade de Taq DNA polimerase e 1 μ L de DNA ressuspensionado. Não foi realizada quantificação da concentração de DNA antes das reações. A definição do volume de DNA aplicado baseou-se na quantidade de material biológico recomendada nos protocolos de extração e amplificação utilizados. Em parte das amostras, foram realizados testes de integridade do DNA, com o objetivo de verificar sua qualidade para amplificação, sem, contudo, proceder à quantificação da concentração. Os primers *orfA501* e as condições de PCR foram descritos por ENGELKE et

al. (2003), enquanto os primers *orf725* e respectivas condições de amplificação foram descritos por KIM et al. (2009).

Os produtos de PCR foram visualizados em géis de agarose 1,5% corados com brometo de etídio e fotografados sob luz ultravioleta. A identificação de citoplasmas 'N', 'T', 'S' e 'R' para os marcadores 5'cob, *orfA501* e *orf725* (Fig. 1, 2 e 3) baseou-se na classificação de HAVEY (2021): 1) citoplasma 'N': presença dos fragmentos de 180 pb e 833 pb, e ausência dos demais fragmentos; 2) citoplasma 'T': presença dos fragmentos de 180 pb, 473 pb, 833 pb e ausência dos fragmentos de 414 pb e 628 pb; 3) citoplasma 'S': presença dos fragmentos de 180 pb, 414 pb, 473 pb e 628 pb e ausência do fragmento 833 pb; e 4) citoplasma 'R': presença dos fragmentos 180 pb, 628 pb e 833 pb e ausência dos fragmentos de 414 pb e 473 pb. O tamanho dos fragmentos amplificados foi estimado em comparação com o marcador Ladder de 100 pb.

Avaliação do Locus Restaurador da Macho-Fertilidade (*Ms*)

As reações de PCR para o marcador codominante *AcSKPI* (HUO et al., 2015) foram realizadas com base nas condições descritas no protocolo original, ajustadas para volume final de 25 µL, contendo 0,4 µM de FU898 (5'-GCAATACACAGCTTCTAGCTGAATT-3'), 0,4 µM de FD898 (5'-AACACACACACAGAGTGAGAAATTTTATATA-3'), 0,2 µM de SU628 (5'-TCTGTGTGTGTGTGTAATTTCTCTG-3') e 0,2 µM de SD628 (5'-CGGAAGATTAATATTTTGCGTATACAT-3'), 0,15 mM de cada dNTP, 1× de tampão de PCR, 2,0 mM de MgCl₂ e 2,0 unidades de Taq DNA polimerase. Para o marcador *AcPMSI* (KIM et al., 2015), as reações de amplificação foram conduzidas com base no protocolo de referência, em volume final de 10,0 µL, contendo 0,2 µM do primer forward (5'-GGTCACCAGGTGGATAGAGAA-3'), 0,2 µM do primer reverse (5'-TCATTGAGCTGCATCCAAAA-3'), 0,2 mM de cada dNTP, 1× de tampão para PCR, 2,0 mM de MgCl₂ e 1,0 unidade de Taq DNA polimerase. As reações de amplificações para o marcador foram realizadas conforme descrito por Kim et al. (2015).

Os produtos amplificados foram separados em géis de agarose a 1,5% para o marcador *AcSKPI* (Fig. 4) e em géis a 2,5% para o marcador *AcPMSI* (Fig. 5), ambos corados com brometo de etídio e visualizados sob luz ultravioleta. A avaliação do locus restaurador da fertilidade com o marcador *AcSKPI* considerou: 1) homozigoto dominante (*MsMs*), com presença de fragmento de 898 pb; 2) homozigoto recessivo (*msms*), com presença de fragmento de 628 pb; e 3) heterozigoto (*Msms*), com presença dos fragmentos de 898 e 628 pb (HUO et al., 2015).

para o marcador *AcPMSI*, considerou-se: 1) homozigoto dominante (*MsMs*) – fragmento de 242, 2) homozigoto recessivo (*msms*) – fragmento de 276 pb e 3) heterozigoto (*Msms*) – presença dos fragmentos de 242 e 276 pb. O tamanho dos fragmentos foi estimado em comparação com marcador com o Ladder de 100 pb e o Ladder de 50 pb.

RESULTADOS

Avaliação do Tipo de Citoplasma

Os géis apresentaram fácil identificação para todos os marcadores da série *5'cob/orfA501/orf725*, produzindo fragmentos dos tamanhos esperados conforme descrito na literatura. Não houve ocorrência de bandas inespecíficas nos marcadores citoplasmáticos empregados.

A amplificação com o marcador *5'cob* permitiu distinguir o citoplasma S, caracterizado pela presença dos fragmentos de 414 pb e 180 pb, do citoplasma N, identificado exclusivamente pelo fragmento de 180 pb, como observado nos perfis eletroforéticos das populações Rio Vale e Ipa 10, respectivamente (**Figura 1**). Com o marcador *orfA501*, a presença do fragmento de 473 pb caracterizou o citoplasma S na população Carrancas, enquanto sua ausência confirmou o citoplasma N na população Ipa 11 (**Figura 2**). A análise complementar com o marcador *orf725* possibilitou a distinção entre os citoplasmas N (fragmento de 833 pb), S (fragmento de 628 pb) e perfis intermediários ou não classificados, evidenciados pelos padrões de amplificação das populações Botucatu, Roxa 13 e Alfa São Francisco, respectivamente (**Figura 3**).

As frequências gerais dos citoplasmas N, S e T no conjunto das populações comerciais foram, respectivamente, N = 193 plantas (51,7%), S = 205 plantas (54,9%), T = 13 plantas (3,5%), enquanto não foi observada presença de citoplasma do tipo R nas populações analisadas. Assim, predominaram citoplasmas estéreis de tipo S, seguidos pelo citoplasma fértil N, e baixa ocorrência de citoplasma T.

A classificação obtida pelos marcadores foi idêntica dentro de cada população. Entre as populações avaliadas, Ipa 11, Botucatu e Ipa 10 apresentaram exclusivamente citoplasma do tipo N, enquanto Rio Vale, Roxa 13 e Carrancas apresentaram exclusivamente citoplasma do tipo S, com exceção de uma planta com citoplasma T em Roxa 13. A população Alfa São

Francisco apresentou mistura de tipos citoplasmáticos, com 3 plantas N, 12 plantas T e 56 plantas classificadas como não identificadas.

As populações com mistura de citoplasmas férteis e estéreis, especialmente Alfa São Francisco e Roxa 13, apresentam potencial para identificação e seleção de linhagens com citoplasmas contrastantes. Em contrapartida, populações com citoplasma fixado (como Rio Vale ou Carrancas, com citoplasma exclusivamente "S") apresentam limitações para trabalhos destinados à derivação de linhas "A" e "B", uma vez que não possuem segregação citoplasmática interna.

Avaliação do Locus Restaurador da Macho-Fertilidade (*Ms*)

Os alelos *Ms* e *ms* foram detectados nas populações comerciais avaliadas, com ocorrência de indivíduos em homozigose e heterozigose para os marcadores nucleares *AcSKPI* e *AcPMSI*. Para o marcador *AcSKPI*, observaram-se bandas claras e bem definidas, com fragmentos de 898 pb (*MsMs*), 628 pb (*msms*) e ambos simultaneamente (*Msms*), conforme ilustrado pelos perfis eletroforéticos da população Carrancas (**Figura 4**). De forma complementar, o marcador *AcPMSI* confirmou os genótipos obtidos, apresentando fragmentos de 242 pb (*MsMs*), 276 pb (*msms*) ou ambos (*Msms*), com padrões igualmente nítidos e reprodutíveis na mesma população (**Figura 5**). Os resultados consolidados do tipo de citoplasma e da genotipagem do locus *Ms* para as sete populações avaliadas encontram-se sumarizados na **Tabela 2**, enquanto os critérios de classificação citoplasmática utilizados como referência estão apresentados na **Tabela 1**.

Considerando a identificação individual das amostras e a sobreposição entre os dois marcadores, as frequências alélicas gerais estimadas foram *Ms* = 624 alelos (66,8%) e *ms* = 310 alelos (33,2%). As frequências genótípicas totais corresponderam a *MsMs* = 259 indivíduos (55,5%), *Msms* = 106 indivíduos (22,7%) e *msms* = 102 indivíduos (21,8%). Entre as populações avaliadas, Carrancas destacou-se por apresentar os três genótipos (*MsMs*, *Msms* e *msms*), indicando maior variabilidade genética para o locus restaurador da fertilidade. Em contraste, Ipa 11 e Botucatu apresentaram predominância de indivíduos *MsMs*, enquanto Ipa 10 foi composta majoritariamente por indivíduos *msms*, evidenciando contrastes marcantes entre as populações quanto à constituição genotípica do locus avaliado.

DISCUSSÃO

A caracterização dos diferentes tipos de citoplasma associados à esterilidade masculina citoplasmática (CMS) e dos alelos do locus nuclear restaurador da fertilidade (*Ms*) continua sendo um componente essencial para programas de produção de híbridos de cebola, sobretudo em regiões onde a estabilidade de linhagens maternas é determinante para o sucesso da produção de sementes. Os resultados obtidos para as populações comerciais avaliadas revelam que, apesar da classificação histórica dos citoplasmas em tipos bem definidos (N, S e T), o cenário atual é muito mais complexo, refletindo a grande variabilidade e plasticidade do genoma mitocondrial da cebola.

O estudo de Ferreira (2017) representa marco pioneiro na caracterização integrada do tipo de citoplasma (N, S e T), do genótipo no locus restaurador da fertilidade masculina (*Ms*) e da obrigação de pólen em amplo conjunto de acessos de cebola do germoplasma brasileiro, utilizando simultaneamente marcadores mitocondriais (*5'cob/orfA501,orf725*) e gene restaurador da esterilidade nuclear citoplasmática (*AcSKPI*, *AcPMSI*) associados ao sistema CMS-S/CMS-T. Ao estimar frequências citoplasmáticas de aproximadamente 0,47 (N), 0,28 (S) e 0,25 (T) e frequências alélicas de 0,52 (*Ms*) e 0,48 (*ms*) em 59 genótipos, o presente trabalho se destaca pela ampla escala de análise adotada, gerando evidências quantitativas robustas a partir da avaliação de um grande número de plantas. do germoplasma nacional quanto à combinação núcleo-citoplasma, além de validar pares específicos de linhas A/B por meio da concordância entre seleção molecular e testes de previsões políticas. Esses resultados consolidam base conceitual e metodológica essencial para programas de desenvolvimento de híbridos de cebola adaptados ao Vale do São Francisco e outras regiões tropicais, uma vez que demonstram, de forma inédita no contexto brasileiro, uma previsão operacional da seleção assistida por marcadores para identificação simultânea de linhagens macho-estéreis e mantenedoras diretamente em coleções de germoplasma

Estudos recentes têm mostrado que rearranjos estruturais, eventos de recombinação e mudanças estequiométricas são frequentes e podem gerar perfis citoplasmáticos intermediários ou recombinantes (Havey 2022; Jang et al. 2021). Os padrões observados nas populações comerciais analisadas reforçam essa visão moderna, indicando que a interpretação de marcadores citoplasmáticos deve levar em conta a dinâmica mitocondrial e a natureza multigênica da restauração da fertilidade.

As populações Ipa 11 e Botucatu apresentaram citoplasma do tipo N de forma consistente, sem indícios de regiões mitocondriais associadas aos tipos S ou T. Esse padrão é típico de linhagens férteis e está de acordo com a estrutura mitocondrial convencional observada em materiais férteis (Kim et al. 2024). A genotipagem nuclear confirmou esse perfil: ambas apresentaram exclusivamente o genótipo *MsMs*, não havendo alelos recessivos *ms* que permitam a expressão de esterilidade citoplasmática. Do ponto de vista do melhoramento, essas populações demonstram um grave problema pois são restauradoras de macho fertilidade, demonstrando sua inviabilidade na produção de híbridos (Sharma et al. 2021; Jo et al. 2020).

A população Ipa 10 mostrou um padrão singular entre as avaliadas. Embora apresente citoplasma N, todas as plantas possuem o genótipo nuclear *msms*. Essa combinação resulta em plantas férteis (pois o citoplasma N não condiciona CMS), mas o genótipo recessivo *msms* é extremamente valioso para a manutenção de linhagens CMS-S. Populações com esse perfil, ainda que raras, têm sido relatadas em programas de melhoramento modernos devido ao fluxo de alelos recessivos resultante de ciclos de seleção recorrente (Huo et al. 2016). A homogeneidade no genótipo *msms* torna Ipa 10 uma excelente candidata a linhagem mantenedora pura, uma vez que a ausência do alelo *Ms* impede a restauração da fertilidade quando cruzada com citoplasma S.

Por outro lado, as populações BRS Rio Vale, Roxa 13 e BRS Carrancas apresentaram citoplasma S ou padrões associados ao citoplasma S, característico das plantas que expressam esterilidade citoplasmática. Contudo, a segregação observada no locus *Ms* variou substancialmente entre elas. Na BRS RioVale, embora todas as plantas apresentem citoplasma S, os genótipos nucleares variaram entre *MsMs*, *Msms* e *msms*. Essa heterogeneidade resulta em uma mistura de plantas restauradoras, parcialmente restauradoras e estéreis — padrão típico de populações comerciais que não passaram por ciclos específicos de purificação para CMS (Kim e Havey 2017). A presença de plantas *msms* em citoplasma S é especialmente relevante, pois essas são estéreis estáveis e podem ser usadas diretamente como linhagens A após purificação.

A população Roxa 13 também apresentou predominância de citoplasma S, mas com a presença de um indivíduo com citoplasma T, o que sugere uma estrutura mitocondrial recombinante. Esse tipo de padrão tem sido observado em estudos recentes, que mostram que subgenomas T podem ocorrer em baixa frequência dentro de citoplasmas S devido a rearranjos mitocondriais (Kim et al. 2024; Jang et al. 2021). Em nível nuclear, Roxa 13 apresentou

principalmente plantas *MsMs*, com poucas *Msms*. Isso indica uma predominância de plantas restauradoras, o que dificulta a formação de linhagens A puras, mas ainda permite o uso da população como fonte de diversidade para programas de CMS-S, e obtenção de *Smsms* através de autofecundação.

A BRS Carrancas foi a população mais heterogênea entre todas. Com citoplasma S e uma distribuição equilibrada entre *MsMs*, *Msms* e *msms*, essa cultivar exibe forte segregação tanto nuclear quanto citoplasmática. A diversidade encontrada é comum em populações derivadas de compostos genéticos amplos, onde a seleção direta para esterilidade ou restauração não foi aplicada. O conjunto de plantas *msms* em citoplasma S representa material de grande interesse para a formação de linhas A, mas a heterogeneidade geral exige ciclos adicionais de purificação (Havey 2022).

A população Alfa São Francisco apresentou o padrão citoplasmático mais complexo. Foram detectados indivíduos com citoplasma N, T e perfis não classificados, sugerindo forte recombinação mitocondrial ou diferentes níveis de subgenomas coexistindo na mesma população — um fenômeno amplamente documentado em estudos recentes que utilizaram sequenciamento de longa leitura (Jang et al. 2021; Kim et al. 2024). A variação nuclear (*MsMs*, *Msms* e *msms*) indica um cenário ainda mais dinâmico, onde combinações incomuns, como *msms* em citoplasmas não-S, podem ocorrer. Esses padrões têm sido interpretados como variantes de CMS criptogênica, nas quais a expressão da esterilidade depende de rearranjos mitocondriais não tradicionais (Kim et al. 2024). Esse tipo de resultado reforça a importância da reavaliação dos sistemas de classificação citoplasmática e da incorporação de ferramentas genômicas modernas nos programas de melhoramento.

O conjunto de resultados indica que as populações comerciais da cebola são mosaicos genéticos complexos, formados por décadas de seleção informal, fluxo gênico e recombinação mitocondrial. Em regiões como o Semiárido brasileiro, onde a produção de sementes híbridas exige linhagens maternas produtivas, torna-se essencial identificar materiais com citoplasma S bem definido, genótipo nuclear compatível com macho-esterilidade e ausência de alelos restauradores em linhagens destinadas ao papel de A. Nessa perspectiva, cultivares como IPA 11 e Botucatu mostram não fornecerem, simultaneamente, fontes seguras de linhagens estereis e mantenedoras, enquanto IPA 10 apresenta genótipo nuclear mais adequados para derivação de linhagens B, e materiais como BRS Rio Vale, Roxa 13 e BRS Carrancas despontam como fontes promissórias de linhagens A após processos de purificação. Já Alfa São Francisco ilustra

os desafios atuais associados à variabilidade citoplasmática em germoplasmas amplamente cultivados, evidenciando a importância de integrar marcadores moleculares e abordagens genômicas avançadas para aperfeiçoar a distinção entre citoplasmas férteis e estereis e otimizar o desenho de esquemas A/B/C em condições e semiáridas

Estudos atuais demonstram uma variação significativa entre os tipos de citoplasma em populações cultivadas. Em uma análise de 1.126 plantas de cultivares comuns no sul do Brasil, o citoplasma T se mostrou o mais predominante, sendo detectado em 56,3% das amostras (Alves et al., 2024). Em contraste, o citoplasma S apresentou uma ocorrência extremamente rara no mesmo conjunto de cultivares, sendo identificado em apenas 1,8% das amostras (Alves et al., 2024). Essa distribuição desigual destaca a importância da seleção assistida por marcadores (MAS) para o manejo e identificação rápida das linhagens parentais nos programas de hibridação (Khar et al., 2022).

Uma das principais especificações observadas neste estudo foi a identificação do genótipo no locus restaurador da esterilidade citoplasmático-nuclear, uma vez que o uso isolado dos marcadores *AcSKPI* e *AcPMSI* não se mostrou suficiente para discriminar de forma inequívoca os alelos *Ms* e *ms* todos os estudos avaliados. Em materiais como Carrancas, IPA 11 e IPA 10, a genotipagem foi relativamente direta, com plena concordância entre os marcadores e o padrão esperado de restauração ou manutenção da esterilidade. Em contrapartida, em Botucatu a inferência dos alelos foi mais consistente com base em *AcSKPI*, enquanto em Rio Vale, Roxa 13 e Alfa São Francisco a resolução foi superior quando se priorizou a interpretação a partir de *AcPMSI*, evidenciando que a acurácia da seleção assistida depende da combinação de marcadores e do contexto genético específico de cada população.

CONCLUSÕES

1. As frequências citoplasmáticas indicam predomínio de citoplasma N na maior parte das populações avaliadas, com exceção de Rio Vale, Roxa 13, Carrancas e Alfa São Francisco, nas quais ocorrem citoplasmas S, T ou não específicos combinados a diferentes genótipos restauradores
2. A heterogeneidade núcleo–citoplasma confere a Rio Vale, Roxa 13, Carrancas e Alfa São Francisco potencial para a identificação e purificação de linhagens “A”, enquanto a uniformidade do citoplasma N e a elevada frequência de plantas *msms* em Ipa 10 a qualificam como candidata funcional a linhagem “B” mantenedora.
3. Por outro lado, Ipa 11 e Botucatu, descrições por citoplasma N praticamente fixadas e mostram-se um pouco adequadas tanto para derivação de linhagens macho-estéreis quanto de mantenedoras em sistemas CMS.

REFERENCIAS

ALVES, I. L. de S.; SANTOS, C. A. F.; OLIVEIRA, V. R. Identification of cytoplasm type and nuclear *Ms* gene in onion cultivars. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 54, e79620, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632024v5479620>.

CHIKH-ROUHO, H. et al. Onion Male Sterility: Genetics, Genomics and Breeding. **Horticulturae**, Basel, v. 11, n. 5, p. 539, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae11050539>.

DOYLE, J. J.; DOYLE, J. L. Isolation of plant DNA from fresh tissue. **Focus**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 13-15, 1990.

ENGELKE, T.; TEREFE, D.; TATLIOGLU, T. A. PCR-based marker system monitoring CMS-(S), CMS-(T) and (N)-cytoplasm in the onion (*Allium cepa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 107, n. 1, p. 162-167, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-003-1230-3>.

FERREIRA, R. R. **Identificação molecular do locus restaurador da macho-fertilidade (Ms), tipo de citoplasma e viabilidade de pólen em acessos de cebola (*Allium cepa* L.)**. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Melhoramento Genético de Plantas) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1079911>. Acesso em: 23 abr. 2026.

FERREIRA, R. R.; SANTOS, C. A. F.; OLIVEIRA, V. R. Fertility restoration locus and cytoplasm types in onion. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 16, n. 3, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4238/gmr16039766>.

HAVEY, M. J. Cytoplasmic determinations using mitochondrial and chloroplast DNA markers distinguish commercially used cytoplasms of onion. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 146, n. 5, p. 351–355, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21273/JASHS05063-21>.

HAVEY, M. J. Onion cytoplasmic male sterility: current knowledge and emerging perspectives. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 135, p. 1–14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03967-y>.

HUO, X. M. et al. AcSKP1, a multiplex PCR-based co-dominant marker in complete linkage disequilibrium with the male-fertility restoration (*Ms*) locus, and its application in open-pollinated populations of onion. **Euphytica**, Dordrecht, v. 204, p. 711–722, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-015-1374-7>.

HUO, X. M. et al. Inheritance and instability of nuclear male sterility alleles in onion. **Molecular Horticulture**, [s. l.], v. 3, n. 17, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1186/s43897-023-00065-z>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção Agrícola Municipal**. Tabela 1612 – Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal.html>. Acesso em: 10 out. 2025.

JANG, H. et al. Extensive mitochondrial genome rearrangements and substoichiometric shifting in *Allium cepa*. **Plant Journal**, Oxford, v. 108, p. 1255–1271, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/tpj.15511>.

JO, E. J. et al. Mitochondrial genomic variation underlying male-sterility phenotypes in onion. **BMC Genomics**, London, v. 21, n. 789, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07172-1>.

JONES, H. A.; CLARKE, A. E. Inheritance of male sterility in the onion and the production of hybrid seed. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Geneva, v. 43, p. 189–194, 1943.

KHAR, A. et al. Molecular marker-based characterization of cytoplasm and restorer of male sterility (*Ms*) locus in commercially grown onions in India. **Molecular Biology Reports**, Dordrecht, v. 49, n. 7, p. 5535–5545, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11033-022-07451-9>.

KIM, S. et al. Identification of a novel chimeric gene, *orf725*, and its use in development of a molecular marker for distinguishing three cytoplasm types in onion (*Allium cepa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 118, p. 433–441, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0909-x>.

KIM, S. et al. Identification of candidate genes associated with fertility restoration of cytoplasmic male-sterility in onion (*Allium cepa* L.) using a combination of bulked segregant analysis and RNA-seq. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 128, p. 2289–2299, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-015-2585-0>.

KIM, S.; HAVEY, M. J. Genetic architecture of fertility restoration and cytoplasmic interactions in onion. **Plant Physiology**, Rockville, v. 185, p. 1291–1305, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab003>.

KIM, S. et al. Long-read sequencing resolves complex mitochondrial ORFs associated with CMS in onion. **Plant Biotechnology Journal**, Oxford, v. 22, p. 144–159, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1111/pbi.14175>.

LUO, X. et al. Evolutionary dynamics of cytoplasmic male-sterility systems across onion breeding programs. **Horticulture Research**, Oxford, v. 10, n. 123, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1093/hr/uhac123>.

MCCALLUM, J. et al. Breeding strategies for CMS-based hybrid onion seed production. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 136, p. 15–29, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00122-023-04250-w>.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). **FAOSTAT**: Crops and livestock products. Roma: FAO, 2024. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 10 nov. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). **FAOSTAT**. Roma: FAO, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 10 out. 2025.

SANSAN OC, E. et al. Onion (*Allium cepa* L.) and Drought: Current Situation and Perspectives. **Scientifica**, Cairo, v. 2024, 6853932, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1155/2024/6853932>.

SATO, Y. PCR amplification of CMS-specific mitochondrial nucleotide sequences to identify cytoplasmic genotypes of onion (*Allium cepa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 96, n. 3, p. 367-370, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/s001220050750>.

SHARMA, S.; VERMA, R.; SINGH, N. Cytoplasmic diversity and fertility restoration patterns in commercial onion cultivars. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 12, 655231, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.655231>.

SOTO, V. et al. Onion hybrid seed production: relation with nectar composition and flower traits. **Journal of Economic Entomology**, Oxford, v. 111, p. 1023–1029, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toy081>.

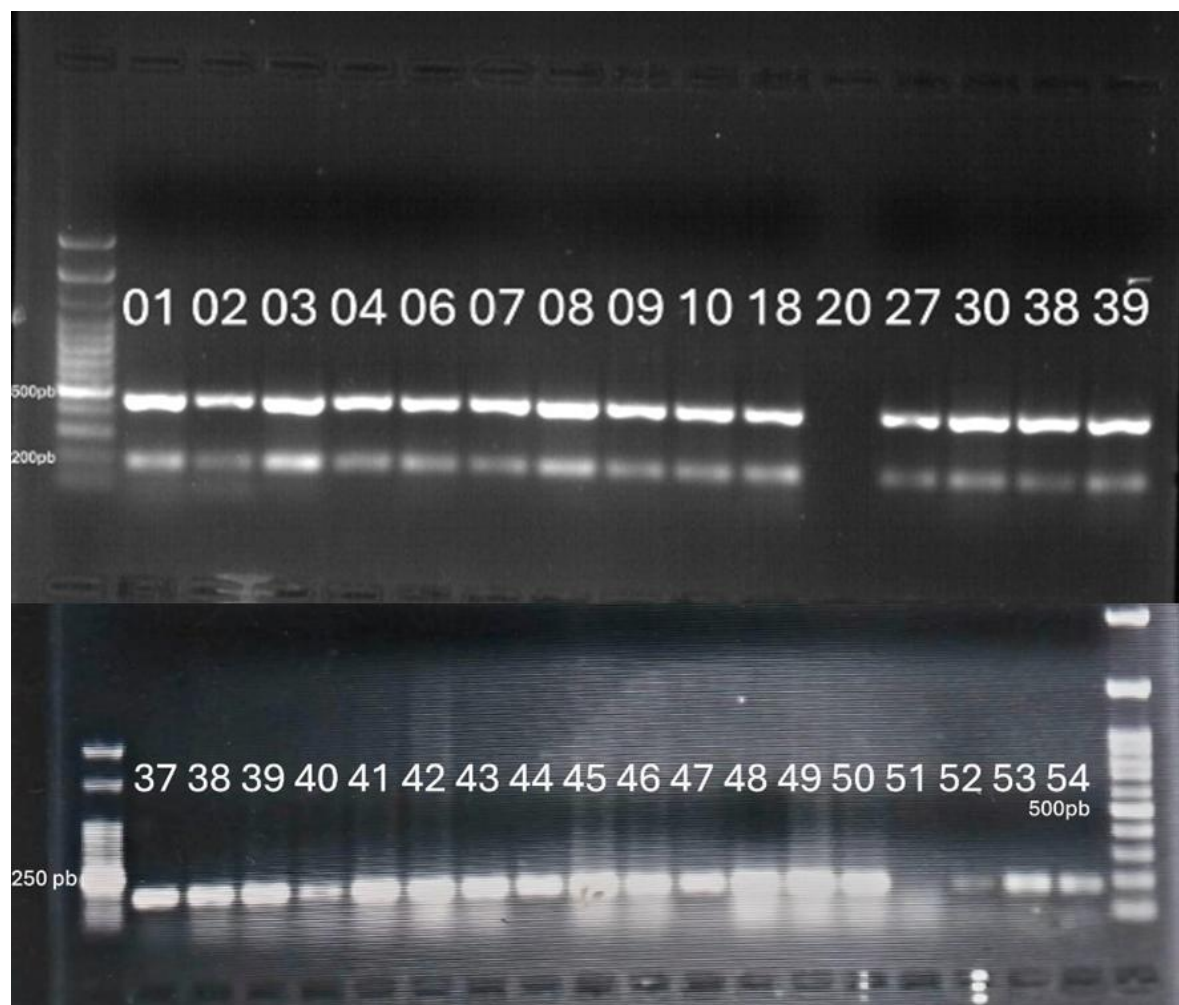


Figura 1. Fragmentos de DNA de 33 amostras de cebola (*A. cepa* L.), amplificados com os primers dos marcadores 5'cob. População Rio Vale (acima) com citoplasma S, (fragmentos com 414 e 180 pb, colunas 01, 02, 03, 04, 06, 07, 08, 09, 10, 18, 27, 30, 38, e 39). População Ipa 10 (abaixo) com citoplasma N (fragmentos com 180 pb, colunas 37, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53 e 54). Ladder de 100 pb nas extremidades.



Figura 2. Fragmentos de DNA de 28 amostras de cebola (*A. cepa* L.), amplificados com os primers dos marcadores *orfA501*. População Carrancas (acima) com citoplasma S, (fragmento com 473 pb colunas 05, 06, 08, 12, 13, 21 e 57). População Ipa 11 citoplasma N, (ausência de fragmentos com 473 pb = colunas 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38). Todos com Ladder 100 pb.

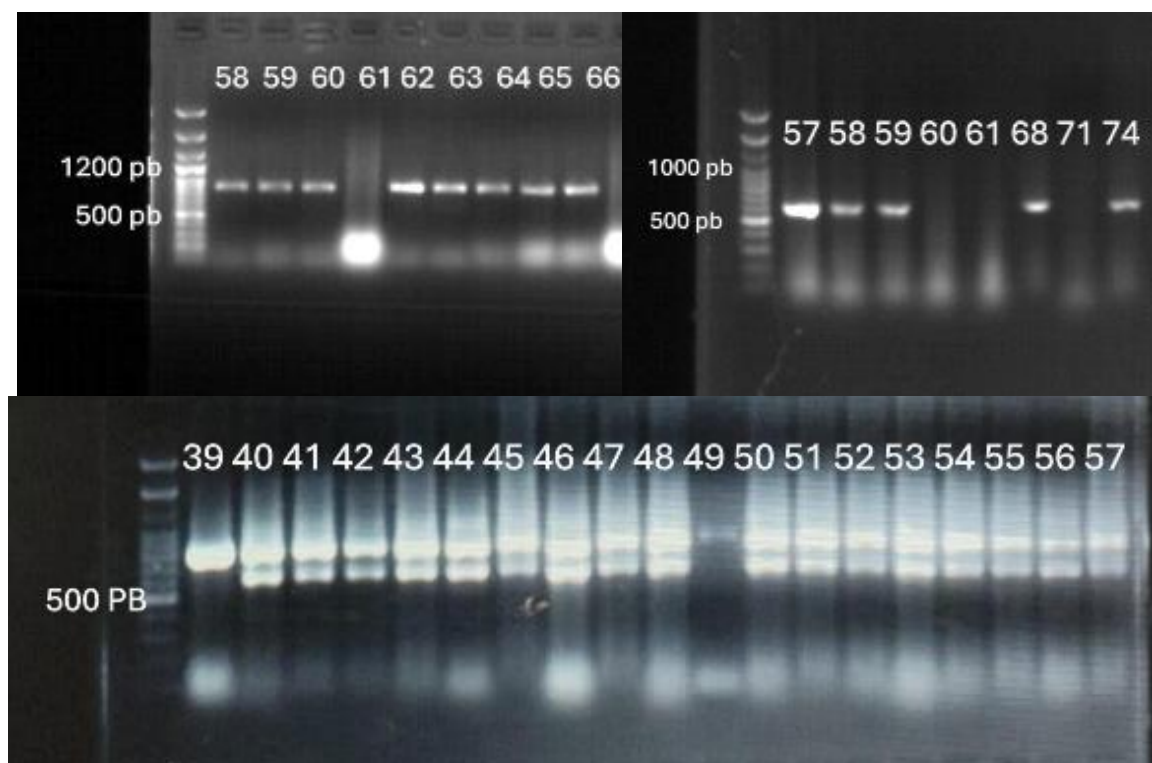


Figura 3. Fragmentos de DNA de 32 amostras de cebola (*A. cepa* L.), amplificados com os primers dos marcadores *Orf725*. População Botucatu (esquerda e acima) com citoplasma N, (fragmento com 833 pb colunas 58, 59, 60, 62, 63, 64, 65 e 66). População Roxa 13 citoplasma S, (fragmentos com 628 pb colunas 57, 58, 59, 68 e 74). População Alfa São Francisco com citoplasma não definido (fragmentos com 628 e 833 pb colunas 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56 e 57). Todos com Ladder 100 pb.

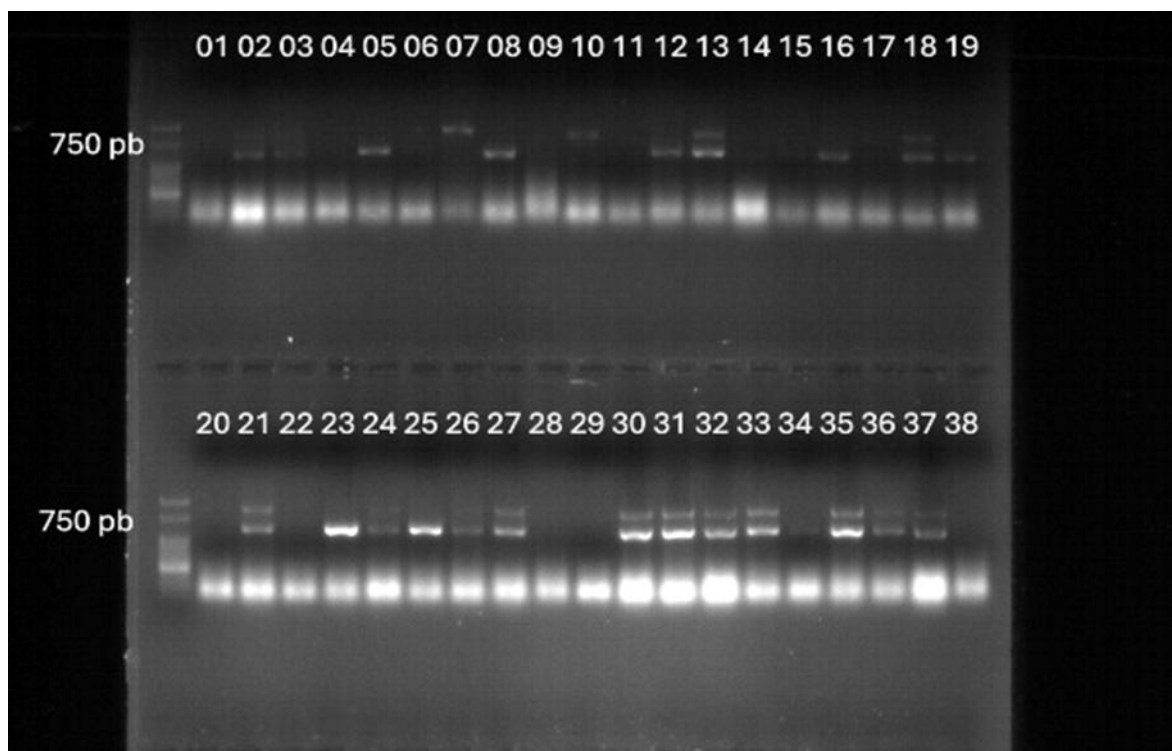


Figura 4. Fragmentos de DNA de 25 amostras de cebola (*A. cepa* L.), amplificados com os primers do marcador *AcSKPI*. População carrancas homozigoto recessivo, (fragmentos com 628 pb colunas 05, 08, 12, 16, 19, 23, 25 e 34), heterozigoto (fragmentos com 628 e 898 pb colunas 02, 03, 13, 18, 21, 24, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 35, 36 e 37) homozigoto dominante (fragmentos com 898 pb coluna 07 e 10). Todos com Ladder 50 pb.

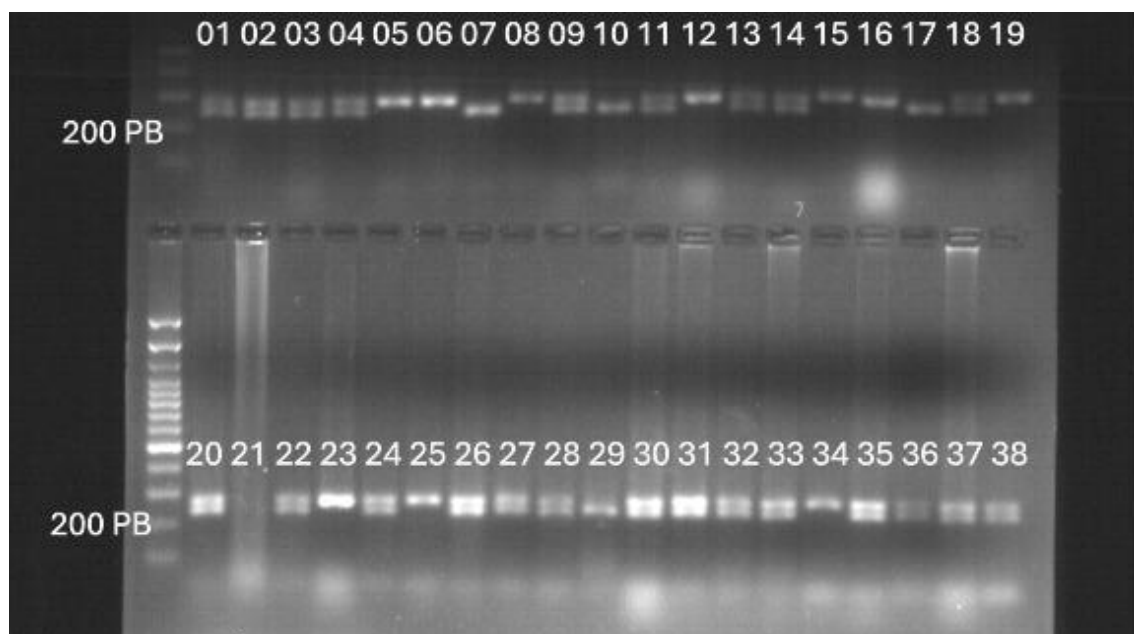


Figura 5. Fragmentos de DNA de 37 amostras de cebola (*A. cepa* L.), amplificados com os primers do marcador *AcPMSI*. População carrancas homozigoto recessivo (fragmentos com 628 pb colunas 05, 06, 08, 12, 15, 16, 19, 23, 25 e 34), heterozigoto (fragmentos com 628 e 898 pb colunas 01, 02, 03, 04, 09, 11, 13, 14, 18, 20, 22, 24, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 37 e 38) homozigoto dominante (fragmentos com 898 pb coluna 07, 10, 17 e 29). Todos com Ladder 100 pb.

Tabela 1: Marcadores polimórficos em DNAs mitocondriais (mt) distinguindo citoplasmas de cebola com base nos resultados de Sato (1998), Engelke et al. (2003) e Havey e Kim(2021). Adaptado de Havey e Kim (2021) Citoplasma masculino-fértil normal (N) e citoplasma masculino-estéril S (Jones e Clarke1943), T (Berninger 1965) e R (Havey e Kim 2021). + indica amplificação;- indica ausência de amplificação. Os tamanhos dos amplicons estão em pares de bases (pb).

Citoplasma	<i>5'Cob</i>		<i>OrfA501</i>	<i>Orf725</i>	
Bandas Amplificadas	(180 bp)	(414 bp)	(473 bp)	(628 bp)	(833 bp)
N	+	-	-	-	+
T	+	-	+	-	+
S	+	+	+	+	-
R	+	-	-	+	+

Tabela 2: Tipo de citoplasma fértil N e macho-estéril S e T e genotipagem para o locus restaurador da macho fertilidade (*Ms*) em sete populações comerciais.

População	Marcador citoplasmático	Tipo de Citoplasma					Marcador nuclear	Genotipagem		
		N	S	T	R	Não identificado		<i>MsMs</i>	<i>Msms</i>	<i>msms</i>
Ipa 11	<i>5' cob/orfA501/orf725</i>	74	0	0	0	0	<i>AcSKP1</i>	59	0	0
							<i>AcPMS1</i>	38	0	0
Botucatu	<i>5' cob/orfA501/orf725</i>	54	0	0	0	0	<i>AcSKP1</i>	49	0	0
							<i>AcPMS1</i>	5	0	0
Ipa 10	<i>5' cob/orfA501/orf725</i>	62	0	0	0	0	<i>AcSKP1</i>	0	0	53
							<i>AcPMS1</i>	0	0	60
Rio vale	<i>5' cob/orfA501/orf725</i>	0	68	0	0	0	<i>AcSKP1</i>	1	1	0
							<i>AcPMS1</i>	26	30	12
Roxa 13	<i>5' cob/orfA501/orf725</i>	0	66	1	0	0	<i>AcSKP1</i>	12	2	0
							<i>AcPMS1</i>	59	8	0
Carrancas	<i>5' cob/orfA501/orf725</i>	0	71	0	0	0	<i>AcSKP1</i>	3	22	14
							<i>AcPMS1</i>	11	43	17
Alfa São Francisco	<i>5' cob/orfA501/orf725</i>	3	0	12	0	56	<i>AcSKP1</i>	6	0	2
							<i>AcPMS1</i>	35	25	11

CAPÍTULO II - ADAPTABILIDADE E ESTABILIDADE DE HÍBRIDOS DE CEBOLA TROPICAL PARA PRODUÇÃO DE BULBOS COMERCIAIS¹

RESUMO

A cebola (*Allium cepa*) é uma importante fonte de renda rural na região tropical semiárida do Nordeste do Brasil. No entanto, os agricultores locais ainda dependem fortemente de sementes híbridas importadas. Avaliamos a interação genótipo-ambiente (G×A) e identificamos híbridos de cebola com ampla adaptação e maior estabilidade fenotípica, originários de um programa brasileiro de melhoramento genético. Doze híbridos experimentais, dois híbridos comerciais e uma cultivar de polinização aberta foram avaliados em oito ambientes semiáridos (estados da Bahia e Pernambuco) em um delineamento experimental de blocos casualizados com duas repetições. A produtividade de bulbos comercializáveis foi analisada por ANOVA combinada e por duas abordagens de estabilidade: regressão de Eberhart-Russell e biplot AMMI. Além disso, a produtividade comercializável também foi avaliada com ajuste de covariância, utilizando a densidade de plantas comercializáveis como covariável. Foi detectada interação G×A significativa, e ambos os métodos destacaram consistentemente dois híbridos de alta produtividade (‘EPCEB20H037’ e ‘EHCEB21H0507’) como os que apresentam melhor adaptação e desempenho mais estável. Esses resultados apoiam o uso de híbridos de cebola desenvolvidos localmente para melhorar a produtividade e reduzir os custos de sementes em toda a região semiárida brasileira.

PALAVRAS CHAVES: *Allium cepa*, interação genótipo × ambiente, AMMI, regressão.

¹Artigo publicado na revista Crops, ISSN 2673-7655 “Adaptability and Stability Analyses for Marketable Bulb Yield of Adapted Semi-Arid Tropical Onion Hybrids”

ABSTRACT

Onion (*Allium cepa*) is a major source of rural income in the tropical semi-arid region of Northeast Brazil. Nevertheless, local farmers still depend heavily on imported hybrid seeds. We assessed genotype-by-environment (G×E) interaction and identified broadly adapted and more phenotypically stable onion hybrids originated from a Brazilian breeding program. Twelve experimental hybrids, two commercial hybrids and one open-pollinated cultivar were evaluated across eight semi-arid environments (Bahia and Pernambuco states) under a randomized complete block design with two replications. Marketable bulb yield was analyzed by combined ANOVA and by two stability approaches, Eberhart–Russell regression and AMMI biplot. In addition, marketable yield was also evaluated with a covariance adjustment using marketable stand as a covariate. Significant G×E interaction was detected, and both methods consistently highlighted two high-yielding hybrids (‘EPCEB20H037’ and ‘EHCEB21H0507’) as the ones with superior adaptation and more stable performances. These results support the use of locally developed onion hybrids to improve yield and reduce seed costs across the Brazilian semi-arid region.

KEYWORDS: *Allium cepa*; genotype × environment interaction; AMMI; regression

INTRODUÇÃO

A cebola (*Allium cepa*) é economicamente a mais importante espécie do gênero *Allium*, sendo a segunda hortaliça mais valiosa no mundo, atrás apenas do tomate (Havey 2018). Em 2023, a produção mundial de bulbos de cebola foi 136.191.669 t, produzidos em 6.971.254 ha, com produtividade mundial média de 19,5 t/ha. As maiores produtividades foram reportadas na Coreia do Sul e EUA, com produtividade de 67,8 t/ha a 61,1 t/ha, respectivamente. No Brasil a produção total de bulbos foi 1.639.970 t, ocupando a 15ª posição mundial, produzida em área de 49.358 ha e produtividade de 33,2 t/ha (FAOSTAT, 2025). A produção de sementes de cebola no mundo foi estimada em, aproximadamente, 8.800 t em 2013 (HAVEY 2018).

Dois tipos de genótipos de cebola são comumente cultivados: variedades de polinização aberta (OP) e híbridos. Em geral, os híbridos apresentam maior vigor, produtividade e uniformidade, podendo também reunir características favoráveis de adaptação e resistência a estresses bióticos e abióticos. Além disso, favorecem maior proteção comercial e valorização da propriedade intelectual associada ao trabalho de melhoramento (SOTO et al., 2018). Em alguns países e regiões, a baixa produtividade pode ser atribuída ao grande cultivo de OPs em relação a híbridos de cebola; em países com alta produtividade, como Coreia do Sul e EUA, o cultivo de híbridos é superior a 98% (Khar et al, 2022). Quase dois terços das cultivares de cebola nos catálogos das empresas de sementes mais importantes pertencem à categoria híbrida (Soto et al., 2018). Em Cafarnaum e Casa Nova, BA, Brasil, a produtividade de cebola em 2024 foi de 47,3 t/ha e 28,3 t/ha, respectivamente (IBGE, 2025), podendo essa diferença ser atribuída ao predomínio de cultivo de híbridos de cebola, superior a 95%, em Cafarnaum. Uma das razões para o baixo plantio de híbridos de cebola é o custo elevado por hectare, 3x superior ao custo das OPs (Alves et al., 2023), devido, em parte, ao custo elevado de importação de sementes. Esse cenário começa mudar em 2024 com o desenvolvimento do primeiro híbrido nacional de cebola, a BRS Belatriz 239.

Como revisado por Singh et al. (2024), trabalhos comparando a produtividade de híbridos e OPs de cebola são escassos, estando limitados a poucos estudos na Índia e no Brasil, mas todos indicando a superioridade dos híbridos. De idêntica forma, estudos para avaliar as respostas de genótipos em vários ambientes e detectar a presença da interação genótipo × ambiente (G×A) são ainda mais escassos com cebola em geral e, praticamente, inexistentes com híbridos. Segundo Cruz et al. (2012), é essencial identificar genótipos com comportamento previsível (estabilidade) e respostas satisfatórias às variações ambientais em condições

específicas e gerais (adaptabilidade), para recomendação de novas cultivares. Entre os métodos mais empregados nessas análises estão o de regressão (Eberhart e Russell, 1966) e o método AMMI Biplot (Zobel et al., 1988).

O objetivo do presente estudo foi avaliar 12 híbridos experimentais de cebola do programa de melhoramento da Embrapa, comparando com dois híbridos comerciais e uma população de polinização aberta (OP), estimando parâmetros de adaptabilidade e estabilidade, para recomendação de híbridos para a região nordeste do Brasil.

MATERIAL E METODOS

Germoplasma e ambientes de avaliações

Doze híbridos experimentais de cebola tropical do programa de melhoramento da Embrapa Hortaliças (EHC) e Embrapa Semiárido (EPC), dois híbridos comerciais e uma cultivar de polinização aberta (OP) foram avaliados em municípios dos estados da Bahia e Pernambuco (**Tabela 1**). Os híbridos do programa da Embrapa foram: EPCEB22H040 (39 A III X C106), EPCEB20H036 (39 A III x Rio Vale), EPCEB21H024 (36A x C106), EPCEB22H062 (445 A x ALFA SF CXI), EPCEB20H037 (39AIII x Alfa SF CXII), EPCEB21H025 (T5A x C106), EPCEB21H008 (36A x IPA 11 2Auto), EHCEB21H0507 (54 A (CNPH 6313) x 49C), EHCEB20H0270 55 (A-CNPH 6416 x 127 C-BRS 367), EHCEB20H0746 (55 A-III CNPH 6416 x 49C), EHCEB21H0262 (55A CNPH 6416 x 106 C IPA 11) e EPCEB22H061 (445 A x IPA 11 2Auto). A cultivar OP foi a BRS Alfa São Francisco e dois híbridos comerciais (Fernada e Serena) utilizados na região. Todos os experimentos foram conduzidos em áreas de produtores tradicionais de cebola. Quatro experimentos foram conduzidos no final do ano de 2023 e início de 2024 e outros quatro experimentos em meados do ano de 2024(**Tabela 2**), quando as temperaturas são mais amenas. Cada experimento foi considerado com um local independente para análises conjunta e estimativas de parâmetros.

Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos completos casualizados, com duas repetições/local, parcela de 2,0 m x 1,2 m, em sulcos preparados com enxada rotativa. Cada parcela foi marcada com oito linhas e as sementes semeadas manualmente para todos os tratamentos. O sistema de irrigação foi de gotejamento com duas ou três fitas gotejadoras por parcela. Cinco dias após início da irrigação foi aplicado herbicida de contato Oxifluorfen para controle de ervas daninhas. Trinta a trinta e cinco dias após a semeadura direta foi efetuado o

raleio e/ou transplântio para a densidade populacional planejada, 240 plantas/parcela, o equivalente a 800.000 plantas/ha. Fertilizações, controle de ervas daninhas e irrigações foram efetuadas conforme manejo dos agricultores em áreas adjacentes de cebola.

Variáveis analisadas e análises de variâncias

A colheita e análises de produção de bulbos foram efetuadas com o tombamento de no mínimo 75% das plantas das parcelas. Os bulbos foram classificados e pesados para os seguintes tipos, de acordo com o diâmetro, em mm: 1 - bulbo chupeta e charuto, 2 - bulbo de 35 a 45, 3 - bulbo de 46 a 60, 4 - bulbo de 61 a 75 e 5 - bulbo acima de 76. Adicionalmente, foram classificados para formato do bulbo (arredondado, comprido ou achatado), presença de bulbos duplicados e segregantes para cor do bulbo. A produtividade de bulbos/parcela foi estimada para produtividade de bulbos comerciais/ha, considerando como comerciais os tipos 2, 3 e 4, com diâmetros variando de 35 a 75 mm. Para classificação dos bulbos foram usadas caixas classificadores, com abertura de acordo com o diâmetro de cada tipo.

Análises de variância foram efetuadas para cada local e a produtividade ajustada para a média de bulbos comerciais/local pelo método da covariância, conforme procedimento descrito por Vencovsky e Barriga (1992): Média ajustada = média do genótipo + coeficiente de regressão*(número de bulbos comerciais do genótipo – média de bulbos do experimento). Um ‘script’ para ajuste da produtividade/parcela foi desenvolvido para o Proc GLM do SAS, SAS Universty on-line. Análise conjunta foi efetuada para os oito experimentos considerando genótipo como efeito fixo e os locais e a interação genótipo*local como de efeitos aleatórios. Todas as análises foram efetuadas no Proc GLM do SAS, com a opção ‘lsmeans’, SAS Universty on-line.

Análises de adaptabilidade e estabilidade

Estimativas dos parâmetros de adaptabilidade e estabilidade foram realizadas para os seguintes métodos: métodos da regressão de Eberhart e Russell (1966) e ‘additive main effects and multiplicative interaction’ (AMMI) (Zobel et al., 1988).

No método de Eberhart e Russell (1966) os genótipos são classificados de acordo com o coeficiente de regressão: $\beta_{1i}=1$, $\beta_{1i}>1$ e $\beta_{1i}<1$ significam genótipos com ampla adaptabilidade, adaptação a ambientes favoráveis e adaptação a ambientes desfavoráveis, respectivamente. A variância do desvio da regressão define a estabilidade do genótipo, sendo

$\delta_{ij}=0$ e $\delta_{ij}\neq 0$ com alta e baixa estabilidade, respectivamente. As análises para o método de Eberhart e Russell (1966) foram realizadas no software Genes (Cruz 2013), com os resultados das média 'lsmeans' estimadas no Proc GLM do SAS University.

As representações gráficas geradas pelo modelo dos métodos AMMI (Zobel et al., 1988), consideram os dois componentes principais (IPCA) e as médias dos genótipos nos ambientes avaliados. Visualizados em dois gráficos: 1) $IPCA2 \times IPCA1$, que considera os efeitos da interação genótipo x ambiente, e 2) $IPCA1 \times$ média dos genótipos, que indica a contribuição de cada genótipo e ambiente para a interação. Os genótipos e ambientes mais estáveis estão localizados próximos à origem dos eixos IPCAs (Duarte e Vencovsky, 1999). A classificação dos genótipos pelo AMMI é mais intuitiva e visualizada em gráfico, quando comparado com o método de Eberhart e Russell (1966), que aplica teste estatístico para classificar os genótipos. 'Script' desenvolvido (Duarte e Vencovsky, 1999) foi adaptado para o presente estudo e executado no SAS, SAS University on-line.

RESULTADOS

Os coeficientes de variação (CV) das análises de variâncias individuais para estande total (BulT) e comercial (BulC) de bulbos/parcela variaram de 09% a 19%, indicando que as condições experimentais foram satisfatórias, mesmo para experimentos conduzidos em áreas de produtores, com reduzido número de repetições/local (**Tabela 3**). As médias do BulT foram muito superiores ao planejado, 240 plantas/parcela, nos experimentos de Cafarnaum e Lapão em 2023, devido a dificuldades de manejo, enquanto nos demais experimentos de 2023 e 2024 as médias do BulT/ tratamento de ficaram abaixo do planejado (**Tabela 3**). Nas duas regiões de avaliação dos experimentos, os produtores adotam densidade de plantio de até 1.000.000 de plantas/ha, em semeio direto.

A correção por covariância para média de bulbos comerciais/experimento não alterou a média geral de bulbos comerciais, e teve pequena alteração no coeficiente de variação (CV), mas alterou a significância pelo teste F de alguns experimentos e, principalmente, as médias de alguns tratamentos (**Tabela 4**).

As produtividades médias de bulbos comerciais (t/ha) foram de 33,1 e de 42,1 para os experimentos de 2023_24 e 2024, respectivamente (Tabela 3). O plantio de 2024 foi efetuado no final do primeiro semestre, quando às temperaturas são mais amenas e mais propícias para

o cultivo de cebola nas duas regiões, que contribuiu para a maior produtividade. A OP BRS Alfa São Francisco teve desempenho distinto nas duas épocas de plantio: superior a média dos experimentos de 2023_24, exceto em João Dourado, e inferior a média dos experimentos de 2024 (Tabela 3), corroborando com a recomendação de plantio dessa OP para o final do ano, com presença de chuvas e temperaturas mais elevadas na região.

O híbrido comercial 14 apresentou produtividade superior aos híbridos comerciais da Embrapa, impactado pela alta produtividade no experimento de Petrolina 2024 (Tabela 3). Os híbridos experimentais EPCEB20H037 (5) e EHCEB21H0507 (8) da Embrapa apresentaram produtividade semelhante aos dois híbridos comerciais, desconsiderando o impacto do experimento de Petrolina no híbrido 14, indicando potencial para recomendação para a região.

A relação entre o maior e o menor QMR para a produção comercial sem (PHa) e com correção por covariância (PHaC) para número de bulbos comerciais/local foi inferior a 7,0, indicando boa consistência para a análise conjunta dos experimentos, mas com ligeira discrepância quando considerado o QMR de PHaC do experimento de Lapão (Tabela 4). A interação genótipo $\times$ ambiente foi significativa ($p < 0,01$), indicando comportamento diferenciado dos híbridos nos oito ambientes avaliados. Nessa situação a aplicação de métodos de adaptabilidade e estabilidade é indicada para identificar os híbridos de maior potencial de recomendação para os produtores.

Na análise de regressão, os genótipos apresentaram padrões distintos de adaptabilidade e estabilidade (**Tabela 5**). A cultivar BRS Alfa São Francisco apresentou média de produtividade de bulbos próxima à média geral dos experimentos com híbridos, associada à ampla adaptabilidade e boa previsibilidade, comportamento compatível com materiais de polinização aberta tradicionalmente reconhecidos por maior estabilidade. Entre os híbridos comerciais, H2 destacou-se por apresentar ampla adaptação e boa estabilidade, enquanto H1 mostrou ampla adaptação, porém com baixa previsibilidade, embora ambos tenham exibido produtividade superior à média geral dos experimentos.

Entre os híbridos experimentais da Embrapa, os genótipos 1, 3, 4, 5, 10, 11 e 12 reuniram ampla adaptação e boa estabilidade, configurando-se como os materiais mais promissores para recomendação em diferentes ambientes de cultivo do Nordeste brasileiro. Por outro lado, os híbridos 6, 8 e 9 também apresentaram ampla adaptação, porém com baixa estabilidade, o que indica potencial produtivo, mas com maior sensibilidade à variação ambiental. Já os híbridos 2

e 7 mostraram adaptação específica a ambientes favoráveis, sendo o híbrido 2 dotado de boa previsibilidade e o híbrido 7 de baixa previsibilidade, o que sugere indicação mais restrita a condições de cultivo de maior potencial produtivo.

Destaca-se ainda que os híbridos experimentais 8 e 9 apresentaram média de produtividade semelhante à do híbrido comercial H2, evidenciando competitividade agrônômica em relação ao material comercial. Por sua vez, a maior produtividade foi observada no híbrido comercial H1, desempenho fortemente influenciado pelo seu rendimento no ambiente de Petrolina (Tabela 2). Assim, considerando conjuntamente produtividade média, adaptabilidade e estabilidade, os híbridos experimentais 1, 3, 4, 5, 10, 11 e 12 apresentam maior potencial para recomendação ampla, ao passo que os híbridos 2 e 7 podem ser considerados promissores para ambientes favoráveis, e os híbridos 6, 8 e 9 devem ser interpretados com maior cautela devido à menor previsibilidade de desempenho.

Na análise AMMI, os dois componentes principais, IPCA1 e IPCA2, explicaram 34,3% e 26,3%, respectivamente, com uma contribuição cumulativa de 60,6% para a interação $G \times A$, valor próximo a 70%, considerado como de boa explicação em gráfico bidimensional. Os ambientes e os tratamentos nas análises do $IPCA2 \times IPCA1$ (**Figura 1A e 1C**), bem como do $IPCA1 \times$ médias (**Figura 1B e 1D**), apresentaram disposição aproximada no gráfico bidimensional, sem e com correção para a produção comercial de bulbos, confirmando que o ajuste não interferiu na dispersão gráfica. Os ambientes mais estáveis e de menor contribuição para a interação $G \times A$ (próximos à origem dos eixos IPCAs) foram João Dourado²³ (2) e João Dourado^{H24} (7) (**Figura 1A e 1C**), enquanto os genótipos de maior estabilidade (próximos ao centro dos gráficos) e menor contribuição para a interação $G \times A$ foram EPCEB22H040 (1), EHCEB21H0262 (11) e BRS Alfa São Francisco (13) (**Figura 1B e 1D**).

DISCUSSÃO

Uma das razões para a não adoção em larga escala do plantio de híbridos de cebola no Nordeste brasileiro é o alto custo das sementes importadas, que corresponde a quase 15% do custo total de produção/ha, que inclui fertilizantes, serviços e Agroquímicos. A produção local de híbridos nacionais poderá reduzir esses valores e incentivar o mercado regional, além de disponibilizar híbridos com maior adaptação aos fatores bióticos e abióticos, desde que as linhas dos híbridos, com potencial de expressar vigor de heterose, sejam extraídas de OPs regionais. Os híbridos de cebola plantados no Brasil são, em sua maioria, importados de países do

Hemisfério Norte e desenvolvidos em regiões de clima temperado. A introdução de um híbrido adaptado às condições de temperatura elevada e em períodos de maiores pluviosidade, típicas de clima tropical, será um grande incentivo para desenvolvimento da cebolicultura na região Nordeste.

Os experimentos foram conduzidos em áreas representativas do cultivo de cebola no nordeste: 1) microrregião geográfica de Irecê, BA (Cafarnaum, João Dourado e Lapão) e o 2) dipolo Juazeiro, BA e Petrolina, PE (**Tabela 2**). De idêntica forma, os plantios efetuados no final de 2023 e no início do segundo semestre de 2024 (**Tabela 2**) são representativos das principais épocas de plantio no nordeste: final do segundo semestre, com temperaturas mais elevadas, e início do segundo semestre, com temperaturas mais amenas. Os produtores locais indicam que na microrregião de Irecê, predomina o cultivo de híbridos, enquanto na área de influência do dipolo Petrolina/Juazeiro ainda é considerável o plantio de Ops.

O presente estudo de avaliação de híbridos de cebola é pioneiro na região Nordeste, que responde por quase 20% da produção nacional (IBGE, 2025), sendo também pioneiro na literatura especializada ao avaliar a interação $G \times A$ de experimentos multilocais, estimando parâmetros de adaptabilidade e estabilidade em híbridos de cebola. Esses parâmetros permitem superar as limitações da interação $G \times A$, com a recomendação de genótipos com adaptação e estabilidade, ou responsivos aos investimentos tecnológicos. Para Tahir et al. (2020), a adaptabilidade e a estabilidade de um genótipo são pré-requisitos para liberar uma cultivar para cultivo geral em uma área específica.

De modo geral a correção da produção comercial de bulbos pela covariância com a média do estande comercial de bulbos não interferiu nos teste 'F' e nos parâmetros de estabilidade pelos métodos de regressão (Eberhart e Russell, 1966) e AMMI (Zobel et al., 1988), tendo algum impacto na classificação de genótipos/ambiente. Souza et al. (2014) reportam que a correção pelo estande ideal foi eficiente ao reduzir o coeficiente de variação, não alterando os genótipos de maior adaptação e estabilidade, como observado no presente estudo. Para Cruz et al. (2012), um dos problemas nas análises conjuntas dos ensaios de competição das cultivares consiste na desuniformidade presente na população de plantas avaliadas, que pode proporcionar a superioridade de natureza não genética entre as cultivares.

A produtividade média de híbridos do presente estudo, 37,7 t/ha, com o maior valor de 44,3 t/ha para o híbrido H1, foram inferiores à produtividade média de híbridos de cebola

reportada por Nunes et al. (2014), 69,8 t/h, com o maior valor de 78,7 t/ha. O presente estudo foi conduzido em oito diferentes ambientes, com parcela experimental de 2,4m², enquanto Nunes et al. (2014) reportam único experimento, com parcela experimental de 1,0m². A produtividade média dos produtores de Cafarnaum, BA, e João Dourado, BA, em 2024, onde o plantio de híbridos de cebola é próximo a 100%, foi de 47,3 t/ha e 46,7 t/ha, respectivamente, (IBGE, 2025), produtividade próxima aos valores do presente estudo. Ademais, a alta densidade populacional nos experimentos de 2023, devido a problemas operacionais no manejo de acordo com os produtores locais, impactou negativamente a produtividade dos híbridos avaliados.

Os híbridos experimentais da Embrapa 1, 3, 4, 5, 10, 11 e 12, na análise de regressão, e os híbridos experimentais 1, 3 e 11, na AMMI biplot, foram considerados como de adaptação ampla e boa estabilidade, indicando razoável concordância entre os dois métodos empregados. Diferente desses resultados, Costa e Santos (2022) reportaram boa concordância na identificação de genótipos de guandu para adaptação ampla e boa estabilidade.

A recomendação de cultivares para os produtores devem considerar, além de ampla adaptação e boa estabilidade, a produtividade média na serie de ambientes avaliados (Cruz et al., 2012). Os híbridos experimentais EPCEB20H037 (5) e EHCEB21H0507 (8) da Embrapa apresentaram produtividade de 40,2 t/ha e 39,9 t/ha, ambos com ampla adaptação e alta e baixa estabilidade, respectivamente, produtividade e parâmetros semelhantes ao híbrido comercial H2, 40,7 t/ha, indicando que esses híbridos experimentais tem potencial para recomendação para os produtores

CONCLUSÕES

1. Interação significativa ($p < 0,01$) foi observada na avaliação de 12 híbridos experimentais, dois híbridos comerciais e uma população de polinização aberta avaliados em oito experimentos no Nordeste brasileiro. A correção por covariância para média de bulbos comerciais/experimento não alterou a média geral de bulbos comerciais, teve pequena alteração nos coeficientes de variação (CV), e não interferiu nos parâmetros de estabilidade pelos métodos de regressão e AMMI, mas alterou a significância pelo teste 'F' em dois experimentos.
2. A análise de regressão e AMMI biplot apresentaram concordância razoável nos parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para os genótipos. Os híbridos experimentais EPCEB20H037 (5) e EHCEB21H0507 (8) da Embrapa apresentaram produtividade de 40,2 t/ha e 39,9 t/ha, ambos com ampla adaptação e alta e baixa estabilidade, respectivamente, indicando potencial para recomendação para os produtores.

REFERENCIAS

- ALVES, I. L. de S. et al. Yield of Syn-1 synthetic varieties of tropical onion resulting from open-pollinated Brazilian populations. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 15, e4181, p. 1-5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14295/cs.v15.4181>.
- COSTA, A. E. da S.; SANTOS, C. A. F. Adaptability and stability parameters for grain production in pigeonpea lines in the Brazilian semiarid region. **Genetics and Molecular Research**, Ribeirão Preto, v. 21, n. 1, p. 1-13, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4238/gmr19001>.
- CRUZ, C. D. Genes: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251>.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 4. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. 514 p.
- DUARTE, J. B.; VENCOVSKY, R. **Interação genótipos x ambientes**: uma introdução à análise "AMMI". Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1999. 60 p.
- EBERHART, S. A.; RUSSELL, W. A. Stability parameters for comparing varieties. **Crop Science**, Madison, v. 6, n. 1, p. 36-40, 1966. DOI: <https://doi.org/10.2135/cropsci1966.0011183X000600010011x>.
- HAVEY, M. J. Onion breeding. **Plant Breeding Reviews**, Hoboken, v. 42, p. 39-85, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119521358.ch2>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados**: Petrolina e Juazeiro. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/14/10193?localidade1=290530&localidade2=290720>. Acesso em: 10 out. 2025.
- KHAR, A. et al. Molecular marker-based characterization of cytoplasm and restorer of male sterility (*Ms*) locus in commercially grown onions in India. **Molecular Biology Reports**, Dordrecht, v. 49, n. 7, p. 5535-5545, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11033-022-07451-9>.
- NUNES, R. L. C.; OLIVEIRA, A. B. de; DUTRA, A. S. Agronomic performance of onion hybrids in Baraúna, in the semi-arid region of Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 3, p. 606-611, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000300021>.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA (FAO). **FAOSTAT**: Crops and livestock products. Roma: FAO, 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em: 10 out. 2025.
- SINGH, H. et al. Distribution pattern of cytoplasm and restoration of male fertility (*Ms*) locus in short-day tropical Indian onion populations. **Euphytica**, Dordrecht, v. 220, n. 70, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10681-024-03310-7>.

SOTO, V. et al. Onion hybrid seed production: relation with nectar composition and flower traits. **Journal of Economic Entomology**, Oxford, v. 111, n. 3, p. 1023–1029, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toy081>.

SOUZA, V. R. et al. Influência da correção de estande na adaptabilidade e na estabilidade de sorgo biomassa. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 3, p. 371-381, 2014. DOI: <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v13n3p371-381>.

TAHIR, M. et al. GGE biplot an effective tool to study genotype and genotype $\times$ environment interaction; a case study in onion (*Allium cepa* L.). **Pakistan Journal of Agricultural Sciences**, Faisalabad, v. 57, n. 6, p. 1565-1571, 2020. DOI: <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/20.536>.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Genética, 1992. 496 p.

ZOBEL, R. W.; WRIGHT, M. J.; GAUCH, H. G. Statistical analysis of a yield trial. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, n. 3, p. 388-393, 1988. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj1988.00021962008000030002x>.

Tabela 1. Doze (12) híbridos experimentais de cebola da Embrapa e controles, incluindo dois híbridos comerciais e uma cultivar comercial de polinização aberta (PA). Este conjunto de materiais genéticos foi avaliado em condições de campo em ensaios realizados em diferentes cidades dos estados da Bahia e Perumbuco, no Nordeste do Brasil.

Código do híbrido	Linhas parentais (fêmea × macho)	Principais características
‘EPCEB22H040’ (#01)	39 A III × C106	Maturação em 120 dias, bulbos em forma de pera
‘EPCEB20H036’ (#02)	39 A III × Rio Vale	Maturação em 120 dias, bulbos em forma de pera
‘EPCEB21H024’ (#03)	36A × C106	Maturação em 110 dias, bulbos em forma de pera
‘EPCEB22H062’ (#04)	445 A × Alfa SF CXI	Maturação em 110 dias, bulbos em forma de pera
‘EPCEB20H037’ (#05)	39AIII × Alfa SF CXII	Maturação em 110 dias, bulbos em forma de pera
‘EPCEB21H025’ (#06)	T5A × C106	Maturação em 120 dias, bulbos em forma de pera
‘EPCEB21H008’ (#07)	36A × IPA 11 2 auto	Maturação em 110 dias, bulbos em forma de pera
‘EHCEB21H0507’ (#08)	54 A (CNPH 6313) × 49C	Maturação em 110 dias, bulbos arredondados
‘EHCEB20H0270’ (#09)	55 A–CNPH 6416 × 127 C–BRS 367	Maturação em 110 dias, bulbos arredondados
‘EHCEB20H0746’ (#10)	55 A–III CNPH 6416 × 49C	Maturação em 110 dias, bulbos arredondados
‘EHCEB21H0262’ (#11)	55A CNPH 6416 × 106 C IPA 11	Maturação em 120 dias, bulbos arredondados
‘EPCEB22H061’ (#12)	445 A × IPA 11 2 auto	Maturação em 110 dias, bulbos em forma de pera
‘Alfa São Francisco’ (#13)	Cultivar comercial OP	Maturação em 120 dias, bulbos em forma de pera
Serena F1 (#14)	Híbrido comercial líder	Maturação em 110 dias, bulbos arredondados
Fernanda F1(#15)	Híbrido comercial líder	Maturação em 110 dias, bulbos arredondados

Tabela 2. Locais de avaliações, datas de plantio e avaliação, latitude, longitude e elevação de híbridos experimentais de cebola da Embrapa em diferentes cidades da Bahia e Pernambuco.

Cidade	Data		Latitude	Longitude	Elevação (m)	Solo
	Plantio	Avaliação				
Cafarnaum, BA	06/12/2023	26/03/2024	11°42'38''S	41°37'30''O	782	Latossolo
João Dourado, BA	12/01/2024	23/04/2024	11°26'14''S	41°38'41''O	820	Latossolo
Lapão, BA	07/12/2023	25/03/2024	11°31'47''S	41°39'53''O	789	Latossolo
Juazeiro, BA	12/12/2023	15/04/2024	09°20'35''S	40°39'25''O	406	Vertissolo
Petrolina, PE	05/06/2024	20/09/2024	09°23'29''S	40°25'03''O	406	Latossolo
João Dourado, BA	24/04/2024	13/08/2024	11°20'22''S	41°42'37''O	816	Latossolo
João Dourado, BA	24/04/2024	14/08/2024	11°20'15''S	41°43'30''O	808	Latossolo
Cafarnaum, BA	23/04/2024	13/08/2024	11°41'02''S	41°35'12''O	752	Latossolo

Tabela 3. Média de bulbos/parcela total (BulT) e comercial¹ (BulC), médias dos experimentos, coeficiente de variação (CV) e quadrados médios de tratamento (Trat) (QMT), resíduo (QMR) local (QML) e tratamento*local (QMT*L) para 15 tratamentos^{2/} (14 híbridos e uma cultivar OP) avaliados em municípios da Bahia e Pernambuco, plantio em dezembro/23 e maio/2024.

Trat	2023_2024								2024								Análise Conjunta	
	Cafarnaum		João Dourado		Lapão		Juazeiro		Petrolina		Cafarnaum		João Dourado		João Dourado			
	BulT	BulC	BulT	BulC	BulT	BulC	BulT	BulC	BulT	BulC	BulT	BulC	BulT	BulC	BulT	BulC	BulT	BulC
1	353	225	187	149	321	-	192	184	224	193	132	109	168	151	172	151	218	158
2	311	187	206	160	309	154	223	180	214	186	170	134	160	135	174	156	221	161
3	386	221	189	149	315	195	228	183	224	174	136	111	140	121	162	153	222	163
4	281	220	188	169	357	219	206	169	180	151	110	97	133	112	139	124	199	157
5	328	223	183	149	332	238	222	191	236	186	182	139	175	150	171	148	228	178
6	237	164	162	121	220	137	210	162	222	163	62	56	55	55	139	115	163	121
7	294	177	193	151	327	175	244	205	226	189	128	94	173	145	156	143	217	160
8	300	240	205	178	331	210	214	166	231	185	148	115	142	111	176	154	218	170
9	325	169	183	150	329	240	198	146	218	159	162	132	160	137	184	171	220	163
10	305	153	207	187	324	200	231	192	211	161	157	127	154	125	133	118	215	157
11	273	196	205	165	333	173	223	149	225	156	155	129	128	110	154	138	212	152
12	315	216	190	162	325	114	206	164	214	184	151	110	174	143	159	136	217	153
13	340	234	214	142	316	224	237	189	202	159	158	129	177	155	186	170	229	175
14	336	173	167	154	251	184	153	171	195	164	169	130	136	117	156	139	195	154
15	391	205	214	181	265	166	204	164	192	131	149	113	212	164	182	157	226	160
Média	318	200	193	158	310	186	213	174	214	170	145	115	152	129	163	145	214	159
CV(%)	19	12	12	12	15	09	12	11	13	13	17	18	11	12	13	13	15	13
QMT	3323 ^{ns}	1566*	494 ^{ns}	556 ^{ns}	2637 ^{ns}	2595**	980 ^{ns}	547 ^{ns}	501 ^{ns}	623 ^{ns}	1706*	1526 ^{ns}	2419*	1427**	561 ^{ns}	566 ^{ns}	4472**	2710**
QMR	3597	612	515	412	2073	288	663	337	735	505	596	436	283	249	446	377	1098	436
QML																	136307*	24752*
QMT*L																	1164 ^{ns}	852**

N.S., *, ** não-significativo, significativo a 5% e 1% pelo teste F, respectivamente. ^{1/} Soma da produção de bulbos tipo 2, 3 e 4. ^{2/} 1-EPCEB22H040, 2-EPCEB20H036, 3-EPCEB21H024, 4-EPCEB22H062, 5-EPCEB20H037, 6-EPCEB21H025, 7-EPCEB21H008, 8-EHCEB21H0507, 9-EHCEB20H0270, 10-EHCEB20H0746, 11-EHCEB21H0262, 12-EPCEB22H061, 13-BRS Alfa SF, 14-F1 H1, 15- F1 H2.

Tabela 4. Produção comercial/ha sem correção (PHa)^{1/} e com correção por covariância para número de bulbos comerciais/local (PHaC)^{1/}, médias dos experimentos, coeficiente de variação (CV) e quadrados médios de tratamento (QMT), resíduo (QMR) local (QML) e tratamento*local (QMT*L) para 15 tratamentos^{2/} (14 híbridos e uma cultivar OP) avaliados em municípios da Bahia e Pernambuco.

Trat	2023_2024								2024								Análise Conjunta	
	Cafarnaum		João Dourado		Lapão		Juazeiro		Petrolina		Cafarnaum		João Dourado		João Dourado			
	PHa	PHaC	PHa	PHaC	PHa	PHaC	PHa	PHaC	PHa	PHaC	PHa	PHaC	PHa	PHaC	PHa	PHaC	PHa	PHaC
1	38,6	35,4	26,1	26,2	-	-	29,2	38,0	58,7	56,1	29,2	31,5	38,9	34,3	43,7	42,0	37,0	35,4
2	33,0	34,6	24,8	24,8	22,0	27,3	46,8	44,2	63,3	61,4	32,5	28,2	36,6	35,4	41,6	38,6	37,6	36,8
3	35,5	32,7	25,0	25,2	28,9	27,2	39,2	35,7	52,4	51,9	35,8	37,5	35,8	37,3	38,9	36,9	36,4	35,6
4	41,3	38,7	32,7	32,4	35,7	30,1	39,8	40,3	52,1	54,3	28,6	34,2	34,5	37,9	34,6	39,8	37,4	38,5
5	41,1	38,1	27,4	27,6	39,0	30,2	46,8	41,2	54,4	52,5	34,8	29,1	41,9	37,5	36,0	35,1	40,2	36,4
6	30,2	34,8	18,0	18,7	20,4	28,6	35,9	38,4	46,6	47,4	18,8	35,2	18,5	33,7	39,3	46,8	28,5	35,5
7	29,5	32,5	19,8	19,9	23,9	25,7	42,5	35,9	61,4	59,2	42,8	37,1	42,0	38,6	40,1	40,5	37,9	36,2
8	53,7	48,5	32,5	32,1	33,1	29,0	38,5	39,9	59,8	58,0	33,5	34,3	31,5	35,2	37,1	34,7	40,0	39,0
9	27,1	31,1	23,9	24,1	36,7	27,6	31,5	38,5	50,4	51,6	47,1	43,4	43,0	41,3	53,1	46,5	39,2	38,1
10	26,2	32,2	31,3	30,7	30,8	28,4	39,1	33,1	52,5	53,5	39,8	37,4	36,7	37,5	35,9	42,8	36,5	37,0
11	41,1	41,5	24,6	24,5	28,5	30,6	33,3	39,3	57,1	56,1	33,5	30,4	33,8	37,6	40,0	41,7	36,3	37,6
12	35,7	33,5	23,4	23,3	14,3	26,3	32,6	35,7	56,0	54,3	27,6	29,7	36,8	33,8	30,3	32,6	32,1	33,7
13	41,3	36,9	22,2	22,5	37,6	31,1	42,0	37,0	50,2	51,4	33,6	30,5	41,0	35,7	40,6	34,2	38,6	34,9
14	34,6	38,0	37,2	37,3	31,1	31,4	50,8	52,2	71,5	72,1	42,0	38,8	38,7	41,1	43,7	45,2	44,1	44,8
15	39,0	38,3	36,7	36,2	28,7	31,9	39,6	42,6	47,9	52,3	33,3	34,5	46,5	39,2	48,9	45,9	40,1	40,1
Média	36,6	36,5	27,4	27,4	29,0	29,0	38,9	39,0	55,61	55,5	34,2	34,2	37,2	37,2	40,3	40,3	37,5	37,5
CV(%)	15	12	13	13	11	05	16	06	11	09	13	07	12	07	15	08	17	10
QMT	99*	39 ^{ns}	64**	58**	97**	7,2**	64 ^{ns}	30**	86*	67*	97**	36*	84**	11 ^{ns}	64 ^{ns}	45**	198**	98**
QMR	29	20	12	12	9,7	1,7	40	6,3	40	23	20	5,6	18	7,8	35	10	38,3	14
QML																	2069**	2077**
QMT*L																	65**	28**

N.S., *, ** não-significativo, significativo a 5% e 1% pelo teste FR, respectivamente. ^{1/} Soma da produção de bulbos tipo 2, 3 e 4. ^{2/} 1-EPCEB22H040, 2-EPCEB20H036, 3-EPCEB21H024, 4-EPCEB22H062, 5-EPCEB20H037, 6-EPCEB21H025, 7-EPCEB21H008, 8-EHCEB21H0507, 9-EHCEB20H0270, 10-EHCEB20H0746, 11-EHCEB21H0262, 12-EPCEB22H061, 13-BRS Alfa SF, 14-F1 H1, 15- F1 H2.

Tabela 5. Estimativas dos parâmetros de adaptabilidade e estabilidade para o rendimento de bulbos de 12 híbridos experimentais de cebola, sem (SCOV) e com (CCOV) correção de covariância para a média de bulbos comercializáveis por parcela/local, avaliados em municípios da Bahia e Pernambuco, de dezembro de 2023 a maio de 2024 e maio de 2024.

Material Genético	Média		Adaptabilidade ($\beta_1=1$)		Estabilidade ($S^2d=0$)	
	SCOV	CCOV	SCOV	CCOV	SCOV	CCOV
#01= 'EPCEB22H040'	37.2	35.4	1.13 ^{ns}	1.03 ^{ns}	-5.75 ^{ns}	3.35 ^{ns}
#02= 'EPCEB20H036'	37.2	37.6	1.44*	1.29*	-6.59 ^{ns}	-1.07 ^{ns}
#03= 'EPCEB21H024'	35.5	36.4	0.90 ^{ns}	0.89 ^{ns}	-17.6 ^{ns}	-5.76 ^{ns}
#04= 'EPCEB22H062'	38.1	37.4	0.65 ^{ns}	0.83 ^{ns}	0.92 ^{ns}	-2.74 ^{ns}
#05= 'EPCEB20H037'	37.0	40.2	0.77 ^{ns}	0.85 ^{ns}	2.72 ^{ns}	-2.51 ^{ns}
#06= 'EPCEB21H025'	34.3	28.3	1.03 ^{ns}	0.91 ^{ns}	13.41 ^{ns}	19.96**
#07= 'EPCEB21H008'	37.0	37.8	1.37*	1.22 ^{ns}	10.85 ^{ns}	26.96**
#08= 'EHCEB21H0507'	39.0	39.9	0.92 ^{ns}	0.93 ^{ns}	37.96*	22.34**
#09= 'EHCEB20H0270'	38.5	39.2	0.73 ^{ns}	0.90 ^{ns}	71.80**	27.23**
#10= 'EHCEB20H0746'	37.2	36.5	0.73 ^{ns}	0.82 ^{ns}	4.37 ^{ns}	2.73 ^{ns}
#11= 'EHCEB21H0262'	38.0	36.3	1.09 ^{ns}	1.06 ^{ns}	-8.42 ^{ns}	-2.92 ^{ns}
#12= 'EPCEB22H061'	33.4	32.0	1.25 ^{ns}	1.04 ^{ns}	7.46 ^{ns}	-4.95 ^{ns}
#13= Alfa São Francisco	35.2	38.6	0.77 ^{ns}	0.87 ^{ns}	3.62 ^{ns}	-2.02 ^{ns}
#14= Serena F1 (H1)	44.9	44.3	1.41*	1.44*	14.07 ^{ns}	12.22*
#15= Fernanda F1 (H2)	40.6	40.7	0.74 ^{ns}	0.83 ^{ns}	7.28 ^{ns}	-0.27 ^{ns}
Média	37,7	37,7				

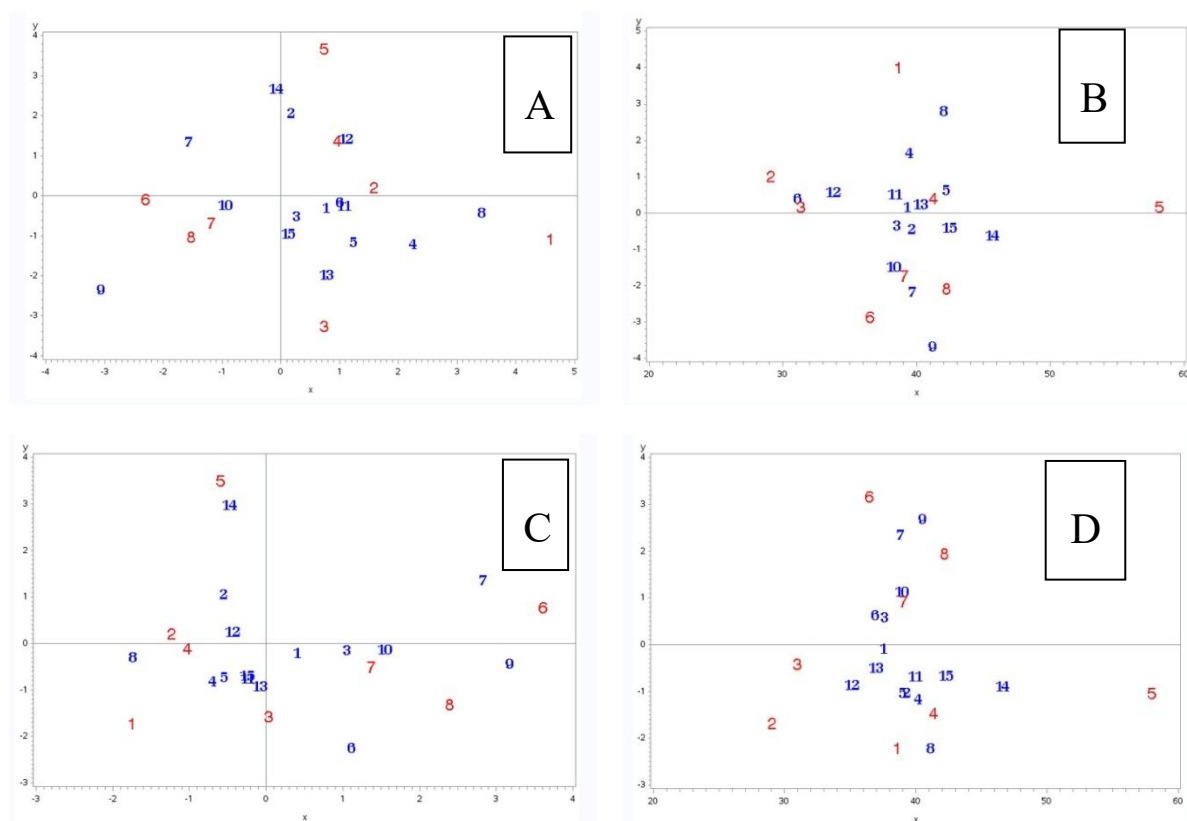


Figura 1. Ammi biplot usando os dois componentes principais (A e C) e as médias dos tratamentos x o primeiro componente principal (B e D) para tratamentos (14 híbridos e uma cultivar OP) avaliados em municípios da Bahia e Pernambuco, período de dezembro/23 a maio/24 e maio/2024. A e B, C e D = produção comercial/ha sem e com correção para covariância para número de bulbos comerciais/local, respectivamente. Tratamentos (azul): 1-EPCEB22H040, 2-EPCEB20H036, 3-EPCEB21H024, 4-EPCEB22H062, 5-EPCEB20H037, 6-EPCEB21H025, 7-EPCEB21H008, 8-EHCEB21H0507, 9-EHCEB20H0270, 10-EHCEB20H0746, 11-EHCEB21H0262, 12-EPCEB22H061, 13-BRS Alfa SF, 14-F1 H1, 15- F1 H2. Ambientes (vermelho): 1=Cafarnaum23, 2=João Dourado23, 3=Lapão23, 4=Juazeiro23, 5=Petrolina24, 6=Cafarnaum24, 7=João DouradoH24, 8=João DouradoP.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conjunto de resultados obtidos nesta dissertação evidencia avanços substanciais tanto na compreensão da estrutura genética de populações comerciais de cebola quanto na avaliação agronômica de híbridos desenvolvidos para as condições edafoclimáticas do Nordeste brasileiro. A integração entre ferramentas de biologia molecular e experimentação multiambiental permitiu atender aos objetivos propostos e oferecer subsídios concretos para programas nacionais de melhoramento da cultura.

No Capítulo 1, a caracterização citoplasmática e nuclear de sete populações comerciais revelou ampla heterogeneidade genética, especialmente no que se refere à composição dos tipos de citoplasma e à segregação do locus restaurador da macho-fertilidade (*Ms*). A predominância de citoplasma S e a baixa frequência de citoplasma T reafirmam tendências observadas em outras regiões produtoras, ao passo que a mistura citoplasmática identificada em cultivares amplamente utilizadas, como Alfa São Francisco, destaca lacunas históricas na uniformização genética desses materiais.

A combinação dos marcadores *AcSKPI* e *AcPMSI* demonstrou ser necessária para inferência genotípica mais precisa, dada a variabilidade de resolução observada entre populações. Esses achados reforçam a importância da seleção assistida por marcadores (MAS) no delineamento de sistemas CMS-S e na derivação de linhagens A e B, etapas essenciais para a consolidação de um programa nacional de hibridação de cebola com base genética bem definida.

No Capítulo 2, a avaliação conjunta de 12 híbridos experimentais, dois híbridos comerciais e uma população OP em oito ambientes distintos confirmou a presença expressiva da interação genótipo $\times$ ambiente ($G \times E$), elemento central para a recomendação de híbridos adaptados às condições contrastantes do semiárido nordestino. A correção das produtividades por covariância se mostrou adequada para reduzir efeitos de desuniformidade no estande, sem comprometer a interpretação dos parâmetros de estabilidade pelos métodos de regressão e AMMI. A concordância entre ambos os métodos permitiu identificar híbridos com comportamento agronomicamente superior e previsível, dentre os quais se destacam EPCEB20H037 e EHCEB21H0507, cujos desempenhos são comparáveis aos melhores híbridos comerciais avaliados e, portanto, apresentam potencial para recomendação. A produtividade média obtida, próxima àquela registrada nos principais polos produtores da

região, reforça a relevância do desenvolvimento de híbridos adaptados localmente, capazes de reduzir a dependência de sementes importadas.

De forma integrada, os resultados desta dissertação demonstram que o aprimoramento da produção de híbridos nacionais de cebola depende simultaneamente da definição genética das linhagens parentais e da validação agronômica de híbridos sob condições ambientais reais de cultivo. A identificação de populações adequadas para derivação de linhagens A e B, associada à seleção de híbridos com ampla adaptabilidade e estabilidade, constitui um avanço estratégico para a autonomia produtiva regional e para o fortalecimento de cadeias produtivas baseadas em sementes nacionais. Tais evidências reafirmam a importância de se ampliar os esforços de pesquisa em genética aplicada, fenotipagem multiambiental e desenvolvimento de ferramentas que acelerem ciclos de melhoramento, sobretudo em espécies de ciclo bianual como a cebola.

Por fim, os resultados obtidos fornecem bases sólidas para a continuidade das ações de melhoramento conduzidas pelas instituições envolvidas, além de evidenciar o potencial científico e tecnológico da produção de híbridos tropicais de cebola adaptados às condições do Vale do São Francisco. Estudos futuros devem priorizar o refinamento dos marcadores empregados para identificação do locus Ms, a ampliação das análises genômicas para esclarecimento de mosaicos citoplasmáticos complexos e a condução de novos ensaios multiambientais que consolidem a recomendação dos híbridos mais promissores. Dessa forma, este trabalho contribui de maneira efetiva para o fortalecimento do melhoramento genético da cebola no Brasil, oferecendo perspectivas concretas para o desenvolvimento de cultivares mais produtivas, estáveis e adequadas à realidade socioeconômica dos agricultores nordestinos.