UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ - UESC

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GENÉTICA E BIOLOGIA MOLECULAR

COMPONENTES DE PRODUÇÃO DE CLONES DE CACAU ELITE DO SUL DA BAHIA, BRASIL

ALANE PAULA PEIXOTO PANNAIN

ILHÉUS – BAHIA - BRASIL

Outubro de 2024

ALANE PAULA PEIXOTO PANNAIN

COMPONENTES DE PRODUÇÃO DE CLONES DE CACAU ELITE DO SUL DA BAHIA, BRASIL

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Santa Cruz como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Genética e Biologia Molecular.

Área de concentração: Genética e Biologia Molecular

ILHÉUS – BAHIA - BRASIL

Outubro de 2024

P194 Pannain, Alane Paula Peixoto.
Componentes de produção de clones de cacau elite do sul da Bahia, Brasil / Alane Paula Peixoto Pannain. – Ilhéus, BA: UESC, 2024.
128f. : il. ; anexos.

Orientador: Ronan Xavier Corrêa.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-Graduação em Genética e Biologia Molecular.
Inclui referências e apêndice.

1. Cacaueiro – Melhoramento genético. 2. Cacau – Cultivo. 3. Sistema cabruca. 4. Clones. I. Título.

CDD 633.74

ALANE PAULA PEIXOTO PANNAIN

COMPONENTES DE PRODUÇÃO DE CLONES DE CACAU ELITE DO SUL DA BAHIA, BRASIL

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Santa Cruz como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Genética e Biologia Molecular.

Área de concentração: Genética e Biologia Molecular

Ilhéus, 25 de outubro de 2024.

Prof. Dr. Ronan Xavier Corrêa
(Examinador/Orientador)

Profª. Drª. Antônia Marlene Magalhães Barbosa
Examinadora

Prof. Dr. Rafael Marani Barbosa
Examinador

Profª. Drª. Jannaina Velasques da Costa Pinto
Examinadora

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Biologia Molecular (PPGGBM) e aos profissionais da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) pela formação acadêmica e capacitação profissional que me proporcionaram ao longo desta jornada.

Ao professor Ronan Xavier Corrêa, meu orientador, agradeço por todo o acompanhamento, ensinamentos e orientações desde a iniciação científica, como bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), até o mestrado na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes).

Agradeço ao projeto Renova Cacau pelo apoio financeiro, resultado do convênio entre a Universidade Estadual de Santa Cruz, Mondelēz International e o Centro de Inovação do Cacau, por terem me acolhido como estudante e contribuído para o meu desenvolvimento profissional. Estendo minha gratidão a toda a equipe do projeto, por tantos ensinamentos e experiência enriquecedora.

Ao professor Dário Ahnert, meu coorientador, sou grata por ter me apresentado à genética aplicada à agropecuária e por todo o estímulo e ensinamentos práticos que me guiaram até aqui.

Ao meu coorientador, Dr. Gonçalo Santos Silva, expresso minha gratidão por todo o apoio, pelas orientações, desde o processamento dos dados até a escrita deste trabalho.

A minha mãe Eliêde, agricultora familiar, sou imensamente grata pelas minhas raízes. Seus ensinamentos e seu exemplo de amor pelo campo foram fundamentais na escolha da minha profissão.

Ao meu pai Paulo, agradeço por ter sempre me apoiado e incentivado nos estudos.

Agradeço às minhas irmãs e melhores amigas, Alanda, Andra e Milena, por estarem presentes em todas as fases da minha vida.

Ao meu companheiro Bruno, minha gratidão por compartilhar essa caminhada, oferecendo seu carinho, cuidado e amor

ÍNDICE

RESUMO vi
ABSTRACT vii
INTRODUÇÃO 1
REVISÃO DE LITERATURA 3
CAPÍTULO 1: Morpho-agronomic traits and cocoa beans quality of elite cacao clonal cultivars from southern Bahia, Brazil 14
ABSTRACT 15
RESUMO 16
INTRODUCTION 17
MATERIAL AND METHODS 18
RESULTS AND DISCUSSION 22
CONCLUSIONS 41
LITERATURE CITED 44
CAPÍTULO 2: Componentes de produção de cultivares clonais de cacau são influenciados por idade produtiva, período de colheita e sistema de cultivo 54
RESUMO 54
ABSTRACT 55
1. Introdução 55
2. Materiais e métodos 59
2.1 Material Genético e Desenho Experimental 59
2.2 Caracterização morfoagronômica de frutos, sementes e amêndoas 61
2.3 Análise estatística 63
3. Resultados 64
4. Discussão 77
5. Conclusão 84
6. Referências bibliográficas 85
CAPÍTULO 3: Análise de trilha de componentes de produção de cultivares clonais de cacau 92

RESUMO **92**
ABSTRACT **93**
1. Introdução **93**
2. Materiais e métodos **95**
3. Resultados **98**
4. Discussão **104**
5. Conclusões **109**
6. Referências bibliográficas **110**
DISCUSSÃO E CONCLUSÕES GERAIS **116**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES **118**
APÊNDICE **125**
ANEXOS **126**

RESUMO

PANNAIN, Alane Paula Peixoto, M.S., Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, outubro de 2024. **Componentes de produção de clones de cacau elite do sul da Bahia, Brasil**. Orientador: Prof. Dr. Ronan Xavier Corrêa. Coorientadores: Dr. Dario Ahnert e Dr. Gonçalo Santos da Silva.

A baixa produtividade das lavouras de cacau é atribuída a mudanças climáticas e ao envelhecimento das plantações associado a práticas agrícolas inadequadas. Esse cenário, combinado à crescente demanda por produtos derivados de cacau, tem provocado flutuações significativas nos preços, ultrapassando US$ 10 mil por tonelada. Este estudo analisa os componentes de produção de quatro clones de cacau do sul da Bahia (PS 1319, SJ 02, CP 49 e FA 13) e do clone equatoriano CCN 51, avaliando 53 características morfoagronômicas de flores, sementes e frutos de plantas com idades produtivas entre o 5º e o 7º ano, nas safras de 2019/2020 a 2021/2022. Foram considerados dois períodos de colheita (safra principal e temporão) e dois sistemas de cultivo (sombreado e sol pleno), em quatro áreas experimentais no sul da Bahia. Os resultados indicaram diferenças significativas entre os clones para todas as características analisadas. O CCN 51 apresentou as maiores médias para a maioria das variáveis, enquanto o FA 13 destacou-se pela maior produtividade de amêndoas, com altos valores para número de sementes por fruto (NSP) e número de frutos por planta (NPT). Os clones PS 1319 e SJ 02 apresentaram alta qualidade sensorial, bom rendimento de sementes e polpa, além de semelhanças morfológicas. Já o CP 49 teve desempenho inferior na maioria das características. A análise de cluster indicou que o índice de sementes (SI) tem menor associação com a produção de frutos, enquanto o índice de frutos (IF) e SI correlacionaram-se negativamente com NPT, mas positivamente com NSP e características de frutos. A análise de componentes principais (PCA) associou fortemente a produtividade (YIELD) ao NPT e ao clone FA 13. Além disso, os clones locais superaram o CCN 51 em NPT. A análise de trilha revelou que o NPT apresentou efeito total significativo na produtividade, mas seu efeito direto foi irrelevante, sendo influenciado por efeitos indiretos, especialmente relacionados ao tamanho do fruto, peso da placenta e peso de amêndoas. Amêndoas mais largas e espessas correlacionaram-se negativamente com a produtividade. Este estudo ressalta as complexas interações entre os componentes de produção de cacau, contribuindo para a identificação de características relevantes para a produtividade. Os clones PS 1319, SJ 02 e, especialmente, FA 13 demonstraram maior produtividade em comparação ao CCN 51 e possuem potencial para cultivo em diferentes regiões do Brasil e do mundo. A pesquisa também sugere que características como NSP e NPT são mais promissoras para seleção de clones com maior valor agronômico e comercial, destacando o potencial do cultivo sombreado e sua estabilidade de produção.

Palavras-chave: Cultivar clonal. Caracterização biométrica. Cacau cabruca. Sistemas agroflorestais.

ABSTRACT

PANNAIN, Alane Paula Peixoto, M.S., Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, october 2024. **Production components of elite cacao clones from southern bahia, brazil**. Advisor: Prof. Dr. Ronan Xavier Corrêa. Advisor Committee Members: Dr. Dario Ahnert e Dr. Gonçalo Santos da Silva.

Low cocoa crop productivity is attributed to climate change and aging plantations exacerbated by inadequate agricultural practices. Coupled with growing demand for cocoa products, this has led to significant price fluctuations, reaching historic levels of over US$10,000 per ton. In response, this study analyzes the production components of four cocoa clones from southern Bahia (PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13) and the Ecuadorian clone CCN 51. Fifty-three morpho-agronomic traits of flowers, seeds, and fruits from plants aged 5–7 years were evaluated across the 2019/2020, 2020/2021, and 2021/2022 harvests, encompassing two cultivation systems (shaded and full sun) and two harvest periods (main and early season). Data were collected from four experimental areas with renewed and technically managed crops in southern Bahia, Brazil. Significant differences ($p < 0.01$) were observed among clones for all analyzed seed and fruit traits. CCN 51 recorded the highest averages for most traits, while clones PS 1319 and SJ 02 displayed the greatest morphological similarities. CP 49 underperformed across most characteristics compared to the others. Clone FA 13, despite having the lowest fruit (IF) and seed indices (SI), excelled in almond production, achieving the highest averages for the number of seeds per fruit (NSP) and fruits per plant (NPT). Cluster analysis indicated that SI was less associated with fruit production and showed weaker similarities with traits like productivity index (PI), NPT, and NSP. Correlation analyses revealed negative relationships between PI/SI and NPT but positive ones with NSP and fruit circumference (CF). Principal Component Analysis (PCA) highlighted a strong association between yield and NPT, particularly with FA 13. Local clones generally outperformed CCN 51 in NPT, while PS 1319 and SJ 02 stood out for their high sensory quality, seed yield, and pulp content. The shaded cultivation system showed no significant variation in fruit production compared to full sun. Seasonal variation revealed differing clone performances across harvests and production ages. Pearson's correlation confirmed a significant positive relationship between NPT and yield. However, path analysis revealed that while NPT had a significant total effect on productivity, its direct effect was negligible, with its influence mediated by indirect effects such as fruit size, placenta weight, and kernel weight. Additionally, kernel width and thickness were inversely correlated with productivity. This study provides detailed insights into the complex interactions among cocoa production components, aiding in the identification and selection of traits with direct effects on yield. Traits beyond PI and SI could serve as effective yield predictors for selecting high-value agronomic clones. Notably, clones PS 1319, SJ 02, and FA 13 demonstrated superior productivity compared to CCN 51, with FA 13 showing particular promise for cultivation and further research in Brazil and globally.

Keywords: Clonal cultivar. Biometric characterization. Cabruca cacao. Agroforestry systems

INTRODUÇÃO

O cacaueiro (*Theobroma cacao* L., Malvaceae), planta originária da Floresta Amazônica, possui relevância histórica, cultural e econômica global. Estudos arqueológicos indicam que a domesticação inicial da espécie ocorreu há cerca de 5.300 anos no sudeste do Equador (Motamayor et al., 2002; Zarrillo et al., 2018). Inicialmente classificado em três grupos principais (Criollo, Forastero e Trinitário) com base em características morfológicas e origem genética (Cheesman, 1944), o cacau foi posteriormente reclassificado em dez grupos genéticos distintos por meio de marcadores moleculares (Motamayor et al., 2008). Essa diversidade genética reflete a ampla distribuição geográfica e a importância adaptativa da espécie.

O cacau foi profundamente valorizado por civilizações mesoamericanas, como os Maias e Astecas, desempenhando papéis cerimoniais, medicinais e econômicos (Motamayor, 2002; Dillinger et al., 2000). A expansão do seu cultivo e a introdução no mercado europeu como matéria-prima para chocolate resultaram em sua disseminação global, inicialmente para regiões tropicais da África Ocidental, onde atualmente ocorre mais de 70% da produção mundial. Países como Costa do Marfim, Gana e Nigéria destacam-se como os maiores produtores globais, devido à ampla adoção do cultivo por pequenos agricultores em sistemas economicamente relevantes para a sustentabilidade rural (ICCO, 2024; Ahnert & Eskes, 2018).

No entanto, a produção mundial de cacau tem enfrentado desafios significativos, como a redução na produtividade devido a fatores como mudanças climáticas, envelhecimento das lavouras e práticas agrícolas inadequadas (Lopes et al., 2011). Paralelamente, a crescente demanda global tem intensificado pressões sobre o sistema produtivo, resultando em flutuações acentuadas nos preços, com máximas históricas superiores a US$ 10.000 por tonelada (ICCO, 2024).

Atualmente, a produção global de cacau se concentra em regiões tropicais da África Ocidental, responsável por mais de 70% da produção mundial, enquanto sua região

de origem amazônica contribui com menos de 20% (ICCO, 2024). No Brasil, a produção é liderada pelo sul da Bahia, onde o cultivo em sistemas agroflorestais sob a sombra da Mata Atlântica, conhecidos como Cabruca, combina conservação ambiental com produção agrícola sustentável. No entanto, fatores como mudanças climáticas, práticas agrícolas inadequadas e o envelhecimento das plantações têm limitado a produtividade global e nacional do cacau (Ahnert & Eskes, 2018; Lopes et al., 2011).

No cenário brasileiro, esforços significativos têm sido feitos no melhoramento genético do cacau, com foco na seleção de cultivares clonais que combinem alta produtividade, resistência a doenças e qualidade agronômica. Entre os clones destacados estão CCN 51, PS 1319, SJ 02, FA 13 e CP 49, cuja caracterização morfoagronômica e análise de componentes de produção têm se mostrado fundamentais para a identificação das cultivares mais promissoras para o cultivo comercial (Ahnert et al., 2018; Macêdo et al., 2021). A recuperação da produtividade na região tem sido mediada por esforços de melhoramento genético, destacando-se a seleção de cultivares clonais com características agronômicas superiores, como alta produtividade, resistência a doenças e adaptabilidade às condições edafoclimáticas locais (Ahnert et al., 2018; Jaimez et al., 2022).

Apesar desses avanços, a produtividade média das lavouras no sul da Bahia permanece baixa, com desafios densidade de plantio e manejo inadequado (Mandarino & Gomes, 2009). Nesse contexto, este trabalho investiga os componentes de produção de cultivares clonais de cacau, com enfoque na caracterização morfoagronômica e parâmetros genéticos associados à produtividade. O estudo visa contribuir para a identificação de clones adaptados às condições do sul da Bahia e de maior interesse agronômico e comercial.

REVISÃO DE LITERATURA

Produção de cacau no mundo

O cacaueiro (*Theobroma cacao* L., Malvaceae) é originário da Floresta Amazônica, onde se encontra a maior diversidade da espécie e os registros mais antigos de domesticação, datando de cerca de 5.300 anos no sudeste do Equador (Motamayor et al., 2002; Zarrillo et al., 2018). O cacau foi classificado em três grupos principais: Criollo, Forastero e Trinitário, que diferem em morfologia e origem genética (Cheesman, 1944; Motamayor et al., 2002). Posteriormente, com base em marcadores moleculares, foi reclassificado em dez grupos genéticos: Amelonado, Contamana, Criollo, Curaray, Guianna, Iquitos, Marañon, Nacional, Nanay e Purús (Motamayor et al., 2008).

O cacau foi reverenciado por civilizações antigas mesoamericanas, como os Maias e os Astecas, que o utilizavam para diversos fins ritualísticos, medicinais e como moeda de troca (Motamayor, 2002; Dillinger et al, 2000; Dias & Resende, 2001). Ganhou escala e importância econômica global após ser descobertos pelos europeus e usado como matéria prima para produção de chocolate (Chiapetti, 2018). Isso resultou em expansão agrícola, o cacau saiu da sua região de origem Amazônica, que representa atualmente menos de 20% da produção mundial, concentrada principalmente no Equador (430 mil t) e Brasil (220 mil t) (ICCO, 2024). E foi para África Ocidental, onde possui maior volume de produção, responsável por mais de 70% das amêndoas de cacau produzidas no mundo, principalmente em Gana (501 mil t), Camarões (300 mil t), Nigéria (300 mil t) e Costa do Marfim (1,800 milhões t) (ICCO, 2024). Onde o cacau desempenha um papel crucial na geração de empregos, no fomento do desenvolvimento rural e sustentável de milhões de pequenos agricultores em países tropicais em desenvolvimento (Ahnert & Eskes, 2018; Lass & Wood, 1985).

No entanto, a produção mundial total de cacau prevista em 2023/24 caiu para 4.461 t, em comparação com a produção estimada de 5.047 t em 2022/23 e 4.826 t em

2021/22 (ICCO, 2024). A baixa produtividade das lavouras tem sido atribuída a mudanças climáticas, ao envelhecimento das plantações e práticas agrícolas inadequadas (Ahnert & Eskes 2018; Lopes et al. 2011). Tal cenário, diante da crescente demanda de cacau e baixa oferta (Zhang & Motilal, 2016; ICCO, 2024), resultou em flutuações acentuadas nos preços do cacau, atingindo níveis históricos superiores a US$ 10 mil por t (ICCO, 2024).

No Brasil, o melhoramento genético do cacau tem se concentrado na seleção e desenvolvimento de cultivares clonais que combinem alta produtividade com resistência a doenças e características de qualidade. Estudos indicam que o desenvolvimento de clones resistentes a doenças, produtivos e adaptados às condições ambientais adversas, como o aumento de temperaturas e variabilidade de precipitação, é fundamental para manter a produtividade e a viabilidade socioeconômica do cultivo de cacau (Schroth et al., 2016; Ahnert & Eskes, 2018; Jaimez et al., 2022).

Produção e melhoramento de cacau no sul da Bahia

Historicamente, o Brasil já foi o maior produtor mundial de cacau, com a produção concentrada principalmente no sul do estado da Bahia. A região se destacou como um dos principais centros produtores e exportadores mundiais de cacau ao longo do século XX (Xavier, Nascimento & Chiapetti, 2021).

No sul da Bahia, conhecido como região cacaueira, o cacau é cultivado principalmente à sombra da Mata Atlântica, em sistema agroflorestal conhecido como Cabruca. A região possui o maior número de produtores de cacau e a maior parte da área de produção brasileira, com 69 mil produtores e 430 mil ha, respectivamente, distribuídos em 83 municípios, com produtividade de amêndoas de cacau de 262 kg ha-1 (IBGE, 2023).

O cacau iniciou sua história no sul da Bahia em 1756, com a introdução de materiais genéticos oriundos da Amazônia que deram origem às cultivares locais da Bahia, denominadas Cacau Comum, Pará e Maranhão (Ahnert et al., 2018). Essas cultivares locais são pertencentes ao grupo Forastero ou Amelonado (Motamayor et al., 2008; Cheesman, 1944). Estima-se que essas cultivares ainda ocupem grande parte das lavouras do sul da Bahia (Ahnert et al., 2018). No entanto, com a introdução da vassoura-de-bruxa e a suscetibilidade das cultivares locais à doença causada pelo fungo *Moniliophthora perniciosa* (Chiapetti, 2018; Ahnert & Eskes, 2018), desde o final dos anos 1980, uma série de fatores, tanto no plano externo quanto no interno, contribuíram para a eclosão da chamada crise do cacau (Xavier, Nascimento & Chiapetti, 2021). A

produção sofreu uma queda significativa. Além das mudanças climáticas, oscilações nos preços globais e limitações tecnológicas e econômicas, as lavouras do sul da Bahia foram devastadas (Noia, Midlej & Romano, 2015; Chiapetti, 2018; Ahnert et al., 2018), o que provocou a necessidade de renovação das plantações. Uma das alternativas encontradas para o manejo da vassoura-de-bruxa é o emprego de variedades resistentes e de alta produtividade, desenvolvidas em programas de melhoramento genético do cacaueiro (Dantas Neto et al., 2005; Ahnert et al., 2018). Pesquisas de melhoramento genético têm possibilitado a obtenção de cultivares com características de resistência a doenças, adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas e maior produtividade (Jaimez et al., 2022; Ahnert & Eskes, 2018).

Em 1930, os primeiros trabalhos de melhoramento genético e desenvolvimento de clones de cacau no Brasil foram realizados pelo Instituto de Cacau da Bahia (ICB) (Ahnert et al., 2018). Foram focados na seleção de plantas com características desejáveis, como alta produtividade, resistência a pragas e doenças, e qualidade de sementes (Muller & Valle, 2012). No entanto, devido a dificuldades com propagação assexuada e transporte de mudas, os trabalhos com clones estagnaram por 60 anos (Ahnert et al., 2018). Em 1989, estratégias de melhoramento recorrente foram implementadas, visando principalmente o desenvolvimento de clones (Lopes et al, 2011). Apenas em 1993 os estudos foram retomados com mais de 500 clones foram colocados em testes e 39 clones e 3 híbridos foram liberados para os agricultores, com resistência à vassoura de bruxa, alta produtividade e outras características de interesse agronômicos (Lopes et al, 2011).

A partir de 2002, cultivares clonais produtivos, autocompatíveis e resistentes começaram a ser usados pelos agricultores (Ahnert et al., 2018). A clonagem de cacaueiro é uma técnica amplamente utilizada para a propagação vegetativa de plantas com características agronômicas superiores, como o porte baixo, precocidade de produção, tamanho de frutos e resistência a pragas, que são essenciais para a sustentabilidade dos cultivos em regiões semiáridas (Sodré, Magno & Monteiro, 2017). Apesar da introdução de variedades clonais, a produtividade média das lavouras de cacau no sul da Bahia continua baixa. Um estudo realizado por Mandarino e Gomes (2009) identificou que os produtores que adotaram uma mistura de cultivares clonais não alcançaram os resultados esperados, obtendo uma produtividade média de apenas 300 kg de amêndoas secas por hectare ao ano, em comparação à expectativa de 1.000 kg ha^{-1} após a maturidade do plantio. Fatores como variação intraclonal, baixa densidade de plantio, sombreamento excessivo, heterogeneidade do plantio e manejo inadequado foram apontados como

causas dessa baixa produtividade (Mandarino & Gomes, 2009; Lopes et al., 2011; Ahnert et al., 2018).

A CEPLAC mantém um banco de germoplasma com 4.500 acessos, sendo 1.300 no Centro de Pesquisa do Cacau (CEPEC) em Ilhéus, Bahia, que serve como base para o desenvolvimento de novas cultivares clonais com elevado potencial de produtividade (Lopes et al., 2011). Estudo realizado pela CEPLAC com 179 clones de cacaueiro, em 79 locais na região cacaueira da Bahia, por 11 anos, destacou o FA 13, SJ 02, CCN 51, PS 1319, como as variedades atualmente recomendadas para plantio comercial, pois apresentaram maior produção (Macêdo et al., 2021).

Muitos esforços têm sido empregados para mudar essa realidade de baixa produtividade. A região produtora de cacau do sul da Bahia tem desenvolvido novas tecnologias para produção de cacau nestes últimos 20 anos, destacando-se no cenário mundial e atraindo a atenção da comunidade científica e das indústrias do setor de cacau/chocolate. No entanto, poucos produtores possuem acesso a essas novas tecnologias e nem todas foram testadas em nível de campo. A empresa chocolateira Mondelez (financiadora do projeto) em parceria com a UESC (Universidade Estadual de Santa Cruz), desenvolveu um projeto de pesquisa/extensão, onde testou três métodos de renovação de lavouras decadentes, buscando o melhor meio de renovação das lavouras e as melhores práticas agrícolas. Esse projeto, denominado Renova Cacau, desenvolvido em áreas de agricultores, foi iniciado em 2014, possui 32 áreas experimentais em vários municípios do sul da Bahia, desde Santa Luzia ao Sul, até Mutuípe ao Norte. Utilizou-se o delineamento de blocos ao acaso, com duas repetições e cinco cultivares (CCN51, PS1319, SJ02 e FA13 e CP49). Foram coletados dados e avaliados quase todos os fatores edafoclimáticos e de manejo que influenciam na produção. A caracterização de frutos e sementes, bem como a análise dos componentes de produção é relevante para a identificação das cultivares mais promissoras para a utilização agronômica e comercial. O estudo da escolha do material genético através das características de maior interesse agronômico e comercial é um dos primeiros passos para a renovação das lavouras. Os clones de maior interesse são os que possuem características superiores, tais como, frutos maiores, baixo índice de fruto (IF) e peso de amêndoa maior que 1 g. No entanto, os componentes de produção variam muito, além do efeito genético, pelo ambiente e manejo. E avaliação dessas características para o melhoramento do cacaueiro e escolha e seleção do clone para o cultivo são, em geral, ainda mal compreendidas.

Cultivares clonais de cacau

Os clones locais PS 1319, SJ 02 e FA 13 destacam-se como materiais genéticos selecionados em fazendas no sul da Bahia por agricultores e posteriormente registrados pela CEPLAC, valorizando a adaptação local e a alta produtividade desses genótipos (Ahnert et al., 2018). O clone CP 49, por sua vez, resultante do cruzamento entre TSA 644 x CCN 51 no CEPEC, em Ilhéus, apresenta características morfoagronômicas que o distinguem significativamente do CCN 51, como maior distância genética e diferenças em atributos produtivos e estruturais (Sodré, Magno & Monteiro, 2017). Tais características reforçam a importância de estudos de diversidade genética e seleção clonal para atender às demandas de diferentes ambientes e mercados.

O desempenho superior do CCN 51 em diversas condições ambientais tem sido amplamente relatado. No estudo de Alexandre et al. (2015), realizado no Espírito Santo, este clone destacou-se junto ao CCN 10 como os mais produtivos para a produção de amêndoas. Outros trabalhos, como o de Doaré, Ribeyre e Cilas (2020), conduzido na Guiana Francesa, e o de Reges et al. (2021), no Ceará, confirmam a superioridade do CCN 51 em atributos como peso médio de amêndoas, maior número de sementes por fruto e maior massa de casca, evidenciando sua versatilidade em diferentes regiões. Essas características fazem do CCN 51 um dos clones mais cultivados, não apenas no Brasil, mas também em outros países produtores de cacau.

Na Bahia, os clones SJ 02, FA 13, CCN 51 e PS 1319 são recomendados para plantios comerciais devido à sua alta produtividade, com médias anuais destacadas ao longo de 11 anos de avaliação em 79 locais (Macêdo et al., 2021). Em comparação, estudos realizados pelo Incaper (2022) apontam o PS 1319 e o CCN 51 como os clones mais cultivados no Espírito Santo, enquanto em Rondônia, observa-se uma substituição gradual das variedades híbridas por clones como CCN 51, SJ 02 e PS 1319, entre outros (Almeida et al., 2020). Essas observações destacam a relevância desses clones para sistemas produtivos de cacau em biomas tropicais úmidos, corroborando estudos que mostram variações morfoagronômicas em diferentes ambientes, devido à interação genótipo x ambiente (Doaré, Ribeyre & Cilas, 2020).

Estudos como os de Lopes et al. (2011) em programas de melhoramento no Brasil destacam como a interação genótipo x ambiente influencia a produtividade e a qualidade em clones. Pesquisas sobre diversidade genética em bancos de germoplasma mostram que clones regionais como PS 1319, SJ 02, CP 49 e FA 13 possuem potencial de adaptação local e características desejáveis, embora sejam necessários mais estudos

específicos. Dessauw et al. (2024) destacam a importância da estabilidade produtiva ao longo do tempo em clones regionais, enquanto trabalhos de Monteiro e Ahnert (2012) abordam a relevância da seleção genômica para maximizar características de interesse, como resistência a doenças e rendimento de amêndoas.

Embora os clones de cacau CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49 e FA 13 tenham importância reconhecida no contexto agrícola e industrial, informações diretas sobre seus desempenhos específicos são ainda limitadas em algumas literaturas.

Caracterização morfoagronômica do cacau

O cacaueiro é uma planta perene que atinge entre 4 a 12 metros de altura. O porte pode variar de acordo com a cultivar e as condições ambientais, como tipo de solo, regime hídrico e manejo (Monteiro & Ahnert, 2012). A arquitetura da planta é caracterizada por um tronco principal e ramos lenhosos de onde emergem as flores, em estruturas denominadas almofadas florais (Sodré, Magno & Monteiro, 2017). As flores do cacaueiro são pequenas e florescem no tronco ou nos ramos mais velhos, esse processo é conhecido como caulifloria. Essas almofadas produzem uma grande quantidade de flores, com um potencial de mais de 100.000 unidades por árvore, embora menos de 5% sejam fertilizadas, e apenas cerca de 0,1% dessas flores se transformem em frutos (Muller & Valle, 2012). As flores apresentam pétalas esbranquiçadas ou rosadas e são polinizadas principalmente por pequenos insetos do gênero *Forcipomyia*, que influenciam diretamente a produção de frutos e, consequentemente, a produtividade da cultura (Sodré, Magno & Monteiro, 2017).

Os frutos do cacaueiro variam em coloração conforme o estágio de maturidade, do verde, quando ainda imaturos, ao amarelo ou laranja quando maduros, enquanto algumas variedades passam de um tom roxo ao laranja (Monteiro & Ahnert, 2012). A frutificação ocorre entre quatro e seis meses após a floração, dependendo das condições ambientais. A relação massa-volume do fruto é de aproximadamente 1:2 (500 g: 1000 cm^3), sendo que a casca compreende cerca de 75% da massa total do fruto. Um fruto maduro geralmente apresenta cerca de 25 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro no ponto mais largo (Sodré, Magno & Monteiro, 2017).

Dentro do fruto do cacaueiro, encontram-se cerca de 30 a 40 sementes, organizadas em torno de uma estrutura central chamada placenta (Muller & Valle, 2012). As sementes são cobertas por uma mucilagem branca conhecida como polpa, rica em açúcares, constituindo aproximadamente 30% da massa seca do fruto (Muller & Valle,

2012). Essa composição química é de grande importância para o processo de fermentação, um estágio crucial na produção de cacau de qualidade (Ferreira et al., 2013).

O desenvolvimento e o estabelecimento de programas de melhoramento requerem uma compreensão detalhada da arquitetura genética de características de interesse. Cultivares ideais devem apresentar rápido crescimento inicial, rendimento precoce, porte reduzido, crescimento ereto, concentração de frutos nos ramos principais, resistência parcial e duradoura a doenças, frutos de tamanho médio a grande, autocompatibilidade, amêndoas de qualidade superior, alto rendimento e fácil manejo (Ahnert, 2009; Ahnert et al., 2018; Duval et al., 2017; Lopes et al., 2011). No entanto, os componentes de produção e outras características importantes, influenciadas pela genética, ambiente e manejo, ainda são, em geral, mal compreendidos no contexto do melhoramento do cacau (Dias & Resende, 2001; Duval et al., 2017; Ahnert et al., 2018).

Componentes de produção

A biometria, definida como a aplicação de métodos estatísticos para a solução de problemas biológicos, têm desempenhado um papel fundamental na genética quantitativa e no melhoramento de plantas (Duarte, 2010), incluindo o cacaueiro (Dias & Resende, 2001). Essa abordagem permite refinar a análise para orientar estratégias e decisões, otimizando o uso de recursos (Cruz et al., 2021). A identificação de cultivares altamente produtivas é feita através das características agronômicas que possuem correlação com a produtividade, ou efeito indireto (Borém, Miranda & Fritsche-Neto, 2017). As técnicas preditivas da genética biométrica possuem importante aplicação em programas de melhoramento para seleção de genótipos de alta produção (Dias & Resende, 2001). Estudos indicam que a variabilidade genética do cacaueiro é alta para a maioria dos caracteres, como cor, formato, peso e tamanho das sementes, o que reforça a importância da avaliação biométrica em diferentes condições edafoclimáticas para a seleção dos melhores materiais genéticos (Ahnert et al., 2018). O cacaueiro possui grande variabilidade genética para a maioria dos caracteres e, como exemplo, suas sementes variam em cor, formato, peso e tamanho, segundo o grupo genético e a cultivar (Ahnert et al, 2009). Nesse sentido, existe a necessidade de que as cultivares sejam avaliadas biometricamente em diferentes condições edafoclimáticas, para selecionar os melhores materiais genéticos (Ahnert et al, 2018; Lopes et al., 2001).

Os clones de maior interesse agronômico, industrial e comercial são os que possuem características superiores, tais como: frutos maiores, baixo índice de fruto e peso

de amêndoa maior que 1 g (Monteiro & Ahnert, 2012; Santos, Pires & Corrêa, 2012; Alexandre et al., 2015). O peso médio de uma amêndoa é uma característica altamente hereditária, mas que depende de diversos outros fatores, como o número de frutos por planta e o índice de semente (Doaré, Ribeyre & Cilas, 2020). Segundo Dias & Resende (2001) as variáveis que melhor discriminam características desejáveis para o produtor, são número de frutos por planta, número de sementes por fruto, índice de fruto e índice de semente. O índice de fruto avalia o potencial produtivo do clone, através de outras duas variáveis: número de sementes por fruto e índice de semente. O índice de fruto, indica o número de frutos necessários para produzir 1 kg de amêndoas secas. O número de frutos por planta, apesar de ser considerado um dos componentes de produção mais importantes para a seleção de cultivar e para seleção de matrizes, baseia-se no monitoramento inicial do número de frutos por planta e posterior descarte de matrizes de baixa produção a partir do índice de fruto e índice de semente (Dias & Resende, 2001). Dias & Resende (2001) observam que o aumento na produção de frutos geralmente reduz o número de sementes, índice de semente, peso do fruto e peso de amêndoas, devido à competição por fotoassimilados.

O panorama de exigências do mercado e da indústria, de forma geral, sobre atributos físicos e químicos das amêndoas de cacau e as consequências econômicas dessas exigências, ressaltam também a necessidade de pesquisas sobre os componentes de produção e qualidade do cacau (Ferreira, 2013; Loureiro, 2014).

Sistemas de cultivo de cacau

Os sistemas de cultivo sombreado, também conhecidos como sistemas agroflorestais (SAFs), combinam árvores e culturas agrícolas. Esses sistemas têm sido amplamente reconhecidos por seus múltiplos benefícios ecológicos e socioeconômicos. Jose (2019) argumenta que os SAFs oferecem benefícios como sequestro de carbono, conservação da biodiversidade, enriquecimento do solo e melhoria da qualidade do ar e da água, além de proporcionar diversificação econômica por meio da produção de múltiplas culturas, como frutas, madeira, e outros produtos não madeireiros.

No sul da Bahia, a maior parte das lavouras é cultivada em Sistemas Agroflorestais, denominado cabruca, onde o cacaueiro é cultivado sob a sombra de árvores nativas da Mata Atlântica (Gama Rodrigues et al. 2020). Esses sistemas sombreados são conhecidos por sua alta produção de matéria orgânica e serapilheira, que contribuem para a ciclagem de nutrientes, conservação do solo e manutenção da umidade,

fatores importantes para a sustentabilidade da produção agrícola (Heming et al., 2022; Nogueira et al., 2019).

A presença de árvores nos SAFs proporciona um microclima mais ameno, reduzindo o estresse hídrico e térmico das plantas, o que favorece o crescimento e a produtividade do cacau (Vaast & Somarriba, 2014; Baligar et al., 2021). Adicionalmente, as árvores nos sistemas sombreados contribuem para a redução da erosão do solo e melhoram sua estrutura e fertilidade por meio da adição de matéria orgânica (Nogueira et al., 2019). Esses benefícios são importantes em contextos de mudanças climáticas, onde estratégias de mitigação, como o cultivo agroflorestal, podem ajudar a manter a sustentabilidade da produção de cacau (Arimi & Omoare, 2021).

Apesar dos benefícios significativos dos SAFs, Esses sistemas agroflorestais estão sendo gradualmente substituídos por monoculturas de cacau sem sombra que podem ser mais vulneráveis a mudanças no clima (Heming et al., 2022). A falta de validação científica e a ausência de programas eficazes de incentivo à adoção dessas práticas são obstáculos (Arimi & Omoare, 2021). Além disso, o acesso limitado à assistência técnica e ao crédito rural representa um desafio adicional para os pequenos produtores (Rodríguez et al, 2022), que constituem a maioria dos cacauicultores no sul da Bahia (Chiapetti et al., 2020;).

Em contraste com os sistemas sombreados, o cultivo de cacau a pleno sol envolve a exposição direta das plantas em sistema monocultivo à radiação solar. Embora essa prática possa maximizar a produção a curto prazo, permitindo maior densidade de plantas e, potencialmente, um maior produção inicial, estudos indicam que o monocultivo sem sombra pode resultar em perdas significativas de produção a longo prazo, devido ao aumento do estresse térmico e hídrico e à maior vulnerabilidade a pragas e doenças (Heming et al., 2022). Gama-Rodrigues et al. (2021) também sugerem que sistemas de cultivo a pleno sol têm menor capacidade de mitigar os efeitos negativos das mudanças climáticas em comparação com sistemas agroflorestais.

Estudos comparativos entre sistemas sombreados e a pleno sol destacam que a escolha do sistema de cultivo pode ter um impacto substancial na produtividade e na qualidade do cacau. Notaro et al. (2021) complementam que a estruturação adequada dos SAFs, incluindo a gestão da distância e altura das plantas associadas, é importante para otimizar a produtividade.

Análises estatísticas

A análise estatística de componentes de produção de cacau envolve uma variedade de métodos que visam explorar e entender a variabilidade genética e a interação com o ambiente, essencial para o melhoramento de cultivares e a otimização da produção. Historicamente, as análises de variância (ANOVA) têm sido amplamente utilizadas por melhoristas de plantas para tomar decisões baseadas no ajuste de modelos fixos. Na estimativa do erro experimental por meio do quadrado médio do resíduo (Duarte, 2010). No entanto, a precisão dessas estimativas é frequentemente limitada, o que levou ao desenvolvimento e aplicação de métodos alternativos, como a máxima verossimilhança restrita ou residual (REML) e os modelos mistos (Duarte, 2010). O método REML ganhou destaque devido às suas propriedades estatísticas superiores, especialmente quando utilizado em combinação com Best Linear Unbiased Predictors (BLUPs). Os BLUPs são predições empíricas que consideram co-variâncias estimadas e os próprios dados, o que torna o método particularmente robusto para estudos de genética quantitativa em plantas como o cacaueiro (Duarte, 2010). Entretanto, o uso de REML e BLUPs deve ser cauteloso, pois erros de pedigree não corrigidos podem distorcer as estimativas de herdabilidades e ganhos genéticos, prejudicando o progresso do melhoramento (DuVal et al., 2017).

Além da ANOVA, dos modelos mistos e mapeamento genético, análises multivariadas, como análises de agrupamento (*cluster*) e correlações, têm sido aplicadas em estudos de componentes de produção de cacau. A correlação de Pearson é a correlação mais utilizada em análises estatísticas (Storopoli & Vils, 2021). Essas técnicas permitem uma compreensão mais profunda da similaridade entre clones e da importância relativa de cada característica agronômica. Por exemplo, a análise de agrupamento baseada na distância euclidiana, realizada através do pacote *Vegan* no software R, e a análise de correlação com mapas de calor (*heatmap*) utilizando o pacote Heatmaply, são ferramentas eficazes para identificar padrões de similaridade e correlação entre clones de cacau e suas características agronômicas (Santos, 2018; Kassambara, 2023; Oksanen, 2017; Galili, 2018).

A análise de trilha é outra metodologia estatística relevante no estudo dos componentes de produção de cacau. Introduzida por Wright em 1921 (Wright, 1934), essa técnica de modelagem estatística permite decompor correlações fenotípicas em efeitos diretos e indiretos. Ela é especialmente útil para identificar variáveis que influenciam diretamente a produtividade, separando-as de variáveis que têm efeitos indiretos mediados por outras características. Em estudos recentes, a análise de trilha foi utilizada

para explorar a contribuição de características como circunferência da árvore e número de frutos por árvore na produtividade, revelando que algumas variáveis têm efeitos diretos mais significativos que outras (Thondaiman & Rajamani, 2024). A análise de trilha de características morfoagronômicas de cacau foi utilizada por Santos et al. (2018) para avaliar progênies tolerantes à seca. Solís Bonilla et al. (2022) utilizaram a análise de trilha e evidenciaram que o número total de frutos por planta tem efeitos diretos positivos significativos sobre o peso seco de amêndoa, superando outras variáveis em termos de efeito direto.

CAPÍTULO 1

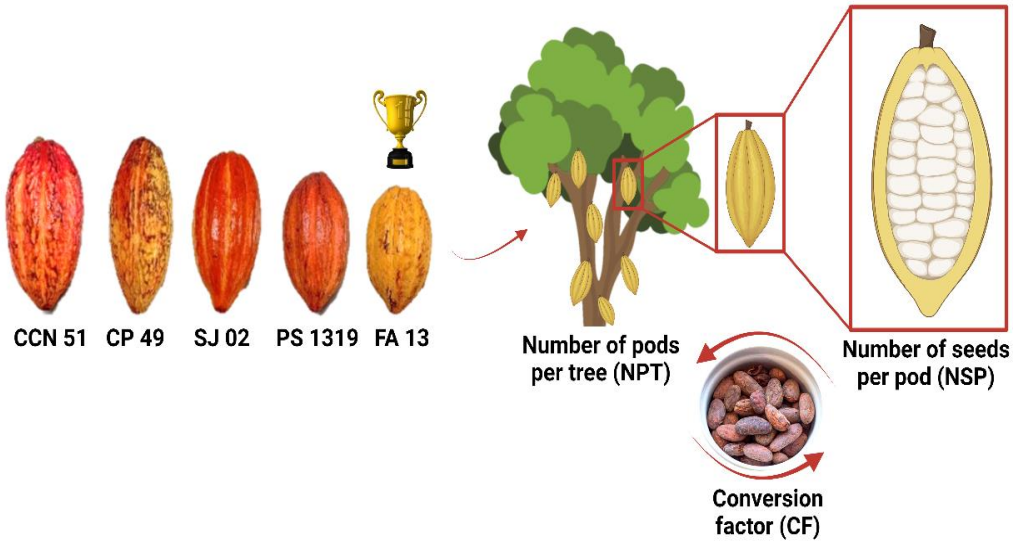
Morpho-agronomic traits and cocoa beans quality of elite cacao clonal cultivars from southern Bahia, Brazil

Alane Paula Peixoto Pannain[1]; Gonçalo Santos Silva[1,2]; Ivanildes Conceição dos Santos[1,2]; Ronan Xavier Corrêa[1]; Dario Ahnert[1,2]

[1] Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, 45662-900 Ilhéus, Bahia, Brazil

[2] Centro de Inovação do Cacau, Ilhéus, Bahia, Brazil

Artigo submetido e aceito na Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.



Source: Created with BioRender.com.

Supplementary figure 1. Graphic abstract

HIGHLIGHTS:

Brazilian clonal cacao cultivars from southern Bahia outperformed CCN 51 in cocoa bean yield.

The number of pods per tree had the strongest correlation with yield; pod and seed indices showed no relationship with yield.

Clone FA 13 had the highest yield, while PS 1319 and SJ 02 clones exhibited superior sensory quality.

ABSTRACT: Morpho-agronomic characterization of cacao clonal cultivars is essential for evaluating performance and selecting high-yield, quality cultivars. This study assessed 52 traits of pods, flowers, beans, and sensory characteristics in five cacao clones: CCN 51, PS 1319, SJ 02, FA 13, and CP 49, in a farm trial in southern Bahia. Significant differences ($p < 0.01$) were observed across all traits. FA 13, despite having the least favorable pod and seed indices, showed the highest seed count per pod and pod count per plant, indicating superior yield. CCN 51 excelled in pod and seed size and weight. PS 1319 and SJ 02 showed similarities, performing well in sensory quality, and pulp content. CP 49 had lower overall performance. Cluster analysis revealed that the number of pod per tree had low similarity with the seed index and high similarity with the pod index. Principal component analysis highlighted a positive association between yield, pod count, seeds per pod, and FA 13. In general, pod and seed indices were poor yield indicators, while pod count and seeds per pod were the most reliable characteristics for selecting clones with high agronomic and commercial performance.

Key words: cocoa clones; morphological characterization; production components

Características morfoagronômicos e qualidade de amêndoas de cultivares clonais de cacau de elite do sul da Bahia, Brasil

RESUMO: A caracterização morfoagronômica de cultivares clonais de cacau é essencial para avaliar o desempenho e selecionar cultivares de alta produtividade e qualidade. Este estudo avaliou 52 características de frutos, flores, sementes e qualidades sensoriais em cinco clones de cacau: CCN 51, PS 1319, SJ 02, FA 13 e CP 49, em um ensaio de campo no sul da Bahia. Diferenças significativas ($p < 0,01$) foram observadas em todas as características. O clone FA 13, apesar de apresentar os piores índices de fruto e semente, exibiu o maior número de sementes por fruto e frutos por planta, indicando maior produtividade. O CCN 51 se destacou no tamanho e peso de frutos e sementes. PS 1319 e SJ 02 apresentaram semelhanças e bom desempenho em qualidade sensorial e teor de polpa. O CP 49 teve o desempenho mais baixo em geral. A análise de agrupamento revelou que o número de frutos por planta teve baixa similaridade com o índice de sementes e alta similaridade com o índice de fruto. A análise de componentes principais destacou uma associação positiva entre produtividade, número de frutos, sementes por fruto e o clone FA 13. No geral, os índices de fruto e semente foram indicadores fracos de produtividade, enquanto o número de fruto e sementes por fruto foram as características mais confiáveis para selecionar clones de alto desempenho agronômico e comercial.

Palavras-chave: clones de cacau caracterização morfoagronômica, componentes de produção

INTRODUCTION

The global cocoa and chocolate market is expected to reach US$ 182.52 billion by 2026 (Guirlanda et al., 2021). However, despite the upward trend, with a historically high price, trading above 10,000 dollars per ton, it is driven by restricted supply (ICCO, 2024). Brazil, despite having excelled as the main producer of cocoa beans in the world, currently occupies the sixth place in the production ranking (ICCO, 2024). The drop in national production was caused by the progressive decline in cocoa production in the state of Bahia due to several factors: old plantation, poor management of the plantation by farmers, climate change, phytosanitary and socioeconomic problems (Lopes et al., 2011; Ahnert et al., 2018). The current scenario of low productivity in Bahia of 325 kg ha^{-1} (IBGE, 2023) imposes the need to renew old cacao plantations with the use of more resistant and productive clonal cultivars (Ahnert & Eskes, 2018; Somarriba et al., 2021; Lopes et al., 2022). Additionally, increasing productivity on existing lands is crucial to meet the growing cocoa demand while preventing deforestation and reducing the pressure for expanding cacao cultivation into forested areas (Asante et al., 2022).

Cacao breeding and selection programs have developed agronomically superior, productive, resistant and farmer-accepted clonal cultivars (Ahnert et al., 2009; Lopes et al., 2011; Santos et al., 2015). The clonal cultivars CCN 51, PS 1319, SJ 02, FA 13, and CP 49 are recommended for cultivation and are widely used by farmers in southern Bahia (Macêdo et al., 2021). Considering that the behavior of these clonal cultivars is influenced by genetics, environment, and management, it is necessary to evaluate them under different growing conditions to identify the most promising ones for each use condition (Ahnert & Eskes, 2018; Ahnert et al., 2018).

Cacao cultivation under irrigation, full sun, and optimal agricultural practices is expanding in Brazil. However, few studies have evaluated clonal cultivars under these conditions. Cacao trees are highly responsive to water and sensitive to drought stress

(Almeida & Valle, 2007; Carr & Lockwood, 2011; Lahive et al., 2019; Araújo et al., 2024), impacting both yield and plant survival (Souza Junior et al., 2022). In light of climate change and increasing water scarcity, it is essential to examine the performance of cacao clones under irrigation. Even in humid regions, supplemental water may be necessary during drought periods (Ramos et al., 2018).

The cacao clonal cultivars of greatest agronomic, industrial, and commercial interest are those that present superior traits, such as high productivity, disease resistance, self-compatibility, larger pods, seed index greater than 1 g, low pod index, and great efficiency index (Dias & Resende, 2001; Ahnert, 2009; Santos et al., 2012; Bekele et al., 2019). The morpho-agronomic traits of pod and beans are determinants of cocoa productivity and quality (Adenuga et al., 2022). This information can help producers choose the best genetic material for planting, which is the first step in establishing cacao clonal orchards (Ahnert et al., 2018). Regarding genetic factors, once a cultivar with superior traits is selected, the chances of success in cultivation are greater (Ahnert et al., 2009). Morpho-agronomic characterization is important for selecting cultivars of greatest agronomic and commercial interest (Engels, 1986; Bartley, 2005; Santos et al., 2012; Ahnert & Eskes, 2018; Georges et al., 2023).

The objective of this study was to evaluate the performance of the cacao clonal cultivars CCN 51, PS 1319, SJ 02, FA 13, and CP 49 in terms of their morpho-agronomic traits of greatest agronomic and commercial interest.

MATERIAL AND METHODS

The study aimed to analyze the morpho-agronomic traits of flowers, pods, seeds, beans, and sensory attributes of elite clonal cultivars from southern Bahia (PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13) in comparison to the international cultivar CCN 51. The selected

cultivars are self-compatible, productive, and disease-resistant (Lopes et al., 2011; Ahnert et al., 2018; Macêdo et al., 2021). The pods were collected from 6-year-old plants in farm field trial in Una, southern Bahia, Brazil, located between S 15° 20.616' and W 039° 04.861', in 2021. The evaluation of traits among clonal cocoa cultivars can be conducted based on a single favorable year (Dias & Kageyama, 1997). The evaluation period of production components from the 4th year onwards allows a reliable estimate of the performance potential of cocoa, with genetic correlation above 0.85 (Cilas et al., 2022).

The experiment was planted in randomized block design with two blocks, totaling 10 plots. Each plot contained 20 cacao trees per cultivar, spaced 3 × 3 m in a triangle arrangement, with 2.6 m between single rows and 4 m between double rows. The field trial was established on flat, sandy-clay soil with drip irrigation and full-sun exposure to ensure uniform water availability and solar radiation. From each cacao clonal cultivar, 20 healthy and mature pods were sampled. Monthly production data, including number of pods per tree (NPT), were also recorded.

Pods were processed in the agro-industry laboratory at the State University of Santa Cruz (UESC). A semi-analytical scale, caliper, and ruler were used. The following morpho-agronomic characteristics were measured (Figure 1): number of pods per tree (NPT); pod weight (PWe); pod length (PL); pod width (PWi); pod husk thickness (PHT); pod husk weight per pod (PHW); pod placenta weight (PPW); weight of 10 seeds with pulp (WSP10); wet weight of 10 seeds (WWS10) (the pulp was removed using cotton cloth and a sieve with a mesh size of 2 mm); number of seeds per pod (NSP); empty seeds per pod (ESP); usable seeds per pod (USP) (Engels, 1986).

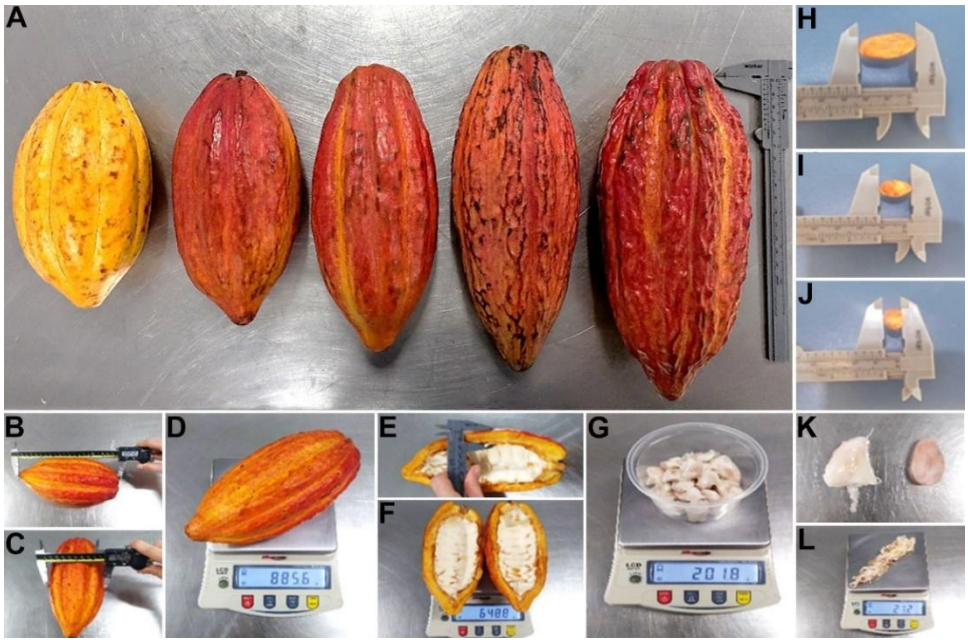


Figure 1. Morpho-agronomic characterization of pods and seeds of the clonal cultivars analyzed. Pods of FA 13, PS 1319, SJ 02, CP 49, and CCN 51, respectively (A), pod length (B), pod width (C), pod weight (D), pod husk thickness (E), pod husk weight (F), wet seed weight (G), bean width (H), bean length (I), bean thickness (J), pulp yield (K), placenta weight (L)

Seeds underwent a five-day fermentation process in 5 L styrofoam boxes, going through anaerobic and aerobic phases, followed by drying in a solar oven for 10 days. After drying, morpho-agronomic traits such as dry weight of 10 beans (DWB10), bean thickness (BT), bean length (BL), and bean width (BW) were collected (Figure 1).

After obtaining the morpho-agronomic traits, the following variables were calculated: pulp yield (PY) - difference in weight between WSP10 and WWS10, in percentage; beans yield (BY) - quantity of seeds per pod, in percentage; husk yield (HY) - quantity of husk per pod, in percentage; seed index (SI) - weight of 1 dry bean, obtained from DWB10; conversion factor from wet to dry beans (CF) - proportion of the weight of WWS10, which results in DWB10; bean dry weight per pod (BWP) - variable that estimates how

much one pod generates in bean weight, obtained from SWP multiplied by CF; efficiency index (EI) – a variable that relates the weight of the pod to the weight of the dry bean; pod index (PI) obtained using the Eq. 1 (Engels, 1986; Dias & Resende, 2001).

$$PI \approx 1000g \div (USP \times SI) \quad (1)$$

Where:

PI - pod index (nº);

USP - usable seeds per pod (nº); and,

SI - seed index (g).

Flowers were collected in the early morning hours, 20 open flowers from 20 trees of each cultivar during the off-season harvest in 2021. All their constituent parts were measured using a caliper, forceps, and scalpel. The following variables were evaluated: sepal length (SL), sepal width (SW), petal length (PL), petal width (PW), staminode length (SLe), stigma length (SLa), ovary length (OL), ovary width (OW). Using a 10× magnifying lens, a lateral incision was made in the ovaries and the number of ovules (NO) present in each ovary was counted. The Ovules:Seeds (O:S) ratio was calculated (Bahia, 2007). Furthermore, the color of the pendulum, petal, sepal, guide lines, staminode and stigma of five flowers was analyzed using the Munsell color system (Munsell, 1905).

Regarding the analysis of sensory characteristics, 5 kg of dry fermented cocoa bean samples per clonal cultivar were analyzed. The analyses were conducted at the Cocoa Innovation Center (CIC), located at UESC. The sensory test report for cocoa liquor was based on the normative reference(s) CAOBISCO/ECA/FCC (2015). The overall quality and the following attributes were evaluated: acidity, astringency, woody, bitterness, nutty, sweet, spicy, floral, fresh pod, brown pod, cocoa flavor, roasted, other attributes, as well as off-flavors such as animal/leather, smoke, mold, overfermented/putrid, and dirty.

Statistical Analysis

Data from the morpho-agronomic traits of pods and seeds/beans were subjected to analysis of variance (ANOVA), F test with a significance level of 0.01. The mean morpho-agronomic traits of pods, seeds/beans and flowers were grouped using the Tukey test at 0.05 probability, using the SISVAR program (Ferreira, 2011). Multivariate analysis was carried out for all five clones and all traits. The cluster analysis was based on Euclidean distance as a similarity measure and was calculated using the Vegan package (Oksanen, 2017). Correlation analysis between clones and variables was calculated using the Heatmaply package (Galili, 2018). Multivariate analysis using heatmap dendrograms was used to identify patterns of similarity and correlations between the morpho-agronomic traits of the pods, seeds/beans and sensory characteristics of the cocoa clones. Data on the morpho-agronomic traits of pods and seeds/beans were subjected to principal component analysis (PCA), correlated with productivity, was calculated using the factoextra package (Kassambara, 2023). Productivity was measured in kg/ha/year, determined by the NPT divided by the PI, which resulted in the dry beans weight per tree. This value was then multiplied by a standard density of 1,000 trees per hectare.

RESULTS AND DISCUSSION

The analysis of variance revealed a significant difference at the 0.01 probability level, according to the F-test, for all morpho-agronomic characteristics analyzed (Table 1). The variables PL, PWi, PHT, BL, PWe, PHW, WSP10, WWS10, DWB10, CF, SI, HY showed low coefficients of variation (CVs), all below 10%. Most variables showed low dispersion and homogeneity of data. The traits that exhibited very high coefficients, greater than 30%, were the ESP and NPT. This discrepancy can be attributed to variations between pod and tree traits within the same clonal cultivar, possibly due to inconsistent

seeds and pods in the samples caused by other uncontrolled environmental factors (Silva et al., 2011).

Tukey's test revealed significant differences ($p < 0.05$) among all variables analyzed (Table 2). CCN 51 presented higher morpho-agronomic values for most traits, such as PI, SI, PY, BWP, PL, BL and PWi compared to the other cultivars. Although CP 49 also had larger cocoa pods and beans, PL and BL. CP 49 presented a complex interaction by recording the lowest values for SWP, BWP, WSP10, WS10, DWB10, BL, BW, PY, HY and BY, with no significant difference with FA 13 for these traits, despite its lower PL and BL.

The CCN 51 clone, developed in Ecuador through breeding programs, is the most extensively studied clonal cultivar, characterized by economically desirable traits, high productivity, and adaptability to diverse regions, making it one of the most widely cultivated clonal cultivars globally (Boza et al., 2014; Jaimez et al., 2022). Alexandre et al. (2015) identified genetic divergence among seven clonal cultivars in Espírito Santo, Brazil, with CCN 10 and CCN 51 deemed most suitable for cocoa beans yield. Reges et al. (2021) reported that CCN 51 produced the largest pods among four clonal cultivars in Ceará, Brazil. Doaré et al. (2020) found it had the highest average seed weight, which correlated with the number of seeds per pod in a study of seven clones in French Guiana. Almeida et al. (2013) demonstrated that varying irrigation schedules and nitrogen doses significantly increased pod production in CCN 51. Although resistant to certain climatic conditions, CCN 51 is known for its weaker flavor profile and is typically marketed as bulk cocoa (Herrmann, 2015). Studies in western Colombia also identified CCN 51 as one of the most productive clones (Ramírez et al., 2021). However, in contrast to expectations, CCN 51 was the least productive compared to other Brazilian clonal cacao cultivars in this study, exhibiting large pods and seeds but a low pod index, resulting in fewer pods per tree than other clones (Table 2).

Table 1. Analysis of variance of 25 morpho-agronomic traits of pods and seeds/beans of five cacao clonal cultivars – CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13 – in a farm field trial in southern Bahia, Brazil

Traits	Mean	FC	CV %
PL (mm)	202.78	203.70*	4.06
PWi (mm)	91.61	24.06*	3.16
PHT (mm)	17.61	43.18*	9.39
BL (mm)	24.78	14.81*	5.09
BW (mm)	12.18	26.71*	5.91
BT (mm)	7.47	25.62*	11.78
NSP (nº)	45.34	3.78*	12,50
ESP (nº)	0.85	3.28*	110.13
USP (nº)	44.49	4.27*	12.78
PWe (g)	691.53	106.90*	7.67
PHW (g)	532.09	82.50*	9.06
PPW (g)	15.23	158.00*	14.73
SWP (g)	145.46	60.75*	13.99
BWP (g)	60.29	19.78*	16.43
WSP10 (g)	31.98	129.08*	9.88
WWS10 (g)	21.93	102.02*	7.99
DWB10 (g)	13.15	366.20*	3.95
NPT (nº)	85.08	19.88*	34.71
CF	0.42	21.94*	10.00
SI (g)	1.31	366.20*	3.95
EI (g)	11.81	8.75*	18.36
PI (nº)	17.86	18.12*	17.05
PY(%)	30.17	45.26*	13.34
HY (%)	76.91	53.40*	4.25
BY (%)	21.15	52.70*	12.62

FC - F calculated, * - Significant at 0.01 probability by F test; CV (%) - Coefficient of variation. Pod length - PL ; Pod width - PWi; Pod husk thickness - PHT; Bean length - BL; Bean width - BW; Bean thickness - BT; Number of seeds per pod - NSP; Empty seeds per pod - ESP; Usable seeds per pod - USP; Pod weight - PWe; Pod husk weight per pod - PHW; Pod placenta weight - PPW; Wet seed weight per pod - SWP; Bean dry weight per pod - BWP; Weight of 10 seeds with pulp - WSP10; Wet weight of 10 seeds - WWS10; Dry weight of 10 beans - DWB10; Number of pods per tree - NPT; Conversion factor - CF; Seed index - SI; Efficiency index - EI; Pod index - PI; Pulp yield - PY; Husk yield - HY; Beans yield - BY

Table 2. Averages of the 25 morpho-agronomic traits of pods, seeds and beans of five cacao clonal cultivars – CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13 – in a farm field trial in southern Bahia, Brazil

Traits	CCN 51		PS 1319		SJ 02		CP 49		FA 13	
PL (mm)	230.60	a	179.70	c	200.65	b	228.35	a	174.60	c
PWi (mm)	96.05	a	89.85	b	89.10	b	89.15	b	93.90	a
PHT (mm)	20.10	c	13.65	a	17.55	b	17.85	b	18.90	bc
BL (mm)	26.35	a	25.15	b	24.65	b	23.40	c	24.35	bc
BW (mm)	13.40	a	12.70	b	11.60	c	11.55	c	11.65	c
BT (mm)	8.20	ab	6.60	c	7.65	b	8.60	a	6.30	c
NSP (nº)	45.55	ab	45.55	ab	45.25	ab	41.70	b	48.65	a
ESP (nº)	0.95	ab	1.35	b	0.40	a	1.00	ab	0.55	ab
USP (nº)	44.60	ab	44.20	ab	44.85	ab	40.70	b	48.10	a
PWe (g)	881.27	a	571.31	c	723.65	b	682.75	b	598.68	c
PHW (g)	656.59	d	396.06	a	558.18	c	567.28	c	482.36	b
PPW (g)	23.63	e	18.81	d	14.80	c	11.53	b	7.37	a
SWP (g)	194.90	a	157.98	b	152.50	b	109.54	c	112.40	c
BWP (g)	76.01	a	59.69	bc	61.80	b	51.71	c	52.24	c
WWS10 (g)	43.05	a	35.15	b	33.29	b	25.26	c	23.15	c
WSP10 (g)	27.29	a	24.15	b	21.47	c	19.65	d	17.08	e
DWB10 (g)	16.62	a	13.12	b	13.44	b	11.89	c	10.69	d
NPT (nº)	55.20	d	84.60	bc	63.40	cd	91.75	b	130.45	a
CF	0.39	b	0.38	b	0.41	b	0.47	a	0.46	a
SI (g)	1.66	a	1.31	b	1.34	b	1.19	c	1.07	d
EI (g)	11.83	b	9.81	a	11.90	b	13.86	c	11.67	ab
PI (nº)	13.76	a	17.68	bc	16.77	b	21.31	d	19.78	cd
PY(%)	36.40	a	30.95	b	35.27	a	22.12	d	26.11	c
HY (%)	74.48	b	69.33	a	77.11	b	83.08	c	80.55	c
BY (%)	22.17	b	27.64	a	21.15	bc	16.00	d	18.81	c

Averages with letters in common are not significantly different according to the Tukey test ($p > 0.05$). Pod length - PL ; Pod width - PWi; Pod husk thickness - PHT; Bean length - BL; Bean width - BW; Bean thickness - BT; Number of seeds per pod - NSP; Empty seeds per pod - ESP; Usable seeds per pod - USP; Pod weight - PWe; Pod husk weight per pod - PHW; Pod placenta weight - PPW; Wet seed weight per pod - SWP; Bean dry weight per pod - BWP; Weight of 10 seeds with pulp - WSP10; Wet weight of 10 seeds - WWS10; Dry weight of 10 beans - DWB10; Number of pods per tree - NPT; Conversion factor - CF; Seed index - SI; Efficiency index - EI; Pod index - PI; Pulp yield - PY; Husk yield - HY; Beans yield - BY

PS 1319, SJ 02 and, FA 13 were selected on farms by farmers in southern Bahia, and later registered by CEPLAC. A study in Ivory Coast, the leading cocoa producer and exporter, found greater allelic richness in farm accessions compared to parental clones from seed gardens, indicating potential for expanding breeding programs by incorporating farm accessions into the working collection (Pokou et al., 2014). CP 49 is a cultivar selected at the Cocoa Research Center (CEPEC) in Ilhéus, Bahia, from the cross of (TSH-565 x CEPEC 11) x CCN 51 (Lopes et a., 2011). Despite their productive potential and being considered elite clonal cultivars, they are still little known and cultivated in southern Bahia, Brazil, and other producing regions of the world.

In southern Bahia, the most cultivated clonal cocoa cultivars are CCN 51 and PS 1319 although other studies have identified other superior clones (Ahnert et al., 2018). These two clones are expanding to other parts of Brazil, such as Espírito Santo, due to their high productivity and adaptability. In Espírito Santo, PS 1319 and CCN 51 are the most cultivated, representing 23.9 and 23.3% of plantations, respectively (INCAPER, 2022). In Rondônia, between 2012 and 2018, producers gradually replaced hybrids with clonal cultivars such as CCN 51, PH 16, SJ 02, PS 1319, CCN 10, and BN 34 (Almeida et al., 2020). In Ceará, the adaptation of cacao and the quality of its pods are still under study (Moreira et al., 2020).

The responses of the morpho-agronomic traits of these clones vary by region. Results from Alexandre et al. (2015) in Espírito Santo, Brazil, were similar to those in this study; however, Reges et al. (2021) reported different outcomes in the semiarid region of Ceará, suggesting that factors beyond water availability influenced these variations. Both studies, conducted in irrigated areas, emphasize the role of environmental factors on pod morphology in clonal cacao cultivars. For instance, CCN 51's PHW significantly differed ($p < 0.05$), with an average of 656.59 g in this study, compared to 558.76 g reported by

Alexandre et al. (2015) and 475.50 g by Reges et al. (2021). Greater similarity was observed between this study and that of Alexandre et al. (2015), both conducted in tropical forest regions, compared to the semiarid results. Studies in southern Bahia under rainfed conditions reported higher average yield for CCN 51, SJ 02, FA 13, and PS 1319 compared to this study (Macêdo et al., 2021). In this study, FA 13, CP 49, PS 1319, SJ 02, and CCN 51 were ranked in descending order of pod production per tree (Table 2). This demonstrates that cocoa genotypes exhibit considerable genetic variability in morpho-agronomic traits, as well as divergent outcomes attributable to environmental influences and management practices (Ahnert & Eskes, 2018; Doaré et al., 2020; Jaimes-Suárez et al., 2022; Georges et al., 2023). This underscores that the same clone can exhibit both similar and differing characteristics across regions due to environmental influences and management practices (Ahnert & Eskes, 2018; Doaré et al., 2020; Jaimes-Suárez et al., 2022). In northeastern Peru, a similar study identified the Indes and Bagüinos groups as having the best sensory characteristics and yield at altitudes above 500 meters (Oliva-Cruz et al., 2023).

Although the traits WSP10, WWS10 and DWB10 were fundamental to calculate the yield traits, such as BWP, PY and BY, they revealed different behavior among the cultivars (Table 2). For example, PS 1319 and SJ 02, which presented intermediate means for WSP10, WWS10 and DWB10, PS 1319 revealed superiority for BY with the highest proportion of beans per pod, and SJ 02 had the highest PY (Table 2).

The HY of FA 13 did not differ significantly of CP 49, which had the highest hull yield (Table 2). On the other hand, PS 1319 exhibited the lowest HY, statistically different from the other clonal cultivars. The cultivars exhibit an average husk-to-pod ratio of 76.91% (Table 1), there is a pressing need for improved management practices to address husk residues. Despite the potential as a potassium source for crops, husks are often left

concentrated in field, contributing to disease inoculum (Chepote, 2003). Guirlanda et al. (2021) emphasize the importance for cocoa-producing countries to develop innovative techniques to add value to cocoa residues, which represent approximately 80% of the pod. Study investigates the production of methyl esters using a new catalyst synthesized from a cocoa pod husk mixture (Olatundun et al., 2020).

The pulp is another significant byproduct of the pod, containing important compounds for fermentation, such as sugars, acids, and minerals (Nunes et al., 2020). CCN 51 and SJ 02 exhibited the highest PY values, significantly differing from other clones (Table 2). Moreira et al. (2020) identified PS 1319 as having higher pulp percentages and elevated levels of ascorbic acid, moisture, and proteins, making it a superior genotype for quality. Reges et al. (2021) also reported higher PY for PS 1319, underscoring its importance for pulp production, fermentation, and quality. Although PY is not a current priority for farmers, they generate income from pulp extraction for cocoa juice and honey, a fermentation byproduct rich in pectin, minerals, and fructose, which has potential for new products (Guirlanda et al., 2021). This pulp can be incorporated into diets and food supplements, as well as in technological processing (Silva Freitas et al., 2022), including bioethanol production (Delgado-Noboa et al., 2021). Studies indicate that partial pulp removal for other applications does not compromise fermentation but enhances chocolate quality, adding value to the pulp and benefiting the cocoa supply chain (Silveira et al., 2024).

Determining BWP from SWP and CF is crucial for producers to estimate dry cocoa bean production. Despite the importance of pod production, the wet weight of the seeds is the most important and generates the final product, as these are transformed into dry beans for sale (Carvalho et al., 2001). Typically, 40% CF of fresh cocoa is used for dry cocoa (Almeida et al., 2009). However, significant CF differences were observed among

cultivars in this study (Table 2), impacting production predictions. Therefore, it is necessary to employ specific CF values for each clone for an accurate production estimation.

The SWP, when multiplied by the CF, yields the BWP. For instance, CCN 51 exhibited a SWP of 194.9 g and a CF of 0.39 (Table 2), resulting in a BWP of 76.01 g. CCN 51 had the highest values for both SW and DW, statistically different from the other clonal cultivars (Table 2).

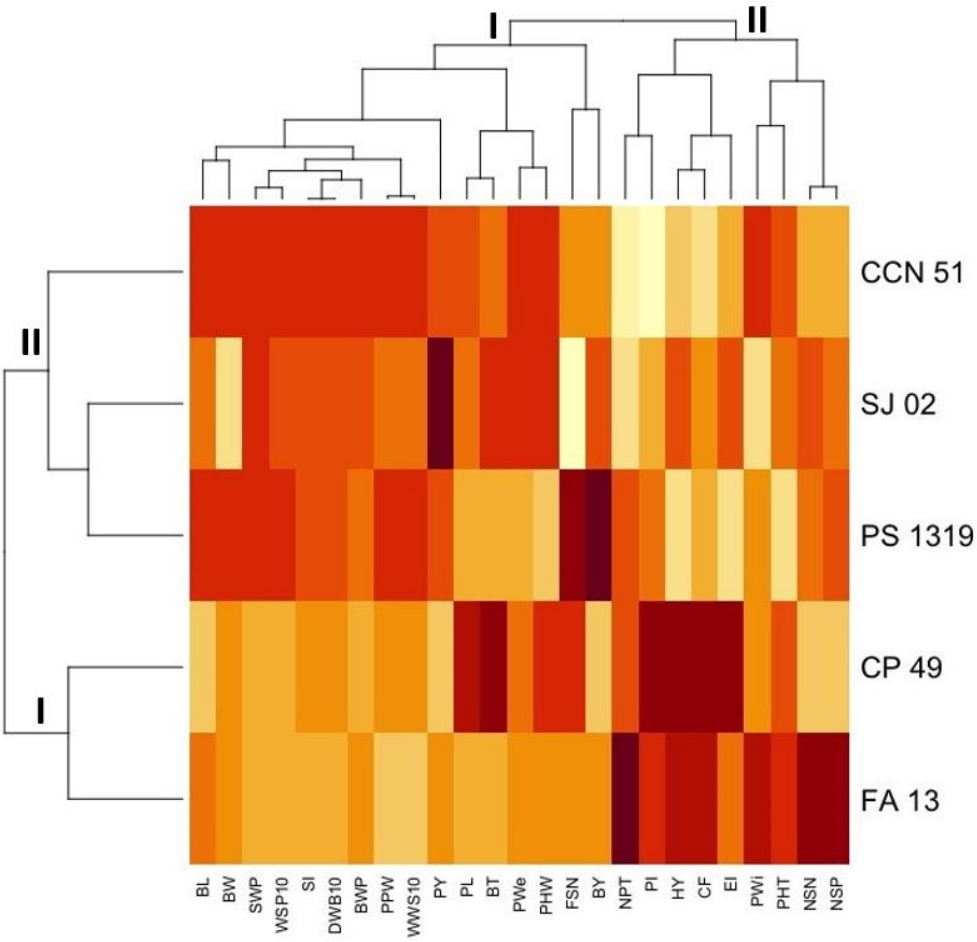
The clonal cultivars exhibited significant differences for the characteristics NSP, ESP, and USP (Table 2). However, when analyzing each clonal cultivar individually, no significant variation was observed between NSP and USP, despite differing ESP values. SJ 02 stood out with the lowest ESP value.

CCN 51 exhibited the lowest PI, requiring the fewest pods to produce 1 kg of cocoa beans compared to SJ 02, PS 1319, FA 13, and CP 49 (Table 2). All clonal cultivars analyzed presented SI values greater than 1 g, ranging from 1.1 g for FA 13 to 1.6 g for CCN 51. A complex interaction between SI and NSP was observed among the clonal cultivars, since FA 13 (48.1) demonstrated the highest NSP, differing significantly from the other clones. In addition, a complex interaction was observed between the biometric characteristics of PI, SI and NPT, since larger seeds do not necessarily present greater pod production. This study revealed an inverse relationship, the higher SI corresponded to lower NPT. The clonal cultivars with the highest NPT, in decreasing order, were FA 13, followed by CP 49, PS 1319, SJ 02, and CCN 51. Studies show that NPT is strongly influenced by indirect factors, such as pod and seed weight, with variations in these interactions over time (Dessauw et al., 2024). Additionally, phytosanitary management directly affects the number of healthy pods (Dessauw et al., 2024). Despite significant differences among clones, some quantitative morpho-agronomic descriptors may not

differentiate consistently due to polygenic control (Bartley, 2005; Maharaj et al., 2019; Ngidi et al, 2024).

Dias & Resende (2001) identified pod index (PI), seed index (SI), number of seeds per pod (NSP), and number of pods per tree (NPT) as key traits for cocoa producers. The industry generally requires bean weights above 1 g (Ahnert et al., 2018), a criterion met by all clonal cultivars in this study (Table 2). DuVal et al. (2017) also reported a broad PI range across regions. Morpho-agronomic traits depend on factors such as cultivation systems, sunlight exposure, and agronomic management (Ahnert et al., 2018).

A heatmap was constructed from the correlation data (Figure 2), where darker colors (wine and violet) indicate higher values, and lighter colors (white) indicate lower values. The dendrogram indicated that PI is most similar to the NPT. Conversely, NSP was distantly related to SI and BWP, suggesting low similarity. However, NSP is clustered with PHT, PWi, EI, CF, HY, PI, and NPT. These variables exhibited inverse relationships among the clonal cultivars, consistent with the results in Table 2. Clonal cultivars with higher SI and lower PI, traits commercially desirable, showed lower values for NPT.



Bean length – BL; Bean width - BW; Wet seed weight per pod - SWP; Weight of 10 seeds with pulp - WSP10; Seed index - SI; Dry weight of 10 beans - DWB10; Dry bean weight per pod - BWP; Placenta weight - PW; Wet weight of 10 seeds - WWS10; Pulp yield - PY; Pod length - PL; Bean thickness - BT; Pod weight - PWe; Pod husk weight - PHW; Empty seeds per pod - ESP; Beans yield - BY; Number of pods per tree - NPT; Pod index - PI; Husk yield - HY; Conversion factor - CF; Efficiency index - EI; Pod width - PWi; Pod husk thickness - PHT; Usable seeds per pod - USP; Number of seeds per pod - NSP

Figure 2. Dendrogram with a heatmap of pod and seeds/beans morpho-agronomic characteristics of five cacao clonal cultivars – CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13 – in a farm field trial in southern Bahia, Brazil. The cluster analysis was based on Euclidean distance as a measure of similarity. The central part of the figure shows the heatmap, based on Pearson's correlation data, transformed into log(x) and logarithmic scale. The darker colors (red and violet) represent the highest values, while the lighter colors (yellow and white) represent the lowest values

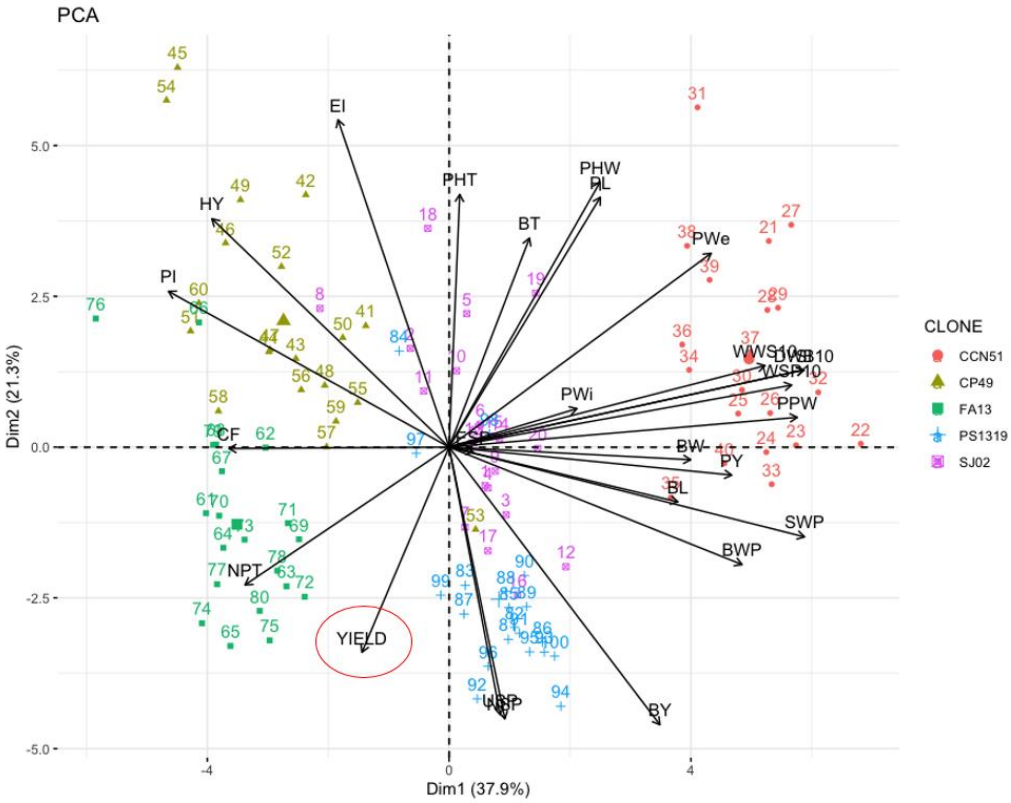
HY demonstrated greater similarity with CF and EI (Figure 2), reflecting characteristics that indicate pod yield in dry beans. SWP clustered with SI, suggesting these traits exhibit similar behavior among clonal cultivars. This pattern also holds for the other seed and bean weight traits.

FA 13 and CP 49 exhibited the highest similarity, as indicated by cluster analysis, and were categorized into Group I (Figure 2). They also recorded the lowest mean values for most traits, reflecting reduced biometric yields, seed/bean weight and size, such as BL, BW, SWP, SI, BWP, BY and PY. In contrast, SJ 02 and PS 1319 exhibited the highest similarity, being placed into Group II. Notably, although CCN 51 showed the highest similarity to SJ 02 and PS 1319, it maintained a greater distance from CP 49.

Correlation analysis among the clonal cultivars, illustrated by the comparative color scale (Figure 2), highlights the agronomic traits that stood out for each clonal cultivar. In Group II, only one variable was prominent: PY in SJ 02, which is directly related to cacao fermentation and thus impacts bean quality. In Group I, CP 49 exhibited the highest values for BT. In Group II, clone SJ 02 recorded the lowest ESP, while PS 1319 had the highest ESP and BY. Environmental factors such as water deficit and soil fertility also influence ESP (Sant'Ana et al., 2020). In Group I, FA 13 displayed the highest NPT and NSP. CCN 51 was notable for having the lowest PI, whereas CP 49 showed the worst PI, HY, CF and EI.

PCA analysis allowed us to understand the differentiation and associations of clonal cultivars in relation to pods and seed/beans traits (Figure 3). Furthermore, it facilitated the identification of variables that contributed significantly to yield. The first two principal components explained 59% of the total variation in the data. The first principal component (PC1) accounted for 38% of the variance, driven by FA 13, CCN 51, and CP 49, and influenced by traits such as NPT, PI, PWe, HY, and PPW. The second principal

component (PC2) explained 21% of the variance, primarily associated with YIELD, PL, PHT, PHW, and HY. The PCA revealed a positive correlation between YIELD and NPT. YIELD exhibited a strong correlation with FA 13, which was further associated with NPT and CF. On the other hand, YIELD had negative correlations with BT, PL, PHW, PHT, and PWe. CCN 51 demonstrated a strong association with seed weight traits, which correlated negatively with PI, CF, and HY, which in turn had a greater association with CP 49. PS 1319 and SJ 02 exhibited intermediate values, showing less variability and contributions to the data variation compared to the other clones. However, PS 1319 revealed a strong positive association with NSP, which in turn showed a strong negative correlation with EI clonal cultivars. Specifically, PS 1319 required 9.81 g of pod weight to produce 1 g of dry beans, showcasing its exceptional dry matter conversion efficiency and the discriminative capability of the pod efficiency index. Dias & Resende (2001) reported EI values of 13.0 and 15.1 g for cultivars from the Amelonado and Forastero Amazon racial groups, respectively. Additional information can be found in Supplementary Table 1.



YIELD; Pod length - PL ; Pod width - PWi; Pod husk thickness - PHT; Bean length - BL; Bean width - BW; Bean thickness - BT; Number of seeds per pod - NSP; Empty seeds per pod - ESP; Usable seeds per pod - USP; Pod weight - PWe; Pod husk weight per pod - PHW; Pod placenta weight - PPW; Wet seed weight per pod - SWP; Bean dry weight per pod - BWP; Weight of 10 seeds with pulp - WSP10; Wet weight of 10 seeds - WWS10; Dry weight of 10 beans - DWB10; Number of pods per tree - NPT; Conversion factor - CF; Seed index - SI; Efficiency index - EI; Pod index - PI; Pulp yield - PY; Husk yield - HY; Beans yield - BY

Figure 3. Principal component analysis (PCA) of morpho-agronomic traits of pods, seeds/beans, and yield of five cacao clonal cultivars – CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13 – in a farm field trial in southern Bahia, Brazil

Although cocoa bean weight is often underemphasized in breeding programs, it remains a critical trait due to its high heritability (Doaré et al., 2020). In the study by Doaré et al. (2020) in seven clonal cultivars, the average weight of a seed with pulp was 5.64 g for CCN 51. In the present study, the trait, labeled WWS10, exhibited values from 2.3 g for FA 13 to 4.3 g for CCN 51 (Table 2). However, WWS10 did not correlate with YIELD but was significantly associated with SI and BWP, and negatively correlated with

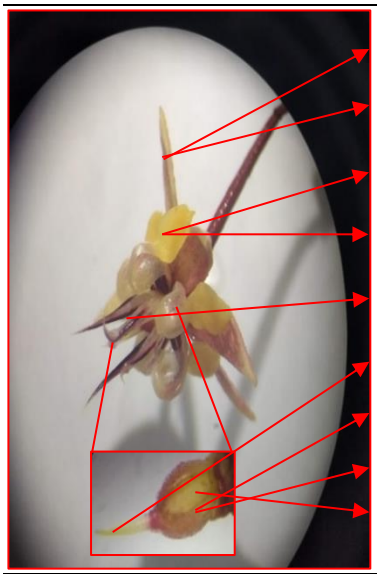
CF, NPT, and PI (Figure 3). Trinitario cacao cultivars also presented a significantly negative correlation between seed mass and seed number (Bekele et al., 2019). This variability may be influenced by genetic factors, pod position, and the fruiting cycle duration, affecting seed filling and weight (Doaré et al., 2020).

Based on the cluster analysis (Figure 2) and PCA (Figure 3), while PI exhibits greater similarity with NPT, a trait considered critical for selecting cacao cultivars (Dias & Resende, 2001), no significant correlation was observed between them. This suggests a deviation from typical selection methods, indicating an inverse relationship between SI and NPT (Figure 2). Additionally, YIELD showed a stronger correlation with NPT and NSP (Figure 3), which contrasts with the usual trend where higher pod production leads to fewer seeds due to internal competition for photoassimilates (Dias & Resende, 2001). The clustering of NPT with traits such as PI, HY, CF, EI, PWi, PHT, and NSP highlights alternative characteristics influencing bean yield (Table 2), with other traits also showing significant correlations with productivity (Figure 3). The findings imply that productivity is more strongly correlated with NPT and NSP, suggesting that PI is not the primary determinant of production. Guimarães et al. (2022) identified the highest significant correlations between the traits number of healthy pods with average seed weight per pod and average seed weight. Sodré & Nery (2023) similarly proposed considering the relationship between pod mass and cocoa beans, referred to as the efficiency index (EI), as a more appropriate indicator of cacao production. Studies have advanced in identifying QTLs (Quantitative Trait Loci), highlighting the genetic influence on production components. Candidate genes involved in various stages of pods development and seed filling have been identified (Fernandes et al., 2020).

The results of the morpho-agronomic traits of the flowers, analyzed using Tukey's test, revealed significant differences ($p < 0.05$) among the clones (Table 3). This indicates that

these characteristics may be useful for the identification and differentiation of clonal cultivars in the field.

Table 3. Averages of 10 morpho-agronomic traits of flowers of five cacao clonal cultivars – CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13 – in a farm field trial in southern Bahia, Brazil

Traits		CCN 51	PS 1319	SJ 02	CP 49	FA 13
	SL mm	9.10 b	8.80 bc	8.44 c	7.58 d	10.00 a
	SW mm	2.61 b	1.99 c	2.66 a	2.14 bc	2.42 ab
	PL mm	6.86 b	7.34 ab	7.56 a	7.30 ab	6.98 ab
	PW mm	2.34 bc	2.00 d	2.75 a	2.11 cd	2.54 ab
	SLe mm	7.62 a	7.58 a	8.18 a	7.58 a	7.76 a
	SLa mm	1.98 a	1.62 b	1.72 ab	1.98 a	1.70 b
	OL mm	1.88	1.80	1.70	1.80 a	1.90
	OW mm	1.00 a	0.98 a	0.90 b	1.00 a	1.00 a
	NO nº	54.75 a	48.30 c	51.15 b	46.70 c	50.35 b
	O:S %	83.47 b	84.40 b	80.40 b	80.60 b	89.57 a

Averages with letters in common are not significantly different according to the Tukey test ($p > 0.05$). Sepal length - SL; Sepal width - SW; Petal length - PL; Petal width - PW; Staminode length - SLe; Stigma length - SLa; Ovary length - OL; Ovary width - OW; Number of ovules - NO; Ovules:seeds - O:S

FA 13 exhibited the highest averages for most floral traits, particularly for O:S (Table 3), aligning with its superior performance in NSP, ESN, and USN, as shown in Table 2. SJ 02 also performed well, except for SL. CCN 51 recorded the highest averages for SLe, SLa, OL, OW, and NO. On the other hand, PS 1319 and CP 49 had the lowest averages for NO. No significant differences were observed in the SLe and OL length of stamens or ovary length among the clonal cultivars. Additional information can be found in Supplementary Table 2.

Cacao flowers are hermaphroditic and pentamerous, with petals, sepals, stamens, staminodes, and an ovary containing 30 to 70 ovules (Alvim, 1984). In this study, ovule numbers ranged from 46.7 (CP 49) to 54.74 (CCN 51) (Table 3). The number of ovules per ovary is genetically determined, with no environmental influence, varying by racial group and cultivar (Dias & Resende, 2001). FA 13 exhibited the highest O:S ratio among cultivars (Table 3). Factors other than fertilization and pollination intensity, such as physiological aspects, influence seed filling (Webber et al., 2020). Climate change also impacts the reproductive potential of cacao (García-Cruzatty et al., 2020). Thus, the number of seeds is not proportional to the ovule count, depending on the fertilization rate and pod development.

Cacao clonal cultivars flowers have similar colors, however with different tones for most characteristics, only the stigma did not show any difference (Table 4). However, the pendulum showed a greater difference between colors, CCN 51, PS 1319 and SJ 02 showed purple and green tones, while CP 49 and FA 13 displayed a greenish tone. Petal colors also varied, being yellow for CCN 51, PS 1319, and SJ 02, and a mix of yellow and purple for CP 49 and FA 13. Sepal colors were yellow and purple for CCN 51 and SJ 02 and yellow for CP 49, FA 13, and PS 1319.

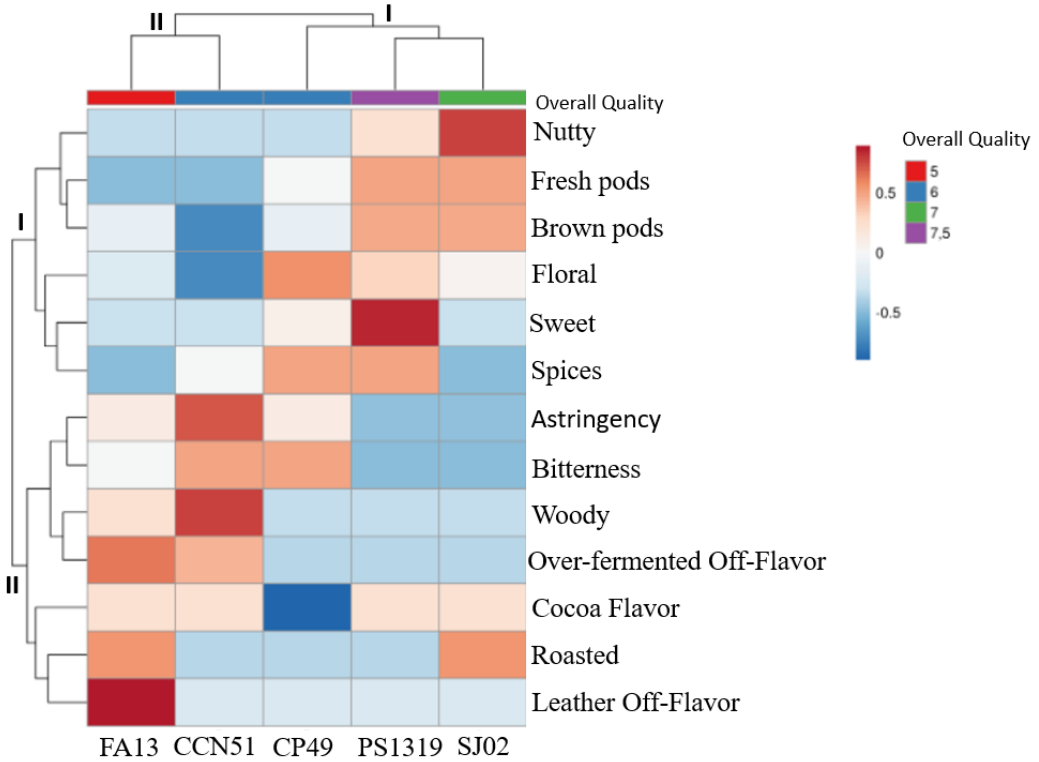
Table 4. Description of flower colors of five cacao clonal cultivars – CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13 – in a farm field trial in southern Bahia, Brazil, obtained using the Munsell color system

Traits	CCN 51	PS 1319	SJ 02	CP 49	FA 13
Pendulum	5 R 4/10; 2.5 GY 7/8; purple; green	5 R 4/8; 2.5 GY 8/6; purple; green	5R 4/10; 2.5 GY 8/6; purple; green	5 Y 7/8; greeny	5 Y 7/8; greeny
Petal	2.5Y 8/10; yellow	5Y 8/8; yellow	5Y 8/6; yellow	5Y 8/12; 5R 6/19; yellow; purple	5Y 8/12; 5R 6/19; yellow; purple

Sepal	2.5 Y 8/4; 5R 4/10; yellow; purple	2.5Y 8/4; yellow	5 Y 8/4; 5R 6/10; yellow; purple	5 Y 8/6; yellow	5 Y 8/6; yellow
Guide lines	5 R; 3/8; wine	5 R 3/12; wine	5R3/6; wine	5R 3/6; wine	5R 3/6; wine
Staminode	5 R 3/6; 2.5 Y (8/4); wine; yellow	5 R 3/4; 2.5 Y (8/4); wine; yellow	5R 3/2; 2.5 Y (8/4); wine; yellow	5R 3/4; 2.5 Y (8/4); wine; yellow	5R 3/4; 2.5 Y (8/4); wine; yellow
Stigma	2.5 Y 8/6; yellow	2.5 Y 8/6; yellow	2.5 Y 8/6; yellow	2.5 Y (8/6); yellow	2.5 Y (8/6); yellow

The results of this study on floral characteristics have practical implications for the identification of clones for cocoa producers and researchers (Table 3). Identifying the floral characteristics of cacao cultivars is useful when the trees are without pods (Table 4).

The heat map generated from the sensory evaluation data revealed distinct patterns in quality ratings (Figure 4). Warmer colors indicated higher scores, while cooler blue tones represented lower ratings. PS 1319 and SJ 02 exhibited superior quality and greater similarity, both clustered together with fruity, floral, and spicy flavors. PS 1319 had the sweetest flavor, while SJ 02 exhibited a cocoa beans flavor. Despite being in the same cluster, CP 49 had higher bitterness and less pronounced cocoa flavor. CCN 51 and FA 13 were the most similar, with lower sensory scores. CCN 51 was noted for its bitterness and astringency, while FA 13 received the lowest score due to over-fermentation and off-flavor characteristics. Other quality parameters, such as moisture content, mold, bean color, pH, titratable acidity, fat content and acetic acid concentration are also widely evaluated (Dzelagha et al., 2020).



The cluster analysis was based on Euclidean distance, providing a measure of similarity. The top section displays the similarity between the clonal cultivars, while the side shows the similarity between sensory characteristics. The top also includes a scale where the global quality scores ranged from 5 to 7.5. The central portion of the figure features the heatmap, derived from Pearson correlation data, transformed using log(x) and a logarithmic scale. Red colors represent strong positive correlations, while blue colors indicate strong negative correlations

Figure 4. Dendrogram and heatmap of sensory evaluation of five cacao clonal cultivars – CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49, and FA 13 – in a farm field trial in southern Bahia, Brazil

FA 13 exhibited higher productivity and excelled in various morpho-agronomic traits; however, it ranked lowest in quality (Figure 3), receiving the lowest overall score due to undesirable off-flavors, likely stemming from poor fermentation. Fuentes et al. (2015) and Reges et al. (2021) suggest that selection criteria such as SI should be considered for fermentation suitability, which aligns with this study's finding of FA 13's poor SI performance. The interaction between productivity and traits like BT, SI, and sensory characteristics suggests a trade-off between pod and seed quality and quantity. This raises

a key question for cocoa breeding: should productivity be prioritized over bean quality traits? More productive cultivars like FA 13 may exhibit inferior sensory qualities, a critical issue for the sustainability of the cocoa value chain, where bean quality directly influences market price.

However, Cuellar et al. (2023) argue that fermentation techniques have a greater impact on quality than SI. Further studies are needed to evaluate different processing methods tailored to specific cultivars. Research on CCN 51 showed that fermentation, more than drying, influences the production of desirable volatile compounds. Regular box fermentation for 4 days and natural sun drying for 5 days is recommended to enhance aroma precursors (Pallares-Pallares et al., 2016). A study on the influence of spontaneous fermentation and controlled laboratory processing using acetic and lactic acid reagents on the cocoa quality of FEAR 5 and CCN 51 revealed that controlled conditions enhance the perception of fine aromatic notes, such as fruity, nutty, and floral attributes, in chocolates made from both cultivars (Santander et al., 2021). Modifications and the adoption of non-conventional processing techniques are necessary to optimize the preservation and utilization of beneficial bioactive compounds in cocoa beans (Febrianto et al., 2021).

The growing market demand for both the quantity and quality of cocoa beans highlights the need for research aimed at improving productivity and bean attributes. Post-harvest and processing technologies remain key challenges in the cocoa production chain in Bahia (Ahnert & Eskes, 2018). Additionally, there is limited knowledge on the complex relationships between bean and pod husk biomass and soil-plant mineral nutrition, especially in understanding their multifaceted interactions (Quintino et al., 2020).

CONCLUSIONS

1. FA 13 exhibited the highest number of seeds per fruit and fruits per plant, positively correlated with productivity, despite the low performance in quality, size and weight of fruits and seeds. PS 1319 and SJ 02 showed good fruit production and superior pulp characteristics and sensory quality. These findings suggest that FA 13, PS 1319, and SJ 02 possess significant potential for cultivation and use in breeding programs aimed at improving productivity and quality traits.

2. CCN 51 demonstrated the highest pod and seed size and weight averages but had the lowest yield. CP 49 showed inferior morpho-agronomic performance compared to the other cultivars.

3. No association was found between pod index and seed index. Clones with more pods per tree showed negative correlations with pod and seed indices. Yield correlated positively with the number of pods per tree and seeds per pod but negatively with bean thickness, pod length, and husk weight. These findings indicate that traits beyond pod and seed indices are more relevant for yield estimation and selecting clones with superior agronomic and commercial potential.

Contribution of authors: Alane Paula Peixoto Pannain: Investigation, Formal analysis, conceptualization, Methodology, Research, Writing - Original Draft. Ivanildes Conceição dos Santos: Methodology, Resources, Writing - Review & Editing Gonçalo Santos Silva: Conceptualization, Methodology, Resources, Supervision, Writing - Review & Editing. Dario Ahnert: Conceptualization, Methodology, Resources, Supervision, Writing -

Review & Editing, Funding acquisition. Ronan Xavier Corrêa: Conceptualization, Methodology, Supervision, Writing - Review & Editing.

Supplementary documents: Supplementary Figure 1, Supplementary Table 1, Supplementary Table 2.

Conflict of Interest: The authors declare that there is no conflict of interest, financial or otherwise, that could have influenced the preparation or completion of this work.

Financing statement: The authors declare that no funding was received for this research.

Acknowledgments: RXC was the recipient of a research grant from Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq n. 315913/2023-1), and APPP was the recipient of a scholarship from Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES grant n. 0001).

Supplementary table 1. Principal components obtained from the correction of morphoagronomic characteristics and yield of clonal cultivars

	PC1	PC2	PC3
Eigenvalues	9.87	5.53	3.51
Variance (%)	37.94	21.26	13.48
Cumulative (%)	37.95	59.21	72.69
NPT	-0.54	-0.36	0.20
PI	-0.74	0.41	-0.45
YIELD	-0.23	-0.54	0.37
PL	0.40	0.66	0.37
PWi	0.34	0.10	0.47
PWe	0.69	0.51	0.46
PHT	0.03	0.67	0.46

PHW	0.40	0.70	0.55
HY	-0.62	0.60	0.36
PPW	0.92	0.08	-0.18
CCN51	4.96	1.46	0.93
CP49	-2.74	2.09	0.48
FA13	-3.51	-1.28	1.08
PS1319	0.83	-2.52	-2.35
SJ02	0.46	0.25	-0.13

YIELD; pod length - PL; pod width - PWi; Pod husk thickness -PHT; Pod weight - PWe; Pod husk weight per pod - PHW; Pod placenta weight - PPW); Number of pods per tree - NPT; Pod index - PI; Husk yield - HY

Supplementary table 2. Analysis of variance of 10 morphoagronomic characteristics of flowers clones

		Mean squares									
SV	DF	SL mm	SW mm	PL mm	PW mm	SLe mm	SLa mm	OL mm	OW mm	NO nº	O:S %
Clone	4	19.6*	2.1*	2.01*	2.2*	1.6*	0.7*	0.2	0.05*	187.3*	562.2*
Error	95	0.7	0.1	0.64	0.1	0.6	0.1	0.07	0	4.1	132.1
CV (%)		9.55	17.18	11.15	13.9	10.3	19.6	15.03	9.54	4	12.7

*Significant at 0.05 probability by F test; SV: sources of variation; DF: Degrees of freedom; CV (%): Coefficient of variation.Sepal length -SL; Sepal width - SW; Petal length - PL; Petal width - PW; Staminode length - SLe; Stigma length - SLa; Ovary length -OL; Ovary width - OW; Number of ovules - NO; Ovules:Seeds - O:S

LITERATURE CITED

Adenuga, O. O.; Adepoju, A. F.; Sobowale, I. O.; Olaniyi, O. O.; Areola, O. J.; Nyamkyume, T. F. Correlation and Path Coefficient Analyses of Yield in Cacao (*Theobroma cacao* L.). Journal of Botanical Research, v.4(3), p.1-8, 2022. https://doi.org/10.30564/jbr.v4i3.4694

Ahnert, D. Ideotype Breeding in Cocoa. In: Eskes, A. B.; Efron, Y.; End, M. J.; Bekele, F. Proceedings of the International Workshop on Cocoa Breeding for Farmers. San José: INGENIC and CATIE. 2009. Cap.5, p.157-167. Available on: https://www.incocoa.org/data/ingenic_workshop_5_proceedings_2006.pdf#page=169. Accessed on: Sept. 2024.

Ahnert, D.; Eskes, A. B. Developments in cacao breeding programmes in Africa and the Americas. In: Umaharan, P. Achieving sustainable cultivation of cocoa. London: Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge. 2018. Cap.5, 44p. https://doi.org/10.1201/9781351114547

Ahnert, D.; Melo, H. L.; Santos, F. F. J.; Lima, L. R.; Baligar, V. C. Melhoramento genético e produtividade do cacau no Brasil. In: Souza Junior, J. O. Cacau: cultivo, pesquisa e inovação. Ilhéus: Editus. 2018. Cap.5, p. 151-181.

Almeida, C. M. V. C; Dias, L. A. S.; Silva, A. P. Agronomic characterization of cacao accessions. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.44, n.4, p.368-373, 2009. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000400006

Almeida, A. A. F. D.; Valle, R. R. Ecophysiology of the cacao tree. Brazilian Journal of Plant Physiology, v.19, p.425-448, 2007. https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400011

Alexandre, R. S.; Chagas, K.; Marques, H. I. P.; Costa, P. R.; Cardoso Filho, J. Caracterização de frutos de clones de cacau na região litorânea do município de São Mateus, ES. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, v.19, p.785–790, 2015. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p785-790

Alvim, P. T. Cacao. In: Alvim, P. T.; Kozlowski, T. T. Ecophysiology of Tropical Crops. New York: Academic Ped. 1977. p.279–313

Araújo, M. S.; Chaves, S. F. S.; Pereira, G. R.; Guimarães, M. H.; Alves, A. K.; Dias, L. A. S.; Aguilar, M. A. Multi-trait selection for nutritional and physiological quality of cacao genotypes in irrigated and non-irrigated environments. Scientific Reports, v.14, 6368, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56556-7

Asante, P. A.; Rahn, E.; Zuidema, P. A.; Rozendaal, D. M.; van der Baan, M. E.; Läderach, P.; Anten, N. P. The cocoa yield gap in Ghana: A quantification and an analysis of factors that could narrow the gap. Agricultural Systems, v.201, 103473, 2022. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103473

Bartley, B. G. D. The genetic diversity of cacao and its utilization. Cambridge: CABI Publishing, 2005. 341p.

Bekele, F. L.; Bidaisee, G. G.; Singh, H.; Saravanakumar, D. Morphological characterisation and evaluation of cacao (*Theobroma cacao* L.) in Trinidad to facilitate utilisation of Trinitario cacao globally. Genetic Resources and Crop Evolution v.67, p.621–643, 2020. https://doi.org/10.1007/s10722-019-00793-7

Boza, E. J.; Motamayor, J. C.; Amores, F. M.; Cedeno-Amador, S.; Tondo, C. L.; Livingstone, D. S.; Gutiérrez, O. A. Genetic characterization of the cacao cultivar CCN 51: its impact and significance on global cacao improvement and production. Journal of the American Society for Horticultural Science, v.139(2), p.219-229, 2014. https://doi.org/10.21273/JASHS.139.2.219

CAOBISCO/ECA/FCC - Chocolate, Biscuits & Confectionery of Europe/European Cocoa Association/Federation of Cocoa Commerce. Cocoa Beans: Chocolate and Cocoa Industry Quality Requirements. Brussels, Belgium and London, UK. 2005. 109p.

Carr, M. K. V.; Lockwood, G. The water relations and irrigation requirements of cocoa (*Theobroma cacao* L.): A review. In Experimental Agriculture, v.47, 4, p.653–676, 2011. https://doi.org/10.1017/S0014479711000421

Carvalho, C. G. P. D.; Almeida, C. M. V. C. D.; Cruz, C. D.; Machado, P. F. R. Avaliação e seleção de híbridos de cacaueiro em Rondônia. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.36, p.1043-1051, 2001. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000800006

Chepote, R. E. Efeito do composto da casca do fruto de cacau no crescimento e produção do cacaueiro. Agrotrópica, v.15(1), p.1-8, 2003. Available on: < https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/ceplac/publicacoes/revista-agrotropica/revista-volumes/2000-a-2010/revista-agrotropica-vol-15-no-1-2003.pdf>. Accessed on: Set. 2024

Cilas, C.; Phillips-Mora, W.; Mata-Quirós, A.; Bastide, P.; Johnson, V.; Castillo-Fernándeza, J.; Dessauw, D. How many years of evaluation are needed to select new productive cocoa clones?. Agritrop, cirad, 608652, 2022. doi: 10.5281/zenodo.10208498

Cuellar M. L.; Rios M. E. L.; Pacheco G. K. Y.; Espinosa O. C. M. Evaluation of the physical and sensory quality of *Theobroma cacao* L. grain in response to processing processes in municipalities in northern Huila, Colombia. Journal of Agricultural and Environmental Research, v.15(1), p.137-156, 2023. https://doi.org/10.22490/21456453.6710

Delgado-Noboa, J.; Bernal, T.; Soler, J.; Peña, J. Á. Kinetic modeling of batch bioethanol production from CCN-51 Cocoa Mucilage. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, v.128, p.169-175, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.08.040

Dessauw, D.; Phillips-Mora, W.; Mata-Quirós, A.; Bastide, P.; Johnson, V.; Castillo-Fernández, J.; Cilas, C. Temporal behaviour of cacao clone production over 18 years. Agronomy for Sustainable Development, v.44(3), 34, 2024. https://doi.org/10.1007/s13593-024-00967-3

Dias, L. A. S; Kageyama, P. Y. Temporal stability of multivariate genetic divergence in cacao (*Theobroma cacao* L.) in Southern Bahia conditions. Euphytica, v.93. p.181-187, 1997. https://doi.org/10.1023/A:1002991915978

Dias, L. A. S; Resende, M. D. V. Selection strategies and methods. In: Dias L. A. S. Melhoramento genético do cacaueiro. Viçosa: Fundação de Apoio À Pesquisa, UFG. 2001. Cap.6, p.217-288.

Doaré, F.; Ribeyre, F.; Cilas, C. Genetic and environmental links between traits of cocoa beans and pods clarify the phenotyping processes to be implemented. Scientific Reports, v.10(1), 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-66969-9

DuVal, A.; Gezan, S. A.; Mustiga, G.; Stack, C.; Marelli, J. P.; Chaparro, J.; Livingstone, D.; Royaert, S.; Motamayor, J. C. Genetic parameters and the impact of off-types for *Theobroma cacao* L. In a breeding program in Brazil. Frontiers in Plant Science, v.8, 2017. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02059

Dzelagha, B. F.; Ngwa, N. M.; Nde Bup, D. A review of cocoa drying technologies and the effect on bean quality parameters. International journal of food science, 2020(1), 8830127. 2020. https://doi.org/10.1155/2020/8830127

Engels, J. M. M. The systematic description of cacao clones and its significance foor taxonomy anda plant breeding. Doctoral thesis. Wagningen: Agricultural University. 1986. 125p. Available on: <https://www.proquest.com/openview/cd30dbb014ef4e56288a84c2d761f672/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>. Accessed on: Set. 2024.

Escobar Ramírez, C. H.; Córdoba-Gaona, Óscar de J.; Correa Londoño, G. A.; Martínez Bustamante, E. G. Yield of cocoa under different agroforestry systems in a dry tropical forest in western Colombia. Bioagro, v.34(1), p.39-50, 2021. https://doi.org/10.51372/bioagro341.4

Ferreira D. F. Sisvar: a computer system for statistical analysis. Ciência e Agrotecnologia, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011. https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001

Fuentes Q. L. F.; Castelblanco G. S.; Jerez G. A., Guerrero M. N. Characterization of three cocoa harvest indices of clones CCN51, ICS60 and ICS 95, in the Santander mountain, Colombia. Journal of Agricultural and Environmental Research, v.6(1), p.252-265, 2015. Available on: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20163150882>. Accessed on: Set. 2024.

Galili T.; O'Callaghan A.; Sidi J.; Sievert C. Heatmaply: An R package for creating interactive cluster heatmaps for online publishing. Bioinformatics, v.34, n.9, p.1600-1602, 2018. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx657

García-Cruzatty, L.C.; Vera-Pinargote, L.; Zambrano-Gavilanes, F.; Zamora-Macías, A.; Cedeño-Ortega, J. Pollen production in *Theobroma cacao* L. genotypes national type

and CCN-51 and its relationship with climatic factors on the ecuadorian coast. Acta Agrobotanica, v.73(2), 2020. https://doi.org/10.5586/aa.7323

Georges, M. E.; Melo, C. A. F.; Souza, M. M. D.; Corrêa, R.X. Cacao genotypes cultivated in agroforestry systems in Bahia have wide genetic variability in morpho-agronomic characters. Ciência e Agrotecnologia, v.47, e004923, 2023. https://doi.org/10.1590/1413-7054202347004923

Guimarães, M. E. da S.; Dias, L. A. S.; Almeida, C. M. V. C. de; Souza, C. A. S.; Almeida, O. F.; Benjamin, C. S.; Dias, F. J. S.; Pereira, G. R.; Corrêa, T. R. Genetic evaluation and selection of cocoa tree clones. Ciência Rural, v.52, n.12, e20210433, 2022. http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210433.

Guirlanda, C. P.; da Silva, G. G.; Takahashi, J. A. Cocoa honey: Agro-industrial waste or underutilized cocoa by-product? In Future Foods, v.4, 2021. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100061

ICCO - International Cocoa Organization. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, v.L, nº 2, cocoa year 2023/24. Published: 31-05-2024, 2024. Available on: <https://www.icco.org/wp-content/uploads/Production_QBCS-L-No.-2.pdf>. Accessed on: Set. 2024.

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Cadeia produtiva do cacau no Espírito Santo. Vitória: Incaper. 2022, v.4, 168p. doi: 10.54682/livro.9788589274388

Febrianto, N. A.; Wang, S.; Zhu, F. Chemical and biological properties of cocoa beans affected by processing: a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, v.62(30), p.8403–8434, 2021. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1928597

Fernandes, L. D. S.; Correa, F. M.; Ingram, K. T.; de Almeida, A. A. F.; Royaert, S. QTL mapping and identification of SNP-haplotypes affecting yield components of *Theobroma cacao* L. Horticulture research, v.7, 2020. https://doi.org/10.1038/s41438-020-0250-3

Jaimes-Suárez Y. Y.; Carvajal-Rivera A. S.; Galvis-Neira D. A.; Carvalho F. E .L.; Rojas-Molina J. Cacao agroforestry systems beyond the stigmas: Biotic and abiotic stress

incidence impact. Frontiers in Plant Science. v.13, 921469. 2022. doi: 10.3389/fpls.2022.921469

Jaimez, R. E.; Barragan L.; Fernández-Niño M.; Wessjohann L.A.; Cedeño-Garcia G.; Sotomayor Cantos I.; Arteaga F. *Theobroma cacao* L. cultivar CCN 51: a comprehensive review on origin, genetics, sensory properties, production dynamics, and physiological aspects. PeerJ, v.10, e12676, 2022. https://doi.org/10.7717/peerj.12676

Herrmann, L.; Felbinger, C.; Haase, I.; Rudolph, B.; Biermann, B.; Fischer, M. Food fingerprinting: characterization of the Ecuadorean type CCN-51 of *Theobroma cacao* L. Using microsatellite markers. Journal of agricultural and food chemistry, v.63(18), p.4539-4544, 2015. doi: 10.1021/acs.jafc.5b01462

Kassambara, A. Visualization of a Correlation Matrix using 'ggplot2'. Package. 0.1.4.1.09-05 15:50:48 UTC, 2023. Available on: <http://www.sthda.com/english/wiki/ ggcorrplot-visualization-of-a-correlation-matrix-using-ggplot2>. Accessed on: Set. 2024.

Lahive, F.; Hadley, P.; Daymond, A. J. The physiological responses of cacao to the environment and the implications for climate change resilience. A review. Agronomy for Sustainable Development Dev. 39, 5, 2019. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0552-0

Lopes, U. V.; Reis Monteiro, W.; Pires, J. L.; Clement, D.; Yamada, M. M.; Gramacho, K. P. Plant breeding in Bahia, Brazil - strategies and results. In Crop Breeding and Applied Biotechnology, v.1, 2011. https://doi.org/10.1590/S1984-70332011000500011

Lopes, U. V; Pires, J. L; Gramacho, K. P; Grattapaglia, D. Genome-wide SNP genotyping as a simple and practical tool to accelerate the development of inbred lines in outbred tree species: An example in cacao (*Theobroma cacao* L.). PLoS ONE, v.17(10), e0270437, 2022. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270437

Macêdo, M., Rosa, E. S.; Luz, E. D. M. N.; Luis, J. Avaliação de clones de cacaueiro quanto a produtividade e incidência de vassoura de bruxa e podridão parda. Agrotrópica, v.33(1), p.5-16, 2021. doi: 10.21757/0103-3816.2021v33n1p5-16

Maharaj, K.; Bekele, F. L., Ramnath, D.; Sankar, R.; Bekele, I.; Bidaisee, G. G.; Maharaj, P.; Jennings, K. Selection of putative relic cacao (*Theobroma cacao* L.) genotypes in farmers' fields in Trinidad and Tobago. In Tropical Agriculture (Trinidad), v.96, Commemorative Issue 95 Years, 2019. https://doi.org/10.37234/TA96012019/0000960101

Munsell, A. H. On a scale of color-values and a new photometer. Technology Quarterly and Proceedings of the Society of Arts, 1905 v.18, 60p.

Moreira, L. F.; de Souza, P. A.; da Costa, F. B.; Vieira, J. N.; Ribeiro, W. S.; Braga, R. C.; da Silva Vieira, M. R. Caracterização físico-química da polpa de *Theobroma cacao* l. produzidos na mesorregião do Jaguaribe, Ceará, Brasil. Research, Society and Development, v.9(7), e175973743-e175973743, 2020. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.3743

Ngidi, A.; Shimelis, H.; Abady, S.; Chaplot, V.; Figlan, S. Genetic variation and association of yield, yield components, and carbon storage in sorghum (Sorghum bicolor [L.] Moench) genotypes. BMC Genomic Data, v.25(1), 74, 2024. https://doi.org/10.1186/s12863-024-01256-4

Nunes, C. S.; da Silva, M. L.; Camilloto, G. P., Machado, B. A.; Hodel, K. V.; Koblitz, M. G. B.; Uetanabaro, A. P. T. Potential applicability of cocoa pulp (*Theobroma cacao* L) as an adjunct for beer production. The Scientific World Journal, v.2020(1), 3192585, 2020. https://doi.org/10.1155/2020/3192585

Oksanen F. J.; Simpson G. L.; Blanchet F. G.; Kindt R.; Legendre P.; Minchin P. R., et al.. Vegan: Community Ecology Package. R package Version, v.2, p.4-3, 2017. Available at <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>. Accessed on: 01/07/2022.

Olatundun, E. A.; Borokini, O. O.; Betiku, E. Cocoa pod husk-plantain peel blend as a novel green heterogeneous catalyst for renewable and sustainable honne oil biodiesel synthesis: A case of biowastes-to-wealth. Renewable Energy, v.166, p.163-175, 2022. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.131

Oliva-Cruz M.; Goñas M.; Bobadilla L. G.; Rubio K. B.; Escobedo-Ocampo P.; García Rosero L. M.; Rojas Briceño N. B.; Maicelo-Quintana J. L. Genetic Groups of Fine-

Aroma Native Cacao Based on Morphological and Sensory Descriptors in Northeast Peru. Frontiers in Plant Science, v.13, 896332, 2022. doi: 10.3389/fpls.2022.896332

Pallares-Pallares, A.; Perea-Villamil, J. A.; López-Giraldo, L. J. Impacto de las condiciones de beneficio sobre los compuestos precursores de aroma en granos de cacao (Theobroma cacao L) del clon CCN-51Impacto das condições de processamento nos compostos precursores do aroma em grãos de cacau (*Theobroma cacao* L) do clone CCN-51. Respuestas, v.21(1), p.120–133, 2016. https://doi.org/10.22463/0122820X.726

Pokou, N. D.; Motamayor, J. C.; Schnell, R.; Eskes, A. B. Genetic diversity of outstanding cacao accessions (*Theobroma cacao* L.) from farmers' field in Côte d'Ivoire using SSR markers. International Journal of Plant and Animal Sciences, v.3, n.1, p.105-111, 2014. Available at: www.internationalscholarsjournals.org. Accessed on: 01/07/2024.

Quintino, R. de A.; Guilherme, A. H. de A. L.; Ahnert, D.; Escalona-Valdez, R. A.; Baligar, V. C. Interactions between soil, leaves and beans nutrient status and dry biomass of beans and pod husk of forastero cacao: An exploratory study. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.51(5), p.567-581, 2020. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729369

Ramos, A.; Sodré, G. A.; Leite, M. S. B. Irrigação em cacaueiros. In: Souza Junior, J. O. Cacau: cultivo, pesquisa e inovação. Ilhéus: Editus. 2018. Cap.14, p.437-460

Reges, B. M.; Maia, A. M.; Sarmento, D. H. A.; Silva, M. S.; Dos Santos, S. M. L.; Damaceno, M. N. Quality variables for technological application of cocoa clones from the brazilian semiarid region. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental, v.25(3), p.203–208, 2021. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n3p203-208

Sant'Ana, C. de S.; Pereira, I. de O.; Ferreira, A. C. R.; Silva, A. V.; Santos, L. S. Influência do período de colheita na qualidade do cacau da Indicação Geográfica Sul da Bahia. Brazilian Journal of Development, v.6(2), p.8295–8306, 2020. https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-221

Santander, M.; Vaillant, F.; Sinuco, D.; Rodríguez, J.; Escobar, S. Enhancement of fine flavour cocoa attributes under a controlled postharvest process. Food Research International, v.143, 110236, 2021. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110236

Santos, E.S.L.; Cerqueira-Silva, C.B.M.; Mori, G.M.; Ahnert D.; Mello. D. L. N; Pires, J.L.; Corrêa, R. X.; Souza, A. P. Genetic Structure and Molecular Diversity of Cacao Plants Established as Local Varieties for More than Two Centuries: The Genetic History of Cacao Plantations in Bahia, Brazil. PLoS ONE, v.10(12), e0145276, 2015. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145276

Santos, R. C.; Pires, J. L.; Correa, R. X. Morphological characterization of leaf, flower, fruit and seed traits among Brazilian *Theobroma* L. species. Genet Resour Crop Evol, v.59, p.327–345, 2012. https://doi.org/10.1007/s10722-011-9685-6

Silva, A. R.; Cecon, P. R.; Rêgo, E. R.; Nascimento, M. Evaluation of the experimental coefficient of variation of pepper traits. Revista Ceres, v.58, n.2, p.168-171, 2011. 2011. https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000200006

Silva Freitas, R. V.; da Silva, F. L. H.; de Assis Cavalcante, J.; de Souza Costa, I. I.; Sarmento, D. H. A.; Braga, R. C.; de Almeida Rodrigues, E. Avaliação da composição nutricional, caracterização e correlação dos parâmetros de qualidade da polpa do cacau. Research, Society and Development, v.11(3), e52511326677-e52511326677, 2022. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26677

Silveira, P. T. S.; Braga, A. V. U.; Brito, A. D. C. de; Tonin, I. P.; Martins, M. O. P.; Efraim P. L. W. T, v.210, 15, 116768, 2024. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116768

Sodré, G. A.; Nery, I. D. Relations between weight of pods and beans to estimate yield in cocoa farm. Agrotrópica, v.35(1), p.15-20,2023. DOI: 10.21757/0103-3816.2023v35n1p15-20

Souza Junior, J. O.; da Silveira, F. G. F.; da Silva Pereira, B. L.; Mateus-Rodríguez, J. F., Baligar, V. C.; Ahnert, D. Edaphic and physiographic attributes and death of cacao trees in drought years. Agronomy Journal, v.115(3), p.1069-1084, 2022. https://doi.org/10.1002/agj2.21215

Somarriba, E.; Peguero, F.; Cerda, R.; Orozco-Aguilar, L.; López-Sampson, A.; Leandro-Muñoz, M. E.; Sinclair, F. L. Rehabilitation and renovation of cocoa (*Theobroma cacao* L.) agroforestry systems. A review. Agronomy for Sustainable Development, v.41, 64, 2021. https://doi.org/10.1007/s13593-021-00717-9

Webber, S. M.; Garratt, M. P.; Lukac, M.; Bailey, A. P.; Huxley, T.; Potts, S. G. Quantifying crop pollinator-dependence and pollination deficits: The effects of experimental scale on yield and quality assessments. Agriculture, Ecosystems & Environment, v.304, 107106, 2020. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107106

CAPÍTULO 2

COMPONENTES DE PRODUÇÃO DE CULTIVARES CLONAIS DE CACAU SÃO INFLUENCIADOS POR IDADE PRODUTIVA, PERÍODO DE COLHEITA E SISTEMA DE CULTIVO

Alane Paula Peixoto Pannain[1,3]

Gonçalo Santos Silva[1,2]

Dario Ahnert[1,2]

Ronan Xavier Corrêa[1,3]

[1] Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, 45662-900 Ilhéus, Bahia, Brazil

[2] Centro de Inovação do Cacau, Ilhéus, Bahia, Brazil

[3] Centro de Biotecnologia e Genética, Departamento de Ciências Biológicas, UESC, Ilhéus, BA, Brasil

RESUMO

Os cacaueiros (*Theobroma cacao* L.) do sul da Bahia são cultivados à sombra da Mata Atlântica raleada, em sistema agroflorestal conhecido como cabruca. Cultivares clonais de cacau foram originados através de seleção realizada por agricultores a partir das plantas mais produtivas, resistentes à doença e adaptadas às condições edafoclimáticas. No entanto, há carência de estudos na avaliação desses clones locais em diferentes condições de cultivo e períodos de colheita. Neste estudo, os clones do sul da Bahia CP 49, FA 13, PS 1319 e SJ 02 foram avaliados juntamente com o clone equatoriano CCN 51. A pesquisa foi conduzida em áreas experimentais no sul da Bahia, investigando os sistemas de cultivo sombreado e sol pleno, nas safras principal e temporão, abrangendo idades produtivas do 5º ao 7º ano. Foram observadas diferenças significativas ($P < 0,05$) entre os clones para todas as 25 características morfoagronômicas analisadas. A análise de Componentes Principais (PCA) revelou que a produtividade (YIELD) está fortemente associada com o número de frutos por planta (NPT) e o com o clone FA 13. Todos os clones locais apresentaram maior NPT comparado ao CCN 51. Os clones PS 1319 e SJ 02 se destacaram pelo rendimento de sementes e polpa. Conforme padrões de similaridade e correlações do heatmap, o sistema de cultivo sombreado não apresentou variações na

produção de frutos em comparação com o sol pleno. A variação sazonal nos componentes de produção evidenciou a importância de considerar condições climáticas específicas e práticas de manejo adequadas para cada clone, visando otimizar seu desempenho ao longo das diferentes safras e idades produtivas. Diante dos desafios climáticos, socioeconômicos e produtivos existentes, a renovação de sistemas agroflorestais com clones de cacau produtivos e resistentes, precisa ser incentivada e implementada. Portanto, os clones do sul da Bahia avaliados possuem potencial para programas de melhoramento genético e produção de cacau na Bahia e em outras regiões produtoras de cacau no Brasil e no mundo.
Palavras-chave: Caracterização morfoagronômica; Safra; Sistema agroflorestal; Sol pleno; Cabruca.

ABSTRACT

Cacao trees (*Theobroma cacao* L.) in the south of Bahia are grown in the shade of the thinned Atlantic Forest, in an agroforestry system known as cabruca. Clonal cocoa cultivars were originated through selection by farmers from the most productive plants, resistant to disease and adapted to soil and climate conditions. However, there is a lack of studies evaluating these local clones under different growing conditions and harvest periods. In this study, the southern Bahia clones CP 49, FA 13, PS 1319 and SJ 02 were evaluated together with the Ecuadorian clone CCN 51. The research was conducted in experimental areas in the south of Bahia, investigating shaded and full sun cultivation systems, in the main and early harvests, covering productive ages from the 5th to the 7th year. Significant differences ($P < 0.05$) were observed between the clones for all 25 morpho-agronomic characteristics analyzed. Principal component analysis (PCA) revealed that yield (YIELD) was strongly associated with the number of fruits per plant (NPT) and with clone FA 13. All the local clones had higher NPT compared to CCN 51. The PS 1319 and SJ 02 clones stood out in terms of seed and pulp yield. According to the patterns of similarity and correlations in the heatmap, the shaded cultivation system showed no variations in fruit production compared to full sun. The seasonal variation in production components highlighted the importance of considering specific climatic conditions and appropriate management practices for each clone, in order to optimize its performance over the different harvests and production ages. Given the existing climatic, socio-economic and production challenges, the renewal of agroforestry systems with productive and resistant cocoa clones needs to be encouraged and implemented. Therefore, the southern Bahia clones evaluated have potential for genetic improvement programs and cocoa production in Bahia and other cocoa-producing regions in Brazil and the world.
Keywords: Morphoagronomic characterization; Crop; Agroforestry system; Full sun; Cabruca.

1. Introdução

O cacau, *Theobroma cacao* L., é uma planta originária da região tropical da América do Sul (Motamayor et al, 2002). Onde foi encontrado, Floresta Amazônica, a maior diversidade da espécie e os registros mais antigos de domesticação, datando de

cerca de 5.300 anos no sudeste do Equador (Zarrillo et al., 2018). Ganhou escala e importância econômica global após ser descobertos pelos europeus e usado como matéria prima para produção de chocolate (Chiapetti, 2018). Isso resultou em expansão agrícola, o cacau saiu da sua região de origem, que representa atualmente menos de 20% da produção mundial, concentrada principalmente no Equador (430 mil t) e Brasil (220 mil t) (ICCO, 2024). E foi para África Ocidental, onde possui maior volume de produção, responsável por mais de 70% das amêndoas de cacau produzidas no mundo, principalmente em Gana (501 mil t), Camarões (300 mil t), Nigéria (300 mil t) e Costa do Marfim (1,800 milhões t) (ICCO, 2024). Onde o cacau desempenha um papel crucial na geração de empregos, no fomento do desenvolvimento rural e sustentável de milhões de pequenos agricultores em países tropicais em desenvolvimento (Ahnert & Eskes, 2018; Lass & Wood, 1985).

Apesar da importância socioeconômica, bem como da crescente demanda do cacau em várias regiões do mundo, a produção sustentável enfrenta desafios relacionados à oferta (Guirlanda, Silva & Takahashi, 2021; Zhang & Motila, 2016) e volatilidade nos preços do mercado global (ICCO, 2024). Esses desafios estão ligados a questões como baixa produtividade das lavouras, ocasionada por envelhecimento das plantações, problemas fitossanitários, socioeconômicos, acesso limitado a tecnologias agrícolas modernas e mudanças climáticas (ICCO, 2020; Lopes et al., 2011; Chiapetti, 2018; Ahnert et al., 2018). A produção mundial total de cacau prevista em 2023/24 caiu para 4.461 toneladas, em comparação com a produção estimada de 5.047 toneladas em 2022/23 e 4.826 toneladas em 2021/22 (ICCO, 2024). A baixa produtividade das lavouras tem sido atribuída a mudanças climáticas e ao envelhecimento das plantações com práticas agrícolas inadequadas (Ahnert & Eskes 2018; Lopes et al. 2011). Tal cenário, diante da crescente demanda de cacau e baixa oferta (Zhang & Motilal, 2016; ICCO, 2024), resultou em flutuações acentuadas nos preços do cacau, atingindo níveis históricos superiores a US$ 10 mil por tonelada (ICCO, 2024).

São numerosos os desafios enfrentados que contribuem para o atual cenário de declínio na produção de cacau, tornando imperativa a concatenação de esforços para mitigar esse déficit. Uma estratégia para superar esse problema consiste na renovação de lavouras cacaueiras (Ahnert et al, 2018), a partir da utilização de cultivares clonais mais produtivas e resistentes a doenças, que possuam características desejáveis, como frutos maiores, baixo índice de fruto e peso de amêndoa maior que 1 g (Dias & Resende, 2001; Monteiro & Ahnert, 2012; Santos, Pires & Corrêa, 2012). No sul da Bahia, tradicional

região cacaueira do Brasil, são recomendadas cultivares clonais com características de frutos e sementes desejáveis à indústria e ao produtor, como também resistentes à vassoura-de-bruxa, doença causada pelo fungo *Moniliophthora perniciosa* (Lopes et al., 2011; Ahnert et al, 2018). Os clones CCN 51, PS 1319, SJ 02, FA 13 e CP 49, vêm sendo recomendados para renovação de lavouras cacaueiras (Pereira & Valle. 2012).

O clone CCN 51 foi desenvolvido no Equador, como resultado de programas de melhoramento (Motamayor et al, 2014; Boza et al, 2014). Ele é conhecido por sua alta produtividade, resistência a doenças e adaptabilidade a diversas condições edafoclimáticas e, por isso, é amplamente cultivado em diferentes países, como Equador, Colômbia, Brasil e Peru (Jaimes et al. 2022; Motamayor et al, 2014; Ahnert et al, 2018). Estudos revelam que a comparação das características agronômicas entre o CCN 51 e diversas cultivares indicam diferenças significativas no peso da amêndoa seca do cacau, no potencial de produção e na eficiência de produção (Motamayor et al, 2014; Ahnert et al, 2018; Alexandre, 2015; Macêdo et al, 2021; Boza et al, 2014). Devido ao notável desempenho do CCN 51 de produção, resistência e adaptabilidade ao monocultivo a pleno sol, que tem sido amplamente utilizado por agricultores no sul da Bahia e no Espírito Santo (Macêdo et al, 2021; Incaper, 2022). Essa expansão do uso do CCN 51 tem ocasionado uma redução da diversidade genética nas fazendas dos produtores (Incaper, 2022). No entanto, existem clones locais com excelente potencial produtivo e qualidade sensorial superiores ao CCN 51 (Ahnert e Eskes, 2018).

No sul da Bahia, o cacau é predominantemente cultivado sob a sombra da Mata Atlântica, em um sistema agroflorestal conhecido como cabruca. Contudo, a diversificação da sombra no cultivo está ameaçada por uma crescente tendência de intensificação da produção (Vaast & Somarriba, 2014). A transição gradual da cabruca para monoculturas de cacau a pleno sol e os impactos das mudanças climáticas ainda carecem de mais avaliação (Heming et al., 2022). A remoção de árvores de sombra reduz a capacidade dos pequenos produtores de se adaptarem às pressões globais, como o aumento populacional, a insegurança alimentar, a volatilidade dos preços do cacau e as mudanças climáticas (Vaast & Somarriba, 2014). Portanto, é fundamental explorar estratégias para aumentar a produtividade em terras já utilizadas, a fim de atender à crescente demanda por cacau, evitando o desmatamento e a expansão para áreas ambientalmente conservadas (Asante et al., 2022).

O conhecimento dos componentes de produção de clones brasileiros comparados com o clone CCN 51, cultivar internacional como referência é um importante parâmetro.

Além disso, devido o comportamento das cultivares clonais serem influenciados, além da genética, pelo ambiente e manejo, existe a necessidade avaliá-los e compará-los nas condições edafoclimáticas desejadas, como forma de validação, seleção e identificação dos clones mais promissores para utilização agronômica e comercial (Ahnert & Eskes 2018). Nesse sentido, ainda há poucos estudos publicados, baseados em campo, e de valor prático sobre as respostas dos componentes de produção de clones do sul da Bahia de cacau, analisados em diferentes idades produtivas, safras e sistemas de cultivo. O uso dessas informações pode auxiliar os produtores na escolha de materiais genéticos, que consiste na primeira etapa para o estabelecimento dos plantios clonais de cacaueiro (Sodré, Magno & Monteiro, 2017). Em relação aos fatores genéticos, uma vez selecionada uma cultivar que possua características desejáveis relativas à qualidade, precocidade, produtividade, maior índice de semente, menor índice de fruto e adaptação às condições locais, as chances de sucesso com o cultivo são maiores (Ahnert & Eskes, 2018).

As características morfoagronômicas evidenciam expressões fenotípicas e identificam distâncias entre genótipos e fatores (Dias & Resende, 2001; Loureiro, 2014; DuVal et al., 2017). A análise dessas características melhora os atributos agronômicos das espécies cultivadas (Santos, Pires & Corrêa, 2012; Dias & Resende, 2001). A avaliação dos componentes de produção abrange diversos aspectos, como rendimento de frutos e amêndoas (Lopes et al, 2022; Dias & Resende, 2001). Avaliar os componentes de produção em diferentes condições de cultivo é essencial para maximizar a compreensão sobre a produtividade e sustentabilidade. Além disso, é crucial compreender a variabilidade dos clones e sua resposta às diferentes condições ambientais e de manejo (Duvall et al., 2017; Monteiro & Ahnert, 2012). A análise de diferentes períodos de colheita permite avaliar a variabilidade sazonal e o desempenho dos clones de cacau ao longo do tempo (Dias & Kageyama, 1997; Sant'Ana et al., 2020). A integração de dados usando análise múltiplas de interação entre os clones e fatores visa orientar a seleção de clones de maior interesse. Além disso, a compreensão da variabilidade dos clones e suas respostas às condições ambientais permite otimizar o planejamento das práticas de manejo adequadas e sustentáveis para cada clone e local de cultivo (DuVal et al., 2017; Monteiro & Ahnert, 2012; Lopes et al, 2011; Ahnert et al, 2018; Ahnert & Eskes, 2018).

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo investigar as interações e respostas da variação dos componentes de produção em diferentes idades produtivas, períodos de colheita e sistemas de cultivo de clones locais de cacau PS 1319, SJ 02, CP

49 e FA 13, comparadas com o cultivar clonal internacional CCN 51, em fazendas no sul da Bahia.

2. Materiais e métodos

2.1 Material Genético e Desenho Experimental

Foram analisadas 25 características morfoagronômicas de frutos e sementes de cinco cultivares clonais autocompatíveis CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49 e FA 13 (Tabela 1), produtivos e resistentes à doença vassoura-de-bruxa. Foram coletados os dados de produção mensalmente dos frutos sadios (número de frutos por planta: F/PL). Além disso, foram coletados 20 frutos sadios e maduros por clone para caracterização morfoagronômica.

Tabela 1. Identificação do fruto, origem, grupo genético e principais atributos agronômicos dos cinco clones de cacau avaliados

Cultivar Clonal	Origem e **Genitores**	Grupo Genético	Principais Atributos Agronômicos	Referências
CCN 51	Colección Castro Naranjal – Equador **(IMC67 x ICS95) x Canelo**	Amelonado, Criollo e Iquitos	Autocompatível; Médio porte; Arquitetura de copa ereta e uniforme; Elevada produtividade; Precocidade mediana; Frutos roxos, com rugosidade mediana; Plantio recomendado em larga escala; Produção máxima 1,2 kg/planta; Adapta-se em todas as topografias; Resistência à vassoura de bruxa e podridão parda; Suscetibilidade à murcha de *Ceratocystis.*	Boza *et al.* (2014); Ahnert *et al.* (2018); Arévalo *et al*. (2012); Sodré *et al*. (2017); Pereira & Valle (2012); Jaimez *et al.* (2022).
CP 49	CEPEC - CEPLAC - Ilhéus - Bahia – Brasil **(TSH 565 X CEPEC 11) X CCN 51**	Amelonado, Contamana, Criollo, Iquitos	Autocompatível; Médio porte; Arquitetura de copa uniforme; Precocidade mediana; Plantio recomendado em larga escala; Produção máxima 1,2 kg/planta; Frutos grandes com rugosidade mediana; Adapta-se em todas as topografias; Tolerância a alagamento.	Lopes *et al.* (2011); Sodré (2017) Arévalo *et al*. (2012); Pereira & Valle (2012).
FA 13	Fazenda Angola - Itajuípe - Bahia, Brasil **Seleção massal em fazenda**	Linhagem desconhecida	Autocompatível Porte médio e arquitetura ereta; Alta precocidade; Plantio recomendado em pequena escala; Produção máxima de 1.6 kg/planta; Proporção de colheita na safra principal 0,33 e temporão 0,67; Resistência à vassoura de bruxa e podridão parda; Suscetibilidade moderada à murcha de *Ceratocystis*	Lopes *et al.* (2011); Silva *et al.* (2012); Ahnert *et al.* (2018); Macêdo *et al.* (2021) Arévalo *et al*. (2012); Sodré *et al*. (2017); Pereira & Valle (2012).

 PS 1319	Fazenda Porto Seguro - Ilhéus - Bahia – Brasil **Seleção F2 de uma população de híbridos**	Linhagem desconhecida	Autocompatível; Médio porte e arquitetura ereta; Alta precocidade, com frutos vermelhos arroxeados e médios; Elevada precocidade e produtividade; Plantio recomendado em larga escala. Produção máxima de 0,9 kg/planta; Proporção de colheita na safra principal 0,43 e temporão 0,57; Recomendado para uso como porta-enxerto; Boa adaptação encostas e terrenos altos com sombreamento ralo; Resistência à vassoura de bruxa, podridão parda e murcha de *Ceratocystis*	Silva *et al.* (2012); Sodré (2017); Ahnert *et al.* (2018); Arévalo *et al*. (2012); Pereira & Valle (2012); Monteiro & Ahnert (2012).
 SJ 02	Fazenda São José - Itajuípe - Bahia- Brasil **Seleção massal em fazenda**	Linhagem desconhecida	Autocompatível; Grande porte; Plantio recomendado em larga escala; Produção máxima de 1.2 kg/planta; Proporção da colheita na safra principal 0,47 e temporão 0,53; Adapta-se bem em todas as topografias; Resistência à vassoura de bruxa e podridão parda; Suscetibilidade à murcha de *Ceratocystis.*	Lopes *et al.* (2011); Silva *et al.* (2012); Ahnert *et al.* (2018) Arévalo et al. (2012) Sodré et al. (2017) Pereira & Valle (2012)

Fonte: Adaptado de Porto (2014).

As coletas de dados foram realizadas em 04 áreas experimentais no sul da Bahia, implementadas em fazendas e localizadas nos municípios de Teolândia, Ubatã, Ilhéus e Una, intituladas respectivamente: FT1, FT2, FT3 e FT4 (Figura 1). Cada área experimental possui 50 plantas por cultivar, com espaçamento de 3 x 3 m entre cacaueiros em quincôncio, sendo 2,6 m entre linhas simples, com área total de 0,3 hectares. Informações detalhadas sobre preparo do solo, manejo da fertilidade e tratos culturais das FTs estão descritas em Porto (2024).

As áreas experimentais caracterizam-se por distintos sistemas de produção, FT1 e FT2 possuem sistema de monocultivo a sol pleno, enquanto FT3 e FT4 possuem sistema agroflorestal sombreado. Os sistemas de cultivo foram considerados como um vetor de efeito aleatório da repetição de duas áreas experimentais. As áreas experimentais do sistema de cultivo sol pleno tiveram precipitação média de 926, 1400 e 1460 mm, correspondente aos anos de 2019 a 2021. Adicionalmente, as áreas do sistema de cultivo sombreado, tiveram precipitação média 1125, 1700 e 1800 mm para 2019, 2020 e 2021 respectivamente (Porto, 2024). Devido o regime pluviométrico durante o ano ser um fator responsável pelas diferenças dos padrões dos componentes de produção (Muller & Valle,

2012). A disponibilidade de água no ano anterior não afetou a produção dos anos de coleta de dados do presente estudo.

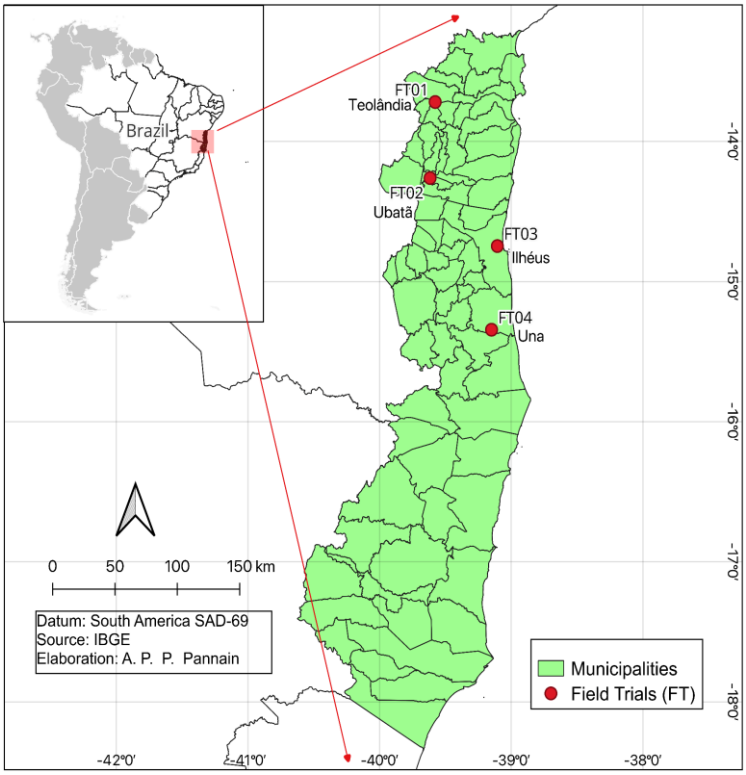


Figura 1. Localização das áreas experimentais (FT, *field trials*) nos municípios do sul da Bahia, Brasil.
Fonte: elaboração própria a partir de dados do IBGE (2024).

Os clones foram considerados como vetores que contemplam todas as medições de 20 frutos nas repetições de locais, os quais compreendem duas áreas para cada sistema de cultivo. O grande número de repetições foi adotado com intuito de diminuir e ajustar simultaneamente os efeitos aleatórios e suas interações. As coletas foram repetidas por três anos, 2020, 2021 e 2022, com as respectivas idades produtivas das plantas de cinco, seis e sete anos. Além disso, houve duas coletas por ano, nas safras principal e temporão, com intuito de avaliar o efeito do período de colheita. Na Bahia, o ano agrícola cacaueiro vai de abril a março e, a produção é dividida em dois períodos distintos: safra temporão, de abril a agosto, e safra principal, de setembro a março (Almeida & Valle, 2007).

2.2 Caracterização morfoagronômica de frutos, sementes e amêndoas

O processamento dos frutos foi realizado no laboratório da agroindústria da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). Os parâmetros biométricos dos frutos

foram mensurados até o quinto dia após a colheita. Foram utilizados balança semianalítica, paquímetro e régua. Foram aferidas as seguintes características morfoagronômicas: número de frutos por planta (F/PL), peso do fruto (PF), comprimento do fruto (CF), largura do fruto (LF), espessura da casca (EC), peso da casca (PC), peso da placenta (PP), peso de 10 sementes úmidas com polpa por fruto (PSU10), peso de 10 sementes sem polpa (PSP10), a polpa foi retirada com tecido de algodão e peneira com malha de 2 mm, número de sementes por fruto (NS), número de sementes chochas (NSC), número de sementes viáveis (NSV).

As sementes foram fermentadas por cinco dias, em caixas de isopor de 5 L com furos para o escoamento do mel de cacau. As sementes foram depositadas no isopor e cobertas com pano de algodão por 48 h até alcançar 32 °C, fase de fermentação anaeróbica. Posteriormente as amêndoas foram revolvidas a cada 24 h, por três dias, fase de fermentação aeróbica, em que ocorreu produção de ácido acético e temperatura acima de 40 °C, com a decorrente morte do embrião e transformação das sementes em amêndoas. Posteriormente, as amêndoas foram secas em estufa solar por 10 dias, e após a secagem, foram aferidas as seguintes características morfoagronômicas: peso de 10 amêndoas (PA10), espessura das amêndoas (EA), comprimento das amêndoas (CA) e largura das amêndoas (LA).

Após a obtenção dos parâmetros morfoagronômicos foram calculadas as seguintes variáveis: rendimento de polpa (RP) — diferença de peso entre PSU10 e PSP10, em porcentagem; rendimento de semente (RS) — quantidade de sementes por fruto, em porcentagem; rendimento de casca (RC) — quantidade de casca por fruto, em porcentagem; índice de semente (IS) — peso de 1 amêndoa seca, obtido através do PA10; fator de conversão (FC) — proporção do peso de PSU10, que resultam em PA10; peso de sementes secas por fruto (PA) — variável que estima o quanto 1 fruto gera de peso de amêndoa, obtido através do PS multiplicado pelo FC; índice de eficiência (IE) — variável que relaciona o peso do fruto ao peso da semente seca; índice de fruto (IF) índice de fruto (IF) obtido através da Eq. 1. A produtividade foi obtida em (kg/ha/ano), definida através da Eq. 2:

$$\mathrm{IF} = 1000\mathrm{g} \div (\mathrm{NSV} \times \mathrm{IS}) \qquad (1)$$

Em que:

IF - índice de fruto (nº);

NSV - número de semente viáveis (nº); e,

IS - índice de semente (g).

$$\text{YIELD} = \left(\frac{\text{F}}{\text{PL}} \div \text{IF}\right) \times 1000 \qquad (2)$$

Em que:

F/PL - número de frutos por planta (nº);

IF - índice de fruto (nº/kg); e

1000 plantas/ha.

2.3 Análise estatística

O modelo estatístico do presente estudo considerou os genótipos com um grande número de caracteres, sob o efeito da idade das plantas do quinto ao sétimo ano, em dois períodos de colheitas, safra principal e safra temporão, bem como em diferentes sistemas de cultivo, sombreado e a sol pleno (Viana & Resende, 2014):

$$Yascg = m + Ia + Ls + Sc + Cg + ICag + LCsg + SCcg + ILSscg + e$$

Em que m é o efeito da média geral, I é o efeito da idade da planta sob o efeito dos anos a, L é fator do local sob o efeito aleatório dos sistemas de plantio s, o fator S é o efeito da safra sob efeito do período de colheita das safras c, o fator C é efeito do genótipo g do cultivar clonal. Em relação às interações, ag é o efeito das idades produtivas dos genótipos; sg é um vetor de efeitos das interações correspondentes à combinação de sistema de plantio (s) e clones (g); cg é o vetor de efeitos aleatórios de interação colheita x genótipo; scg é o vetor de efeito aleatório da interação tripla entre fatores idades x sistemas x safras; e é o efeito aleatório residual.

Todos os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), teste F a 0,01 de significância. As médias foram agrupadas pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade, utilizando o programa SISVAR (Ferreira, 2011). Os dados sforam submetidos à análise de componentes principais, *principal component analysis* (PCA), correlacionados com a produtividade, e calculados usando o pacote factoextra (Kassambara, 2020). A análise de agrupamento (cluster), baseou-se na distância Euclidiana, com medida de similaridade, e foi calculada através do pacote Vegan (Oksanen, 2017). A análise de correlação entre os clones e as variáveis foram calculadas através do pacote Heatmaply (Galili, 2018). A

análise multivariada por meio de dendrogramas com mapas de calor (heatmap) foi utilizada para identificar padrões de similaridade e correlações. Os dados foram normalizados e submetidos a uma análise de agrupamento com base na distância euclidiana, utilizando a medida de similaridade. Essa ferramenta mostrou a similaridade entre indivíduos, sendo uma medida de associação entre dois objetos baseada nas variáveis de agrupamento. A proximidade entre cada par de objetos foi determinada pelas medidas de distância, a qual foi convertida em uma medida de similaridade pelo uso de uma relação inversa, em que as menores distâncias ou diferenças representaram maior similaridade.

3. Resultados

Componentes de produção dos clones em diferentes idades, safras e sistemas de cultivo

Todas as características mofoagronômicas analisadas dos clones, nas diferentes idades produtivas, safras e sistemas de cultivo apresentaram diferenças significativas a 0,05 de probabilidade, pelo teste F, pela ANOVA (Tabela 2). Além disso, houve efeito significativo nas interações simples, entre os pares dos fatores para a maioria das características analisadas, entre clones x idade produtiva, clones x sistemas de cultivo e clones x safras. Apenas a característica HY não apresentou diferença entre clones e idades, as características PWi, SWP, C, HY e BY, não apresentaram diferença significativa entre clones e sistemas, bem como PHT, NSP, USP, BW, EI e HY, não houve efeito entre clones e safras (Tabela 2).

A análise tripla mostrou diferença significativa na interação dos fatores, para maioria das características analisadas na idade x sistema x safra (Tabela 2). Todavia, as características que não obtiveram efeito foram número de sementes, NSP, ESP e USP, bem como EI e HY. As características que apresentaram menor dispersão dos dados com coeficientes de variação abaixo de 10% foram PL, PWi, BL, BW, DWB10 e SI, a maioria apresentou CV médio e duas características apresentaram o CV acima de 100%, ESP e NPT, o que indica maior heterogeneidade nos dados destas duas características.

Tabela 2. Análise de variância e das características morfoagronômicas analisadas

	Mean Square									
	CLONE	SYSTEM	CROP	YEAR	CLONE * SYSTEM	CLONE*CROP	CLONE*YEAR	YEAR*SYSTEM*CROP	Resíduo	
GL	4	1	1	2	4	4	8	2	2379	
Característica									MEAN	CV
PL	347435	6765	47654	11590	1473	2269	1128	6375	206	8
PWi	5333	1076	2034	3357	74ns	226	234	267	95	7
PHT	1186	1413	835	436	81	9ns	14	36	18	13
BL	658	14	116	83	9	12	8	16	25	6
BW	413	22	10	23	3	3	2	3	12	6
BT	300	11	15	13	8	4	10	14	8	13
NSP	3850	2470	1248	1611	214	135ns	329	192ns	42	21
ESP	363	115	488	64	10	164	26	2ns	1	166
USP	5365	3655	3299	2117	236	144ns	469	149ns	41	22
PWe	4304972	1388454	1785454	1958468	70044	141696	67545	330538	744	20
PHW	2973897	2226071	1987345	1275858	50840	75639	53967	148146	577	21
PPW	20088	1209	1079	2515	149	300	282	280	19	32
SWP	467995	108812	22673	17092	2412ns	14067	14649	34327	144	25
BWP	51189	16784	6867	5482	669	239ns	658	2898	55	24
WSP10	21676	1265	5619	3479	83	541	528	787	35	16
WWS10	6597	143	582	6530	58	369	149	225	25	13
DWB10	2046	198	25	44	17	16	25	55	13	7
NPT	199749	12785	384258	80547	10545	22736	4653	44278	46	103
CF	0	0.0ns	1	0	0.0ns	0	0	0	0	18
SI	21	2	0	0	0	0	0	1	1	7
EI	3125	3185	71ns	1705	175	26ns	99	46ns	15	33
PI	7575	3453	1714	1530	394	154	317	554	21	32
PY	4051	896	9407	10450	430	339	561	331	28	27
HY	9152	4991	2119	2217	22ns	176ns	391ns	350ns	79	19
BY	5543	5670	2935	207	9ns	71	167	116	20	24

ns It has no significance at 0.05 probability by the F test; CV (%): Coefficient of variation. Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY).

Os clones de cacau apresentaram diferenças significativas em todas as características morfoagronômicas avaliadas nos sistemas de cultivo (pleno sol e sombreado) (Tabela 3), nas safras (temporão e principal) (Tabela 4) e nas idades produtivas (do 5º ao 7º ano) (Tabela 5). A maioria das características apresentou interações complexas entre os clones e os sistemas de cultivo, exceto para PWi, BW, ESN, PHW, WSP10, WWS10, DWB10, SI e HY (Tabela 3). Da mesma forma, foram observadas interações complexas entre os clones nos diferentes períodos de colheita,

exceto para PWi, BW, BT, PHW, BWP, DWB10 e SI. Em relação às idades produtivas, as classificações de superioridade dos clones variaram conforme a característica avaliada, exceto para BW, PHW, DWB10 e SI, que não apresentaram interações complexas. Essas quatro características (BW, PHW, DWB10 e SI) mantiveram valores constantes entre os clones, independentemente dos sistemas de cultivo, das safras e das idades produtivas, indicando maior estabilidade e menor influência desses fatores.

O clone CCN 51 apresentou médias de NPT variando de 16,9 na safra temporão a 46,6 na safra principal (Tabela 4). Para o clone CP 49, o valor de NPT variou de 37,1 no 5º ano a 47,0 no 6º ano (Tabela 5). O PS 1319 apresentou valores próximos aos do CP 49, com NPT variando de 32,0 no 5º ano a 49,2 no 6º ano (Tabela 5). O clone SJ 02 exibiu NPT variando de 26,3 na safra temporão a 53,8 na safra principal (Tabela 4). O clone FA 13, por sua vez, apresentou as maiores médias de NPT, fortemente influenciadas pelo período de colheita, variando de 60,3 na safra temporão a 81,6 frutos por planta na safra principal (Tabela 4). Esses resultados indicam que os clones do sul da Bahia superaram o CCN 51 na produção de frutos. Além disso, o período de colheita demonstrou ser o fator de maior influência na variação da produção de frutos, com exceção dos clones PS 1319 e CP 49, que apresentaram maior variação em função da idade produtiva, sugerindo uma menor estabilidade desses clones.

No entanto, para os componentes de produção PI, SI, BWP, PWe e BW, o clone CCN 51 apresentou as maiores médias em comparação aos demais clones, independentemente dos sistemas de cultivo (Tabela 3), das safras (Tabela 4) e das idades produtivas (Tabela 5).

O clone PS 1319 obteve as maiores médias em comparação aos demais clones para PHT e HY. Por outro lado, o clone CP 49 apresentou a menor média para HY em relação aos outros clones, independentemente dos sistemas de cultivo (Tabela 3), das safras (Tabela 4) e das idades produtivas (Tabela 5).

Tabela 3. Médias dos resultados das características morfoagronômicas de frutos e sementes dos clones analisados nos sistemas de cultivo, sol pleno e sombreado

	SHADE					SUN				
	CCN 51	CP 49	FA 13	PS 1319	SJ 02	CCN 51	CP 49	FA 13	PS 1319	SJ 02
PL mm	233.6 a	228.6 a	168.8 d	185.5 c	202.4 b	237.7 a	227.7 b	176.5 d	186.0 c	207.7 c

PWi mm	99.5	a	92.5	b	92.4	b	93.2	b	92.5	b	101.8	a	93.9	b	93.6	b	93.4	b	94.1	b
PHT mm	18.7	c	18.7	c	17.8	b	15.5	a	17.8	b	19.5	bc	21.0	d	20.3	cd	16.1	a	19.2	b
BL mm	25.4	a	23.3	b	23.8	c	25.4	a	25.7	a	25.2	b	23.1	c	23.3	c	25.6	ab	25.7	a
BW mm	13.8	a	11.6	d	11.4	d	13.0	b	12.5	c	13.4	a	11.4	d	11.5	d	12.8	b	12.2	c
BT mm	8.6	a	8.9	a	6.8	d	7.7	c	8.3	b	9.1	a	8.8	b	7.2	e	7.7	d	8.1	c
NSP nº	46.3	a	40.3	b	46.1	a	42.1	b	41.7	b	43.6	ab	36.4	d	44.2	a	41.5	bc	40.8	c
ESN nº	0.7	a	1.3	b	0.3	a	2.1	c	0.4	a	1.0	a	2.0	b	0.5	a	2.8	c	0.6	a
USN nº	45.6	a	39.1	b	45.8	a	40.0	b	41.4	b	42.6	a	34.4	c	43.7	a	38.6	b	40.1	b
PWe g	843.0	a	768.2	c	596.0	d	676.6	c	715.2	c	909.8	a	802.3	b	664.8	c	689.2	c	773.4	b
PHW g	616.2	a	626.5	a	463.6	c	482.8	c	541.9	b	695.0	a	684.7	a	536.9	c	509.5	c	609.6	b
PPW g	22.8	b	15.5	c	10.0	d	25.6	a	15.5	c	26.2	a	16.8	b	10.8	c	26.2	a	16.5	b
SWP g	194.8	a	121.8	d	119.6	d	164.6	b	151.2	c	180.0	a	102.2	c	111.4	c	150.0	b	141.1	b
BWP g	74.0	a	49.4	c	48.4	c	57.6	b	58.7	b	68.2	a	40.4	d	45.7	c	52.8	b	54.6	b
WSP10 g	43.1	a	30.8	d	26.3	e	40.3	b	37.3	c	42.3	a	29.3	d	25.9	e	37.7	b	35.5	c
WWS10 g	29.7	a	23.1	d	19.8	e	27.9	b	25.5	c	28.7	a	22.0	d	20.2	e	27.1	b	25.6	c
DWB10 g	16.2	a	12.4	c	10.5	d	14.0	b	14.2	b	15.7	a	11.4	c	10.5	d	13.2	b	13.6	b
CF	0.4	b	0.4	a	0.4	ab	0.4	c	0.4	b	0.4	ab	0.4	ab	0.4	a	0.4	c	0.4	b
PY %	30.6	a	24.5	b	24.6	b	30.3	a	31.2	a	31.0	a	25.1	c	24.0	c	27.4	b	27.7	b
SI g	1.6	a	1.2	c	1.1	d	1.4	b	1.4	b	1.6	a	1.1	c	1.1	d	1.3	b	1.4	b
PI nº	14.3	a	22.8	c	22.0	c	18.9	b	18.4	b	15.7	a	28.3	d	23.4	c	21.3	b	19.6	b
EI g	12.1	a	16.9	b	13.1	a	12.2	a	13.2	a	14.0	ab	21.3	c	15.3	b	13.5	a	14.9	b
HY %	74.1	ab	83.3	d	79.0	c	71.9	a	76.9	bc	77.7	ab	86.2	d	81.6	c	74.7	a	79.3	bc
BY %	23.5	a	16.1	c	20.5	b	24.8	a	21.6	b	20.3	b	13.0	e	17.1	c	22.1	a	18.6	d
NPT nº	32.4	b	38.8	ab	70.0	a	39.9	ab	33.5	b	26.5	c	45.0	ab	72.0	a	45.9	ab	46.6	ab

Averages with letters in common are not significantly different according to the Tukey test ($p > 0.05$. Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF);

Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY).

Tabela 4. Médias dos resultados das características morfoagronômicas de frutos e sementes dos clones analisados nas safras, temporão e principal

	MAIN					MINOR				
	CCN 51	CP 49	FA 13	PS 1319	SJ 02	CCN 51	CP 49	FA 13	PS 1319	SJ 02
PL mm	239.6 a	236.4 a	175.6 d	190.2 c	207.9 c	231.8 a	220.0 b	169.6 d	181.4 c	202.2 b
PWi mm	100.5 a	93.9 b	94.1 b	94.8 b	94.8 b	100.8 a	92.5 b	92.0 b	91.8 b	91.9 b
PHT mm	19.7 b	20.5 c	19.4 b	16.5 a	19.1 b	18.5 bc	19.2 c	18.6 bc	15.0 a	17.9 b
BL mm	25.3 b	23.4 c	23.6 c	25.8 a	26.1 a	25.2 a	23.0 d	23.4 c	25.1 a	25.2 a
BW mm	13.6 a	11.4 d	11.3 d	12.9 b	12.1 c	13.6 a	11.6 d	11.5 d	12.8 b	12.5 c
BT mm	8.8 a	8.7 a	6.9 d	7.4 c	8.1 b	8.8 a	8.8 a	7.0 d	7.9 c	8.2 b
NSP nº	45.2 a	39.2 c	46.7 a	42.1 b	41.8 b	44.7 a	37.5 d	43.6 ab	41.5 bc	40.6 c
ESN nº	0.7 ab	1.1 c	0.4 a	1.0 c	0.4 a	1.0 b	2.2 c	0.4 a	3.9 d	0.6 ab
USN nº	44.5 a	38.1 c	46.3 a	41.0 b	41.5 b	43.6 a	35.3 c	43.2 a	37.6 c	40.0 b
PWe g	877.6 a	824.2 b	648.6 d	719.7 c	785.7 b	875.2 a	746.5 b	612.2 c	646.2 c	702.9 b
PHW g	668.2 c	690.4 c	519.0 a	531.3 a	618.3 b	643.1 c	620.8 c	481.5 a	461.0 a	533.2 b
PPW g	23.0 b	15.8 c	8.9 d	26.1 a	15.8 c	26.0 a	16.5 b	11.9 c	25.6 a	16.2 b
SWP g	175.1 a	113.3 d	112.9 d	157.7 b	144.0 c	199.7 a	110.7 c	117.9 c	157.0 b	148.3 b
BWP g	71.9 a	46.6 c	48.2 c	57.8 b	58.6 b	70.2 a	43.1 c	45.8 c	52.4 b	54.6 b
WSP10 g	39.3 a	29.0 c	24.7 d	38.3 a	35.1 b	46.0 a	31.1 d	27.4 e	39.6 b	46.1 c
WWS10 g	27.2 a	22.8 c	19.4 d	27.4 a	25.4 b	31.1 a	22.2 d	20.5 e	27.6 b	25.6 c
DWB10 g	15.9 a	11.9 c	10.4 d	13.9 b	14.1 b	15.9 a	11.9 c	10.6 d	13.1 b	13.6 b
CF	0.4 a	0.4 ab	0.4 a	0.4 c	0.4 b	0.4 bc	0.4 a	0.4 a	0.3 d	0.4 b
PY %	29.3 a	21.4 b	22.4 b	27.7 a	27.4 a	32.2 a	28.1 cd	26.2 d	30.0 bc	31.0 ab
SI g	1.5 a	1.2 c	1.0 d	1.4 b	1.4 b	1.6 a	1.2 c	1.1 d	1.3 b	1.4 b
PI nº	14.8 a	24.4 d	21.8 c	18.4 b	18.3 b	15.0 a	26.6 d	23.4 c	21.7 c	19.6 b
EI g	12.9 a	19.5 c	14.2 ab	12.9 a	14.4 b	13.1 a	18.6 b	14.1 a	12.8 a	13.7 a

HY %	77.3	ab	84.7	d	80.9	c	74.5	a	79.5	c	74.4	ab	84.7	d	79.7	c	72.1	a	76.6	bc
BY %	20.3	b	13.9	d	17.9	c	22.2	a	18.7	c	23.4	a	15.1	d	19.6	c	24.7	a	21.4	b
NPT nº	46.6	b	43.0	b	81.6	a	48.5	ab	53.8	ab	16.9	b	40.8	ab	60.3	a	37.3	ab	26.3	b

Averages with letters in common are not significantly different according to the Tukey test ($p > 0.05$. Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY).

Tabela 5. Médias dos resultados das características morfoagronômicas de frutos e sementes dos clones analisados ao longo das idades produtivas, do 5º ao 7º ano

	5º ano					6º ano					7º ano				
	CCN 51	CP 49	FA 13	PS 1319	SJ 02	CCN 51	CP 49	FA 13	PS 1319	SJ 02	CCN 51	CP 49	FA 13	PS 1319	SJ 02
PL mm	238.7 a	230.4 a	173.4 d	188.8 c	206.2 b	230.3 a	219.6 b	171.1 e	182.1 d	202.3 c	238.1 a	234.6 a	173.5 d	186.4 c	206.7 b
PWi mm	102.1 a	95.2 b	92.1 c	94.6 b	93.6 bc	98.9 a	89.5 d	92.1 b	90.4 c	91.1 c	101.0 a	95.0 b	95.0 b	95.1 b	95.3 b
PHT mm	19.7 b	21.1 c	19.4 b	16.3 a	19.2 b	18.4 bc	18.9 c	18.3 bc	15.0 a	17.9 b	19.1 bc	19.5 c	19.2 bc	16.0 a	18.5 b
BL mm	25.0 a	23.2 b	23.3 b	24.9 a	25.2 a	25.2 a	23.2 b	23.3 b	25.4 a	25.7 a	25.6 a	23.2 d	23.9 c	26.1 ab	26.2 a
BW mm	13.8 a	11.6 d	11.5 d	13.0 b	12.3 c	13.3 a	11.4 d	11.3 d	12.6 b	12.2 c	13.8 a	11.4 d	11.6 d	13.0 b	12.6 c
BT mm	9.2 a	9.2 a	6.9 d	7.6 c	8.4 b	8.6 a	8.4 ab	7.1 d	7.9 c	8.1 bc	8.8 a	8.9 a	6.8 d	7.4 c	8.1 b
NSP nº	43.3 a	35.2 c	44.6 a	42.2 ab	39.9 b	45.7 a	37.6 c	45.1 a	40.6 b	41.0 b	45.8 a	42.2 b	45.8 a	42.4 b	42.8 b
ESN nº	0.9 a	1.9 b	0.4 a	2.1 b	0.5 a	1.0 a	2.1 b	0.4 a	3.4 c	0.4 a	0.7 a	0.9 a	0.4 a	1.9 b	0.5 a
USN nº	42.3 ab	33.4 d	44.2 a	40.1 bc	39.4 c	44.7 a	35.5 b	44.7 a	37.3 b	40.7 a	45.2 a	41.3 b	45.4 a	40.6 b	42.3 b
PWe g	928.5 a	832.8 b	656.7 d	712.6 c	756.1 c	813.3 a	699.4 b	596.8 c	627.9 c	697.8 b	887.5 a	823.7 b	637.7 d	708.3 c	779.0 b
PHW g	684.9 c	709.4 c	516.2 a	512.2 a	580.7 b	601.3 c	586.3 c	472.1 a	455.3 a	537.8 b	680.5 c	671.1 c	512.5 a	521.0 a	608.7 b
PPW g	27.4 a	16.6 b	28.6 c	28.6 a	17.0 b	22.6 a	13.4 b	9.5 c	23.1 a	14.9 b	23.6 a	18.5 c	9.9 d	25.9 a	16.2 a
SWP g	199.1 a	107.1 d	120.0 d	162.9 b	145.6 c	186.5 a	99.1 d	114.2 c	147.8 b	144.2 b	176.5 a	129.8 c	112.2 d	161.1 b	148.5 b
BWP g	70.0 a	41.4 c	45.3 c	54.5 b	53.3 b	70.3 a	43.3 d	48.5 c	52.2 bc	56.1 b	72.8 a	50.1 c	47.2 c	58.8 b	60.6 b
WSP10 g	47.7 a	31.8 d	28.2 c	40.2 b	38.2 b	41.3 a	27.0 c	25.4 c	37.6 b	35.3 b	39.0 a	31.3 c	24.8 d	39.2 a	35.6 b
WWS10 g	33.4 a	24.9 c	23.5 c	29.9 b	28.8 b	27.0 a	19.8 d	18.0 e	25.0 b	23.1 c	27.0 a	22.9 c	18.5 d	27.6 a	24.7 b

DWB10 g	16.5	a	12.1	c	10.5	d	13.3	b	13.6	b	15.4	a	11.6	c	10.7	d	13.2	b	13.6	b	15.9	a	12.0	c	10.3	d	14.2	b	14.4	b
CF	0.4	cd	0.4	a	0.4	ab	0.3	d	0.4	bc	0.4	b	0.4	a	0.4	a	0.4	c	0.4	b	0.4	a	0.4	d	0.4	ab	0.4	c	0.4	bc
PY %	29.3	a	22.6	b	19.6	c	24.8	b	23.9	b	34.4	a	25.7	c	28.7	b	33.1	a	34.4	a	28.7	a	26.0	b	24.7	b	28.7	a	30.0	a
SI g	1.7	a	1.2	c	1.0	d	1.3	b	1.4	b	1.5	a	1.2	c	1.1	d	1.3	b	1.4	b	1.6	a	1.2	c	1.0	d	1.4	b	1.4	b
PI nº	15.1	a	28.2	d	23.1	c	19.8	b	20.5	b	15.4	a	26.6	d	22.6	c	22.4	c	19.1	b	14.5	a	22.0	c	22.3	c	18.2	b	17.4	b
EI g	14.3	ab	22.2	c	15.5	b	13.7	a	15.8	b	12.1	a	17.3	b	12.9	a	12.5	a	12.9	a	12.7	ab	17.7	c	14.1	b	12.3	a	13.3	ab
HY %	77.3	ab	89.2	d	81.7	b	74.2	a	79.3	b	73.8	a	83.6	c	79.1	bc	72.4	a	77.0	ab	76.6	ab	81.4	c	80.2	bc	73.4	a	78.0	abc
BY %	22.5	a	13.5	c	19.3	b	23.7	a	20.3	b	23.1	a	14.4	c	19.2	b	23.6	a	20.8	b	20.0	b	15.9	d	17.8	c	23.0	a	19.3	bc
NPT nº	23.4	c	37.1	b	60.8	a	32.0	bc	27.4	bc	29.8	c	47.0	b	78.9	a	49.2	b	48.9	b	35.3	b	41.6	b	73.3	a	47.6	b	44.0	b

Averages with letters in common are not significantly different according to the Tukey test ($p > 0.05$. Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY).

A análise de componentes principais (PCA) redimensionou as variáveis relacionadas aos componentes de produção e facilitou a identificação das que contribuíram significativamente para as interações entre clones e fatores (Figura 3). A PCA diferenciou os componentes de produção e os fatores mais fortemente associados à produtividade, condensando os 25 componentes de produção em dois componentes principais, que explicaram 74% da variabilidade total dos dados. O primeiro componente principal (PC1), responsável por 49,1% da variância, foi influenciado pelo clone CP 49 no 5º ano, no sistema a pleno sol e na safra principal, com associação às variáveis EI e HY. O clone PS 1319, nos 6º e 7º anos, no sistema sombreado e na safra temporão, foi fortemente associado a um maior número de sementes/amêndoas e rendimento de amêndoas. O PC1 também revelou que YIELD apresentou uma associação positiva com NPT e NPS, e uma associação negativa significativa com PL, BT, PHW e PWe.

O segundo componente principal (PC2), que explicou 24,9% da variância, teve maior contribuição do clone FA 13, que, independentemente das interações com safra, idade produtiva e sistema de cultivo, apresentou uma associação positiva significativa com NPT (Figura 3). O clone CCN 51, no 5º ano e na safra temporã, exibiu os maiores valores de peso e tamanho de sementes e amêndoas. O clone CP 49, no 6º ano, apresentou forte associação com PI. A variável com menor contribuição para a variação dos dados foi ESN. SJ 02, assim como seus respectivos fatores, apresentou contribuições intermediárias, sendo menos relevantes para a variação dos dados em comparação aos demais clones.

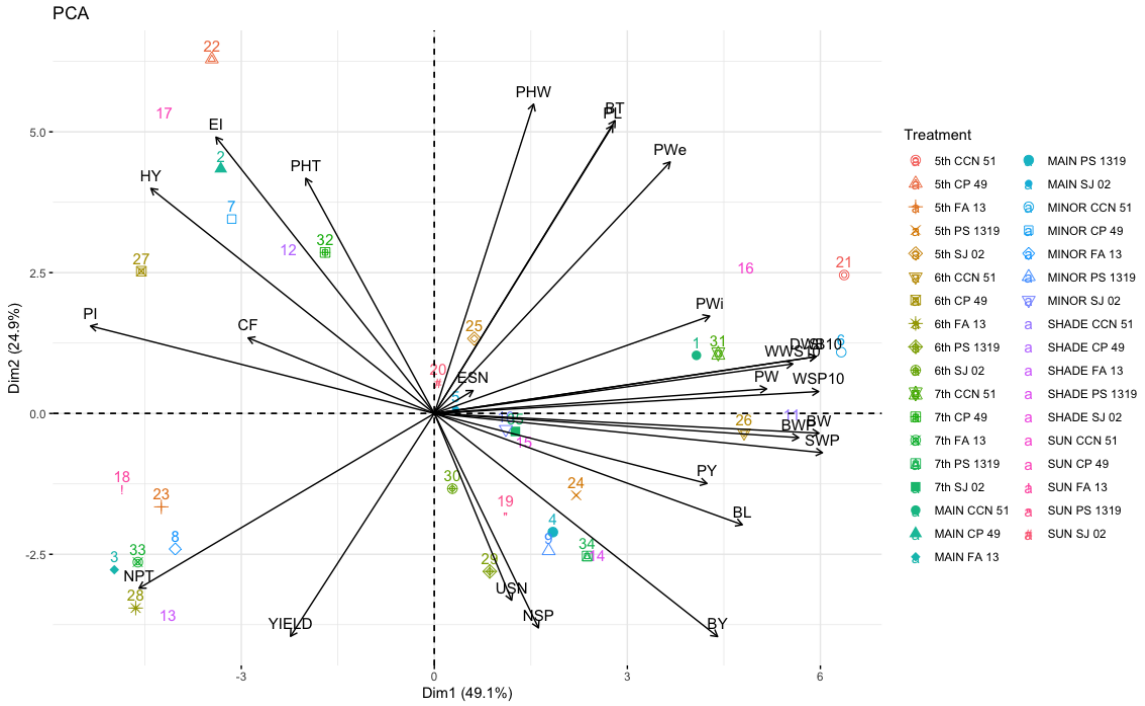


Figura 3. Análise de componentes principais (PCA) dos clones de cacau, componentes de produção e produtividade. Os dois principais componentes (PC1 e PC2) explicaram 74% da variação total.

YIELD; Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY).

O dendrograma resultante da análise de agrupamento mostrou a formação de dois principais clusters distintos, representando os clones de cacau nas safras principal e temporão (Figura 4). Dentro de cada cluster, observou-se subgrupos que refletem diferentes perfis morfoagronômicos de frutos e sementes. As cores vermelhas indicaram correlações fortes positivas, enquanto as cores mais claras indicam correlações fortes negativas. Observou-se que as correlações mais positivas foram das características BL, PY e ESN. Evidenciaram padrões consistentes de maior BL para o SJ 02 na safra principal, maior PY do clone SJ02 na safra temporão e aumento acentuado do ESN do PS 1319 na safra temporão. Uma correlação negativa foi observada para o PI, o CCN 51 na safra principal apresentou o menor índice de fruto em relação à safra temporão, bem como aos demais clones.

O Cluster I incluiu os clones CCN 51, PS 1319 e SJ 02, nas duas safras, os quais compartilharam características morfoagronômicas semelhantes, tais como, menores PI, EI, PHT e HY, que por consequência também possuem maior SWP, BY e SI (Figura 4). Em relação aos padrões entre as safras principal e temporão, foram observadas variações nas características morfoagronômicas dos frutos e sementes dos clones. Alguns clones mantiveram padrões consistentes entre as safras, no entanto o clone PS 1319 apresentou variações significativas para as características de PHT, SWP, PW, ESN, PY e BY. O PS 1319 na safra principal ficou agrupado em subgrupo distinto do mesmo na safra temporão e, apresentou maior similaridade com o clone SJ 02 na safra temporão.

O Cluster II agrupou os clones CP 49 e FA 13, em que subdividiram sem influência das safras (Figura 4). Padrões de similaridade foram observados para os dois clones por terem apresentado maior fator de correlação com PI, EI, HY, SI e SWP. Destacou-se o FA13 por apresentar os maiores USP e NPT, que por sua vez tais características apresentaram maior similaridade.

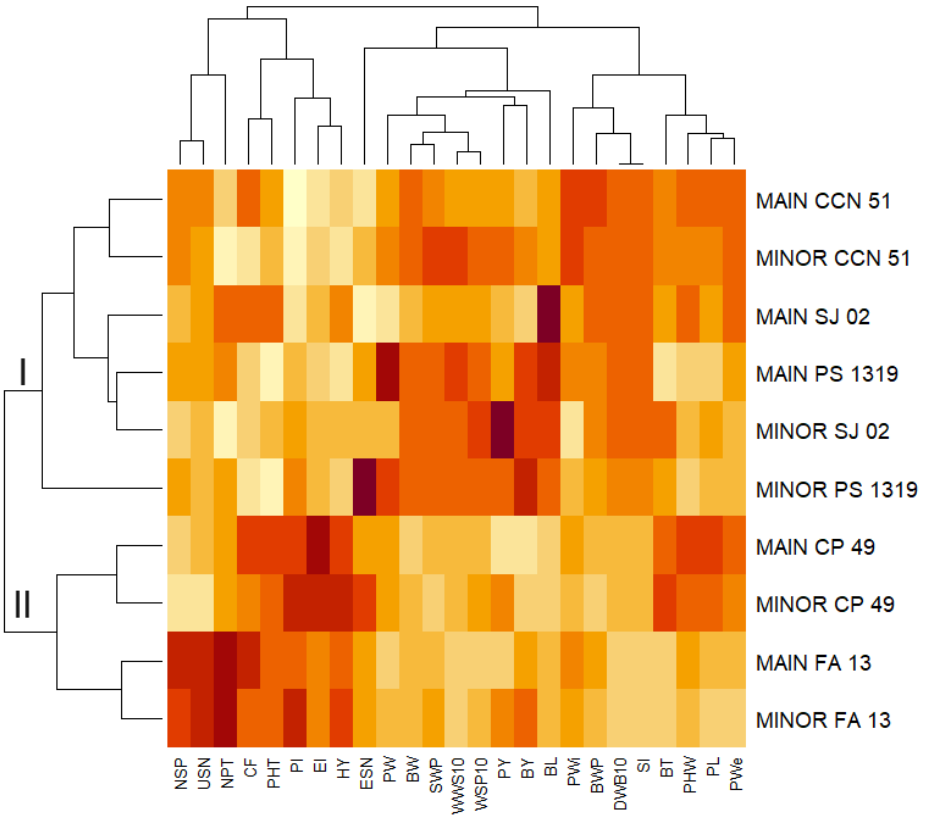


Figura 4. Dendrograma com mapa de calor (heatmap) dos clones de cacau nas safras principal e temporão, e características morfoagronômicas dos frutos e sementes (2020 a 2022). A análise de agrupamento (cluster), baseou-se na distância Euclidiana, com medida de similaridade. A parte central da figura apresenta-se o mapa de calor, a partir dos dados de correlação de Pearson, transformados em escala logarítmica. As cores vermelhas representam correlação forte positiva, enquanto as cores claras, representam correlação forte negativa.

Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY).

Os mesmos padrões de similaridade foram observados nas divisões dos grupos do sistemas de cultivo (Figura 5) em relação à safra (Figura 4). A análise hierárquica de agrupamento resultou na formação de clusters que refletem a similaridade entre os clones nos diferentes sistemas de cultivo sombreado e sol pleno, com base nas características morfoagronômicas dos frutos e sementes (Figura 5).

O Cluster I agrupou os clones CCN 51, SJ 02 e PS 1319, bem como dividiu os clones em subgrupos em relação aos sistemas de cultivo, os quais compartilham

características morfoagronômicas semelhantes, por sua vez, o Cluster II agrupou o CP 14 e FA 13. Com base nas similaridades apresentadas dos clones nos sistemas em relação às características, o mapa de calor gerou quadrantes de correlações positivas e negativas. As características que apresentaram maior similaridade foram NSP, USN, NPT, PI, EI, HY, PHT, e CF, as quais obtiveram correlação forte negativa com o Cluster I e forte positiva com o Cluster II. Tais características possuem maior interesse agronômico pois são características que revelam o potencial de rendimento e produção de amêndoas de cacau.

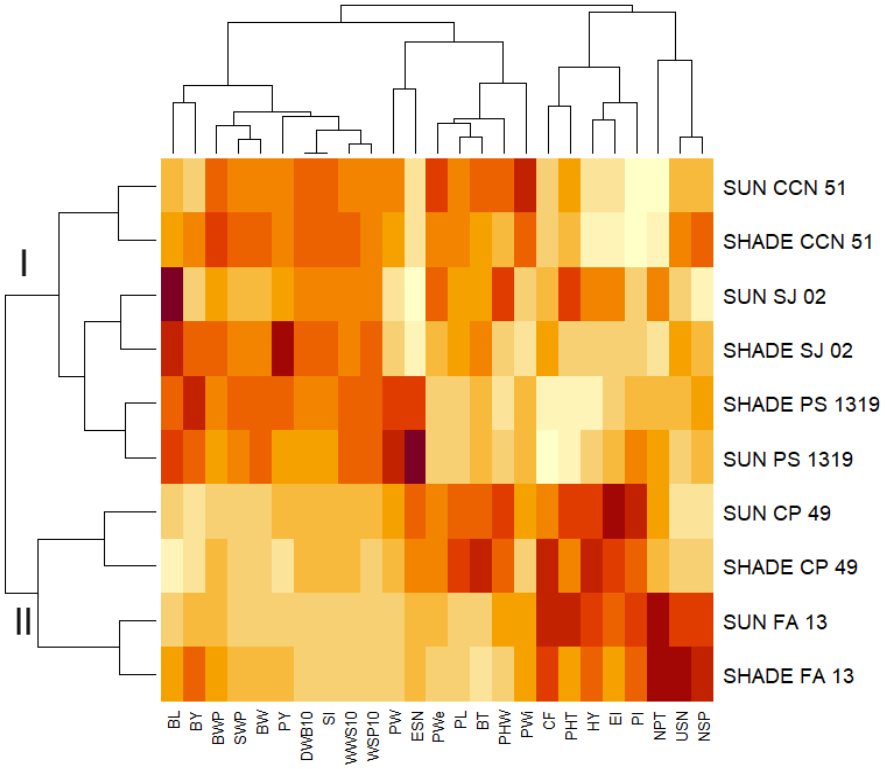


Figura 5. Dendrograma com mapa de calor (heatmap) dos clones de cacau nos sistemas de sombra e pleno sol, e características morfoagronômicas dos frutos e sementes (2020 a 2022). A análise de agrupamento (cluster), baseou-se na distância Euclidiana, com medida de similaridade. A parte central da figura apresenta-se o mapa de calor, a partir dos dados de correlação de Pearson, transformados em escala logarítmica. As cores vinho representam correlação forte positiva, enquanto as cores claras, representam correlação forte negativa.

Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY).

O dendrograma com mapa de calor evidenciou a relação entre os clones de cacau em diferentes idades produtiva do 5º ao 7º ano e suas características morfoagronômicas

dos frutos e sementes (Figura 6). Os resultados revelaram padrões de similaridade entre os clones distintos entre as idades produtivas, diferente do encontrado em relação às combinações de fatores anteriores, com safras (Figura 4) e com sistemas de cultivo (Figura 5).

O Cluster I agrupou o clone CCN 51 nas três idades produtivas, o qual diferenciou-se por ter apresentado menor ESN, CF, NPT, PI, EI e HY. Além disso, apresentou correlação forte negativa com o FA 13 para as mesmas características. O Cluster II agrupou os clones em 4 subgrupos distintos, o CP 19 foi agrupado separadamente e apresentou correlação forte negativa com o FA 13, para as características de USN e NSP, bem como forte positiva para PI, EI e HY. Os clones PS 1319 e SJ 02 possuem maior similaridade entre as idades produtivas para as características de número, peso e índice de sementes, apresentaram correlação forte positiva para as características de BL e BY, bem como correlação forte negativa para ESN. Em relação aos padrões de similaridade entre as idades produtivas, foi observado maior similaridade entre o 6º e 7º ano para todos os clones, exceto para o PS 1319, que apresentou maior similaridade entre o 5º e 7º ano. O SJ 02 apresentou correlação forte negativa entre os anos 5º e 6º para PY. No 6º ano o PS 1319 destacou-se por apresentar maior ESN. No 6º e 7º ano o FA 13 apresentou os maiores NPT. O FA 13 também obteve os maiores USN e NSP, no qual tais características foram constantes e não variaram entre os anos.

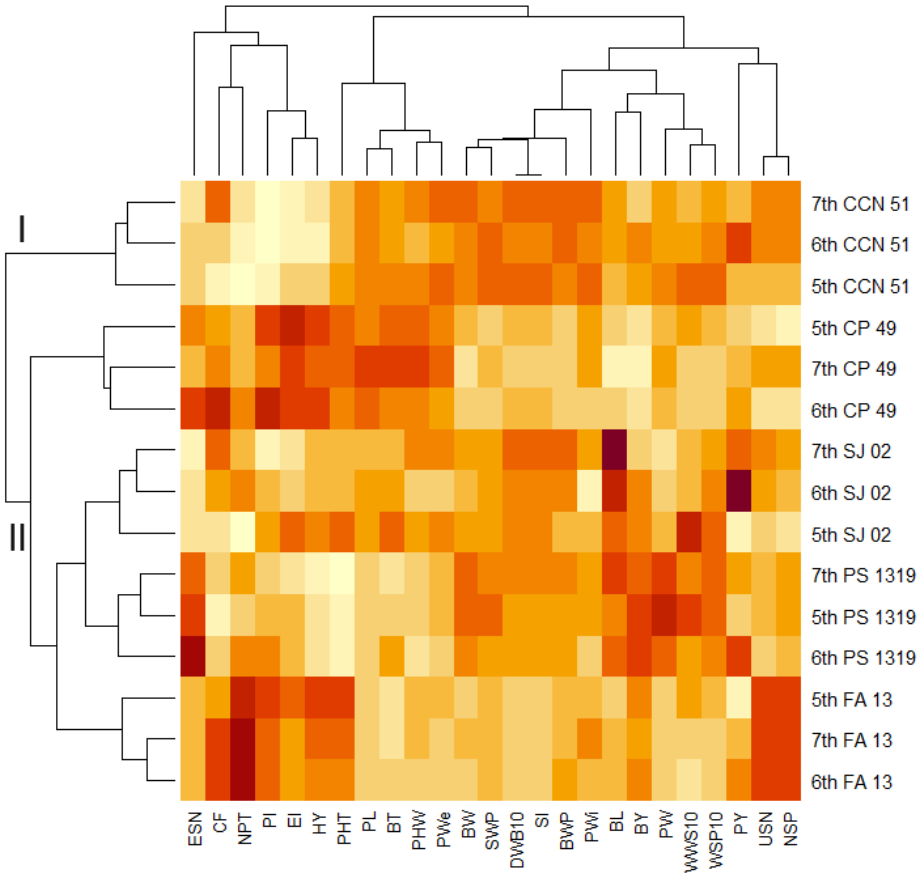


Figura 6. Dendrograma com mapa de calor (heatmap) dos clones de cacau nos anos 2020, 2021 e 2022, e características morfoagronômicas dos frutos e sementes. A análise de agrupamento (cluster) baseou-se na distância Euclidiana, com medida de similaridade. Na parte central da figura apresenta-se o mapa de calor, a partir dos dados de correlação de Pearson, transformados em escala logarítmica. As cores vinho representam correlação forte positiva, enquanto as cores claras, representam correlação forte negativa.
Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY).

4. Discussão

Os clones locais PS 1319, SJ 02 e FA 13, foram selecionados em fazendas por agricultores no sul da Bahia, e posteriormente registrados pela CEPLAC (Ahnert et al., 2018). O CP 49 é uma cultivar selecionada no Centro de Pesquisas do Cacau (CEPEC) em Ilhéus, Bahia, a partir do cruzamento de TSA 644 x CCN 51 (Sodré, Magno & Monteiro, 2017). Apesar de CP 49 ser uma progênie do CCN 51, apresentou maior distância e morfoagronômica do CCN 51 para maioria das características e fatores

analisados (Tabela 3, 4 e 5). Além disso, apresentaram correlação negativa (Figura 3) e não possuíram similaridade nos diferentes fatores, sistemas produtivos (Figura 4), períodos de colheita (Figura 5) e idades produtivas (Figura 6), o que foi inesperado devido à sua relação parental.

O clone CCN 51 apresentou médias superiores em características de maior interesse para os produtores, como maior peso dos frutos, menor índice de fruto e maior índice de sementes (Ahnert et al., 2018; Dias & Resende, 2001; Bekele et al., 2020) (Tabelas 3, 4 e 5). No entanto, do ponto de vista econômico, os clones do sul da Bahia (FA 13, PS 1319, SJ 02 e CP 49) superaram o CCN 51 em termos de produção de frutos (Tabelas 3, 4 e 5). Embora o CCN 51 seja amplamente reconhecido por seu alto rendimento e adaptabilidade a diferentes regiões e condições ambientais, sendo um dos clones mais cultivados globalmente (Jaimez et al., 2022). Neste estudo ele apresentou a menor média de produção de frutos em comparação com os demais clones, em todos os fatores analisados.

Em outros trabalhos, o CCN 51 foi considerado mais produtivo. Alexandre et al. (2015) analisaram sete cultivares clonais no Espírito Santo, Brasil, constataram divergência genética entre os clones analisados, e destacaram CCN 10 e CCN 51 como os mais indicados para a produção de amêndoas. Doaré, Ribeyre & Cilas (2020) estudaram sete clones na Guiana Francesa e encontraram que o CCN 51 tinha o maior peso médio de amêndoas, correlacionando-se com o número de sementes por fruto. No estudo de Reges et al. (2021), no Ceará, o clone CCN 51 apresentou frutos mais pesados, com maior massa de casca, maior relação entre a espessura da casca, além de maior número de sementes por fruto. Estudo realizado pela CEPLAC com 179 clones de cacaueiro, em 79 locais na região cacaueira da Bahia, por 11 anos, destacou o FA 13, SJ 02, CCN 51, PS 1319, como as variedades atualmente recomendadas para plantio comercial, pois apresentaram maior produção (Macêdo et al., 2021). Também evidenciaram que CCN 51, SJ 02 e FA 13 tiveram médias de produção significativamente superior à da variedade PS 1319 (Macêdo et al., 2021). Estudos realizados pelo Incaper (2022) mostram que os clones PS 1319 3 CCN 51 introduzidos no Espírito Santo, são os materiais genéticos mais cultivados no estado com 23,9% e 23,3% respectivamente. Em Rondônia, nos anos 2012 e 2014, e em 2018, os produtores começaram a substituir gradativamente, as variedades híbridas pelos clones CCN 51, PH 16, SJ 02, PS 1319, CCN 10 e BN 34 (Almeida et al., 2020). Comparando os resultados de caracterização morfométrica encontrados na literatura com os obtidos neste trabalho para os mesmos

clones, observamos médias mais próximas aos encontrados por Alexandre et al. (2015), para CCN 51 e PS 1319, corroborando o fato de que ambas as regiões são de floresta tropical úmida, no bioma Mata Atlântica. Em contraste, com os resultados obtidos em outros biomas brasileiros, evidenciando que o mesmo clone expressa diferenças morfoagronômicas devido aos fatores ambientais (Doaré, Ribeyre & Cilas, 2020).

Os fatores de produção cruciais nos programas de melhoramento de cacau incluem número de frutos por planta, peso de sementes por fruto, número de sementes por fruto, peso médio de sementes e índice de fruto (Ahnert et al., 2018). Segundo Dias & Resende (2001) as variáveis que melhor discriminam características desejáveis para o produtor, são NPT, NSP, PI e SI. O PI avalia o potencial produtivo do clone, através de outras duas variáveis: NSP e SI. A indústria requer o peso de uma amêndoa acima de 1 g (Ahnert et al., 2018). Todos os clones analisados apresentaram valores de SI acima de 1 g, variando de 1,0 g para FA 13, até 1,7 g para CCN 51 (Tabela 5). No entanto, o SI e PI, que indica o número de frutos necessários para produzir 1 kg de amêndoas secas, não apresentaram associação com YIELD pela PCA (Figura 3). Apesar de ser considerado um dos componentes de produção mais importantes para a seleção de cultivar e para seleção de matrizes, baseia-se no monitoramento inicial do número de frutos por planta e posterior descarte de matrizes de baixa produção a partir de PI e SI (Dias & Resende, 2001). Esses resultados não são congruentes com este estudo, pois menor SI e maior PI não correlacionaram-se com maior NPT e YIELD (Tabela 3). Diferente do esperado, o NPS também não apresentou associação direta também com SI (Figura 3) (Doaré, Ribeyre & Cilas, 2020). Dias & Resende (2001) observam que o aumento na produção de frutos geralmente reduz o número de sementes, índice de semente, peso do fruto e peso de amêndoas, devido à competição por fotoassimilados. No presente estudo, revelou que a produtividade está correlacionada com aumento de número de frutos por planta e número de semente por fruto, que por sua vez, devido a competição de fotoassimilados, reduzem o tamanho do fruto, a espessura da amêndoa, o peso do fruto e casca (Figura 3). O estudo de Sodré & Nery (2023) apontou para o uso de outra característica biométrica mais adequada para avaliação da produção de cacaueiros: a relação entre massas frescas de frutos e amêndoas (RFA). Foi avaliada uma característica parecida no presente estudo, denominada índice de eficiência (IE), no entanto também não apresentou associação direta com produtividade, mas evidenciou uma forte correlação negativa com o BY (Figura 3).

Segundo Carvalho et al. (2001), apesar da relevância da produção de frutos, destacam o peso de sementes úmidas é mais interessante para o produtor, pois as amêndoas secas são a matéria-prima para comercialização. Comumente adota-se valor médio de 40% de CF de cacau fresco, para cacau seco (Almeida, Dias & Silva, 2009). Todavia, houve diferença significativa do CF entre os clones e fatores avaliados neste estudo (Tabelas 3, 4 e 5). Essa diferença afeta diretamente a previsão do produtor ao contabilizar sua produção de cacau seco a partir do CF. Portanto, se faz necessário o uso de CF específico de cada clone para a estimativa de produção. Outro ponto importante, é que quando o fruto possui maior rendimento de sementes, ocorre a redução no tempo de colheita e quebra, reduzindo os custos de produção. O clones PS 1319 obteve as maiores médias para o rendimento de amêndoas (Tabela 3, 4 e 5).

Outra importante característica é relacionada ao HY, o clone PS 1319 revelou as melhores médias para essa característica e CP 49 as piores (Tabela 3, 4 e 5). Como observado no presente estudo, a casca é o principal resíduo gerado no processamento de cacau (Sodré, 2017; Reges et al., 2021). Segundo Santos (2018), é a parte do fruto mais rica em potássio (K), possui teor médio de 30 g kg-1 de K. Embora as cascas devam ser retornadas para lavoura, principalmente como fonte de K, este nutriente costuma ser retornado à lavoura de forma concentrada, via casqueiro (Júnior, Marrocos & Neves, 2018). No sul da Bahia os resíduos de casqueiros geralmente são amontoados nas lavouras e são fontes de inóculo de doenças (Oliveira, 2017; Junior, Sodré & Neves, 2018). Nesse sentido, são necessárias práticas de manejo mais adequadas para lidar com os resíduos de casqueiros, pois como verificado neste trabalho as cultivares possuem média de 79 % de HY (Tabela 2). No entanto, o volume de casca pode ser bem maior a depender do cultivar e idade produtiva, o CP 49 possuiu 89.2% de casca no 5º ano. Guirlanda, Silva & Takahashi (2021), reportaram a importância de os países produtores de cacau desenvolverem técnicas inovadoras para agregar valor aos resíduos do cacau, que respondem aproximadamente 80% do fruto.

Características morfoagronômicas também podem ser úteis para dimensionamentos de maquinários, como exemplo o tamanho de frutos, tamanho amêndoas, rendimento de polpa, para prototipar máquinas de quebrar de cacau, cochos de fermentação e peneiras para seleção de lotes de amêndoas especiais (Tabela 3, 4 e 5).

Para as características de rendimento de semente, placenta e polpa, os clones PS 1319 e SJ 02 apresentaram as melhores médias (Tabela 3, 4 e 5). Todos os resultados também evidenciaram o FA 13 com superioridade na produção de frutos (Tabela 3, 4, 5,

Figura 3, 4, 5 e 6), esse resultado pode indicar maior adaptabilidade e estabilidade do FA 13. A estreita correlação positiva entre produtividade e número de frutos por planta, bem como a correlação negativa com tamanho e peso do fruto, além da associação com outras variáveis (Figura 3). Proporcionaram uma abordagem eficaz para identificar e visualizar padrões complexos nos dados dos componentes de produção dos clones de cacau, relacionados à produtividade (Figura 3). Esses resultados podem ter implicações importantes e norteadoras para a seleção de clones em programas de melhoramento genético e no campo, bem como para a otimização de práticas de manejo agrícola, visando aumentar a produtividade das lavouras de cacau (Bekele et al., 2020; Ahnert, 2009; Ahnert et al, 2018).

Nas análises de agrupamento e correlações também evidenciaram a similaridade e variabilidade dos componentes de produção dos clones de cacau e duas interações com diferentes sistemas de cultivo, safras e idades produtivas (Figura 4, 5 e 6). Embora todas essas características dos clones tenham sido significativamente diferentes, os descritores morfológicos quantitativos nem sempre são capazes de discriminar diferenças entre clones, devido a características que estão sob controle poligênico do efeito aleatório do ambiente (Maharaj et al., 2019). Portanto, se faz necessária a replicação da avaliação desses clones do sul da Bahia em outras regiões, pois possuirão resultados distintos do presente estudo. Os resultados destacaram a complexidade da influência dos fatores na variação dos caracteres morfoagronômicos dos clones. As interações simples e triplas observadas indicaram que a escolha dos clones deve ser feita considerando as condições específicas de cada fator, bem como para as características mais desejáveis (Tabela 2). Para as características que não obtiveram efeito significativo na interação, significa que a combinação dos fatores não tem um efeito conjunto estatisticamente significativo na variável dependente (Tabela 2). Isso pode ocorrer por diversas razões, incluindo a possibilidade dos efeitos individuais de cada fator ser dominante em relação às interações entre eles, ou que as variações nos níveis de um fator não sejam afetadas pelos níveis dos outros fatores. Além disso, a falta de efeito significativo em uma interação tripla pode ser atribuída à complexidade e variabilidade dos sistemas estudados (Lau et al., 2015).

No heatmap dos sistemas de cultivo (Figura 4), os clones FA 13, CCN 51, PS 1319 e CP apresentaram similaridade no NPT entre as safras, indicando produção estável ao longo do ano. Esse padrão é benéfico para agricultores familiares, pois permite a distribuição contínua da produção e renda. Em contrapartida, o clone SJ 02 exibiu maior variação entre safras, com maior NPT na safra principal, favorecendo cultivos em larga

escala com uso de mão de obra externa e mecanização, uma vez que a concentração da produção reduz custos de colheita. O clone PS 1319 mostrou maior incidência de sementes chochas na safra temporão, em comparação aos outros clones (Figura 4). A ocorrência de veranicos nesta safra sugere menor adaptação deste clone ao estresse hídrico, demandando manejo específico, como irrigação e adubação com boro (Tomicioli et al., 2021; Sant'Ana et al., 2020). Portanto, as variações no comportamento dos clones em diferentes períodos de colheita refletem sua sensibilidade às condições sazonais e práticas de manejo (Almeida & Valle, 2007).

Não houve diferença significativa na produção de frutos entre os clones cultivados em sistemas de sombra e a pleno sol. O experimento foi realizado em áreas experimentais sob manejo adequado. Embora houvesse diferentes níveis de sombreamento, as árvores foram podadas para otimizar a distribuição da radiação solar entre os tratamentos (Porto, 2024). Nessas áreas, a média de transmitância de radiação fotossinteticamente ativa (PARt%) foi de 80%, indicando que sombreamento leve pode melhorar as condições de cultivo e aumentar a produtividade (Porto, 2024). Ahnert et al. (2018) ressaltam que as características biométricas dos clones são amplamente influenciadas pelo ambiente e pelo manejo agronômico.

Isso evidencia a importância de adotar práticas agrícolas sustentáveis para a conservação dos recursos naturais nos sistemas de produção de cacau, em contraste com a tendência atual de redução da sombra (Schroth et al., 2016). Apesar da escassez de informações sobre os efeitos de culturas associadas na produtividade do cacau em sistemas agroflorestais complexos, a pesquisa sugere que esses sistemas podem ser mais eficazes para mitigar os efeitos adversos das mudanças climáticas, reduzindo os níveis de CO_2 atmosférico (Notaro et al., 2021; Arimi & Omoare, 2021). Além disso, o uso sistemático de estratégias de adaptação, como a inclusão de árvores de sombra nas plantações de cacau, diminui a vulnerabilidade do cultivo às temperaturas extremas durante a estação seca (Schroth et al., 2016).

A cobertura das copas reduz a temperatura máxima diária e as cabrucas podem mitigar os impactos negativos das mudanças climáticas no cultivo de cacau. Em contraste, a monocultura sem sombra pode resultar em perdas de produção a longo prazo, apesar de maximizar os lucros no curto prazo (Heming et al., 2022). Os sistemas de cultivo sombreado, também conhecidos como sistemas agroflorestais (SAFs), combinam plantas agrícolas com árvores ou arbustos, promovendo sinergia entre os componentes florestais e agrícolas e atenuando os efeitos ambientais negativos do monocultivo em pleno sol

(Jose et al., 2019). Esses sistemas oferecem benefícios como sequestro de carbono, conservação da biodiversidade, enriquecimento do solo e melhoria da qualidade do ar e da água (Jose et al., 2019). Os benefícios socioeconômicos dos sistemas de cultivo sombreado incluem a diversificação das fontes de renda para os agricultores por meio da produção de madeira, frutos e látex, aumentando a resiliência econômica e contribuindo para a segurança alimentar das comunidades rurais (Ahnert & Eskes, 2018).

Em relação às idades produtivas, observou-se que as características do clone FA 13 apresentaram menores variações ao longo dos anos, destacando-se nas características de sementes, ESN, USN, NSP, SI, SWP, além disso para NPT, PI, PL e PW (Figura 6). Isso indica que o FA 13 possui maior estabilidade para essas características ao longo dos anos. Segundo Cilas et al. (2022), a avaliação dos componentes de produção a partir do 4º ano proporciona uma estimativa confiável do potencial de desempenho do cacau, com correlação genética superior a 0,85. Dias e Kageyama (1997) afirmam que um período mínimo de colheitas sucessivas de 2 anos é suficiente para prever o valor real dos genótipos, com 90% de precisão, para as variáveis NSP e SWP. Por outro lado, os demais clones apresentaram variações significativas nas características entre as idades produtivas. É conhecido que a produção de cada ano também possui variação de acordo com as chuvas do ano anterior (Muller & Valle, 2012). Mas acreditava-se que a partir do 5º ano e com 3 anos de colheita essas características morfoagronômicas teriam menos variações internas. Por isso, se faz necessário estudos adicionais de coeficiente de repetibilidade para os componentes de produção. Diferenças significativas de produtividade entre anos são comuns nas plantações (Dias & Almeida, 2001), apesar da ampla adaptabilidade do cacau a diversas condições climáticas (Bartley, 2005). Assim, é fundamental considerar fatores climáticos ao avaliar o desempenho das cultivares (Lopes et al., 2011), uma vez que temperatura, umidade, disponibilidade hídrica e incidência de pragas influenciam diretamente o desenvolvimento das plantas e a frutificação (Almeida & Valle, 2007).

O futuro da economia cacaueira mundial depende significativamente da utilização de cultivares clonais produtivas, com resistência a doenças e pragas, características de qualidade desejáveis e capacidade de adaptação às mudanças do clima (Ahnert & Eskes, 2018). A renovação de lavouras com a utilização desses clones do sul da Bahia com técnicas de manejo adequadas em sistemas agroflorestais, podem superar os desafios de baixa produtividade na região. Além disso, esses clones também podem ser mais avaliados e cultivados em outras regiões agrícolas de cacau, que também enfrentam

desafios relacionados à baixa produtividade e pressão crescente de doenças e pragas. Apesar desses clones atenderem as demandas emergentes, são necessárias novas estratégias de melhoramento para combinar mais genes e alelos de resistência a doenças e características de produção de maior interesse agronômico, provenientes de cultivares locais e germoplasma selvagem inexplorado, para proporcionar aos agricultores uma maior diversidade genética (Ahnert, 2009; Bekele et al., 2020). Por isso, mais estudos são necessários, tais como, interações intra-alélicas (dominância), inter-alélicas (epistasia) e a interação genótipo × ambiente (G×E) que é a principal metodologia que permite a recomendação mais adequada para uma região ampla ou para condições específicas (Cruz et al., 2021). Do mesmo modo, é importante ressaltar que estudos de correlação entre características não permitem estabelecer relações causais, de causa e efeito, pois a correlação apenas quantifica associações. O método de coeficiente de trilha possibilita avaliar a influência direta de uma variável sobre outra de forma independente (Vencovsky & Barriga, 1992). Portanto, são necessárias análises adicionais das correlações entre as características morfoagronômicas investigadas neste estudo com a produtividade.

5. Conclusão

Os resultados deste estudo indicam que os clones de cacau possuem variação dos componentes de produção em diferentes idades produtivas, sistemas de cultivo e safras. O presente estudo foi útil para identificar e nortear padrões complexos dos componentes de produção de clones de cacau brasileiros (FA 13, PS 1319, SJ 02 e CP 49), comparados com CCN 51, cultivar clonal internacional. Os clones locais apresentaram superioridade de produção em relação ao CCN 51. Dentre eles, o FA 13 é o mais produtivo, com maior NPT e NPS, apesar de possuir o menor PL, PWe e BW. Adicionalmente, os clones PS 1319 e SJ 02 apresentam destaque para as características de rendimento de sementes e polpa. Os clones FA 13, PS 1319 e SJ 02 avaliados são promissores para programas de melhoramento genético e para serem cultivados na Bahia, e potencialmente em outras regiões cacaueiras do mundo.

O clone CP 49 se destacou em sistemas de cultivo a pleno sol, particularmente no 5º ano produtivo e durante a safra principal, devido à sua associação significativa com índices de eficiência produtiva (EI) e rendimento (HY). Por outro lado, o clone PS 1319 demonstrou maior adequação a sistemas sombreados e à safra temporã, nos 6º e 7º anos,

apresentando forte relação com o número de sementes/amêndoas e rendimento de amêndoas, características que refletem alto potencial de produtividade.

Além disso, o clone FA 13 mostrou-se consistente em sua contribuição positiva ao número de frutos por planta (NPT), independentemente do sistema de cultivo ou safra, confirmando sua versatilidade e desempenho estável. O CCN 51, por sua vez, evidenciou superioridade em peso e tamanho de sementes e amêndoas no 5º ano produtivo e durante a safra temporã, sendo indicado para sistemas de maior intensidade produtiva. Esses resultados destacam a importância da escolha do clone considerando o sistema de cultivo e o objetivo produtivo, com CP 49 e PS 1319 sendo específicos para condições determinadas, enquanto FA 13 e CCN 51 apresentam desempenho mais geral.

O sistema de cultivo com 80% de sombreado não difere do cultivo ao sol pleno quanto à produção de frutos, sendo recomendado o uso desse sistema sombreado, que gera inúmeros benefícios socioambientais. A variação sazonal nos componentes de produção destaca a necessidade de considerar as condições climáticas no manejo agrícola dos clones, visando otimizar seu desempenho ao longo das diferentes safras e idades produtivas. Frente aos desafios de baixa produtividade e pressões crescentes de doenças e pragas, em um cenário de mudanças climáticas e econômicas globais, a renovação das lavouras cacaueiras por clones produtivos e adaptados é crucial para sustentar a economia cacaueira global.

6. Referências bibliográficas

AHNERT, D. Ideotype Breeding in Cocoa. In: Proceedings of the International Workshop on Cocoa Breeding for Farmers, 2006, San José. Eds. A.B. Eskes, Y. Efron, M.J. End and F. Bekele. UK and Costa Rica: INGENIC and CATIE, 2009. p. 157-167.

AHNERT, D.; ESKES, A. B. Umaharan, P. (ed.). Achieving sustainable cultivation of cocoa. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing, 2018. p. 1-44.

AHNERT, D. et al. Genetic improvement and cocoa productivity in Brazil. In: SOUZA JUNIOR, J. O. (ed.). *Cacao: cultivation, research and innovation.* Ilhéus: Editus, 2018. p. 151-181.

ALEXANDRE, R. S. et al. Pod characterization of cacao clones in the coastal region of São Mateus, ES. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 8, p. 785–790, 2015.

ALMEIDA, C. M. V. C. et al. Variability and correlation of physical attributes of soils cultivated with cacao trees in two climate zones in Southern Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, v. 93, n. 3, p. 793–802, 2019.

ALMEIDA, C. M. V. C.; DIAS, L. A. S.; SILVA, A. P. Agronomic characterization of cacao accessions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 44, n. 4, p. 368-373, 2009.

ALMEIDA, A. F.; VALLE, R. R. Ecophysiology of the cacao tree. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, v. 19, n. 4, p. 425-448, 2007.

ARÉVALO-HERNÁNDEZ, C. O. et al. Variability and correlation of physical attributes of soils cultivated with cacao trees in two climate zones in Southern Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, v. 93, n. 3, p. 793-802, 2019.

ARIMI, K.; OMOARE, A. Motivating cocoa farmers to adopt agroforestry practices for mitigating climate change. *Renewable Agriculture and Food Systems*, v. 36, n. 6, p. 599-604, 2021. DOI: 10.1017/S1742170521000223

ASANTE, Paulina A. et al. The cocoa yield gap in Ghana: A quantification and an analysis of factors that could narrow the gap. *Agricultural Systems*, v. 201, p. 103473, 2022. DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103473

BAHIA, R. C. S. Caracterização fenotípica da população F1 (TSH1188 x CCN51) de cacaueiro quanto a resistência à podridão-parda e ao número de óvulos por ovário. 2007. 61 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 2007.

BARTLEY, B. G. D. The genetic diversity of cacao and its utilization. Cambridge: CABI Publishing, 2005. 341 p.

BEKELE, F. L. et al. Morphological characterization and evaluation of cacao (*Theobroma cacao* L.) in Trinidad to facilitate utilization of Trinitario cacao globally. *Genetic Resources and Crop Evolution*, v. 67, p. 621-643, 2020.

BOZA, E. J. et al. Genetic characterization of the cacao cultivar CCN 51: Its impact and significance on global cacao improvement and production. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, v. 139, n. 2, p. 219–229, 2014.

CARVALHO, C. G. P. et al. Evaluation and selection of cocoa hybrids in Rondônia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, n. 8, p. 1052-1061, 2001.

CUELLAR, M. L. et al. Evaluation of the physical and sensory quality of *Theobroma cacao* L. grain in response to processing processes in municipalities in northern Huila, Colombia. *Journal of Agricultural and Environmental Research*, v. 15, n. 1, p. 137-156, 2023. DOI: 10.22490/21456453.6710

CHIAPETTI, J. Cocoa production in Bahia: Analysis of the political and economic trajectory. In: SOUZA JUNIOR, J. O. *Cocoa: cultivation, research and innovation*. Ilhéus: Editus, p. 13-34, 2018.

CAOBISCO/ECA/FCC. Cocoa Beans: Chocolate and Cocoa Industry Quality Requirements. September, End, M. J.; Dand, R. (Eds.), 2015.

DIAS, L. A. S.; KAGEYAMA, P. Y. Temporal stability of multivariate genetic divergence in cacao (*Theobroma cacao* L.) in Southern Bahia conditions. *Euphytica*, v. 93, p. 181-187, 1997.

DIAS, L. A. S.; RESENDE, M. D. V. Selection strategies and methods. In: DIAS, L. A. S. *Melhoramento genético do cacaueiro*. FUNAPE, UFG, p. 578, 2001.

DOARÉ, F.; RIBEYRE, F.; CILAS, C. Genetic and environmental links between traits of cocoa beans and pods clarify the phenotyping processes to be implemented. *Scientific Reports*, v. 10, p. 9888, 2020.

DILLINGER, T. L. et al. The nutritional value of cacao and its potential role in health promotion. *The Journal of Nutrition*, v. 130, n. 8, p. 2057S-2072S, 2000. DOI: 10.1093/jn/130.8.2057S

DUVALL, A. et al. Genetic parameters and the impact of off-types for *Theobroma cacao* L. in a breeding program in Brazil. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, art. 2059, 2017.

ENGELS, J. M. M. The systematic description of cacao clones and its significance for taxonomy and plant breeding. Doctoral thesis. Agricultural University, Wageningen, 1986. 125 p.

HEMING, N. M. et al. Cabruca agroforestry systems reduce vulnerability of cacao plantations to climate change in southern Bahia. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 42, p. 48, 2022. DOI: 10.1007/s13593-022-00780-w.

INCAPER. Cadeia produtiva do cacau no Espírito Santo / Edileuza Aparecida Vital Galeano ... [et al]. Vitória, ES: Incaper, 2022. 168 p.: color.; 15,5 cm. (Fruticultura Capixaba; v. 4). ISBN 978-85-89274-38-8. DOI: 10.54682/livro.9788589274388.

ICCO. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistic. Vol. XLVIII, No. 2, Cocoa year 2022/23, 2024.

GALILI, T. et al. Heatmaply: An R package for creating interactive cluster heatmaps for online publishing. *Bioinformatics*, v. 34, n. 9, p. 1600-1602, 2018.

FARIA, J. C. Expanded lecture notes. UESC, Experimental Methodology and Statistics, p. 221, 2006.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer system for statistical analysis. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011.

FUENTES, Q. L. F. et al. Characterization of three cocoa harvest indices of clones CCN51, ICS60 and ICS 95, in the Santander mountain, Colombia. *Journal of Agricultural and Environmental Research*, v. 6, n. 1, p. 252-265, 2015. DOI: 10.22490/21456453.1284.

GARCIA, C. H. Tables for classifying the coefficient of variation. IPEF: Technical Circular no. 171, p. 10, 1989.

GUIRLANDA, C. P.; DA SILVA, G. G.; TAKAHASHI, J. A. Cocoa honey: Agro-industrial waste or underutilized cocoa by product? *Future Foods*, v. 4, art. 100061, 2021.

JAIMEZ, R. E. et al. Theobroma cacao L. cultivar CCN 51: a comprehensive review on origin, genetics, sensory properties, production dynamics, and physiological aspects. *PeerJ*, DOI: 10.7717/peerj.12676, 2022.

JOSE, S. Environmental impacts and benefits of agroforestry. *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Retrieved 20 May 2024, https://oxfordre.com/environmentalscience/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-195.

JUNIOR, J. O. S.; MARROCOS, P. C. L.; NEVES, J. C. L. Nutritional diagnosis for the cocoa tree. In: SOUZA JUNIOR, J. O. *Cacao: cultivation, research and innovation*. Ilhéus: Editus, 2018. p. 305-332.

JUNIOR, J. O. S.; SODRÉ, G. A.; NEVES, J. C. L. Soil fertility, acidity correction and fertilization recommendations for cocoa trees. In: SOUZA JUNIOR, J. O. *Cacao: cultivation, research and innovation*. Ilhéus: Editus, 2018. p. 333-378.

LAU, J. A.; SHAW, R. G.; REICH, P. B.; TIFFIN, P. Indirect effects drive evolutionary responses to global change. *New Phytologist*, v. 206, n. 1, p. 20-28, 2015.

LOUREIRO, G. A. H. A. *Soil quality and cocoa quality*. 2014. [Master's thesis] – State University of Santa Cruz - UESC, Ilhéus.

LOPES, U. V. et al. Cacao breeding in Bahia, Brazil: strategies and results. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 11 (special issue), 2011.

LOPES, U. V. et al. Genome-wide SNP genotyping as a simple and practical tool to accelerate the development of inbred lines in outbred tree species: An example in cacao (*Theobroma cacao* L.). *PLOS ONE*, v. 17, n. 10, p. e0270437, 2022. DOI: 10.1371/journal.pone.0270437.

MAHARAJ, K. et al. Selection of putative relic cacao (*Theobroma cacao* L.) genotypes in farmers' fields in Trinidad and Tobago. *Tropical Agriculture (Trinidad)*, v. 96, Commemorative Issue, 2019.

MONTEIRO, W. R.; AHNERT, D. Genetic improvement of the cocoa tree. In: VALLE, R. R. *Cocoa Science, Technology and Management*. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC/SEFIS, 2012. p. 357-376.

NOTARO, M. et al. The spatial distribution and height of associated crops influence cocoa tree productivity in complex agroforestry systems. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 41, p. 60, 2021. DOI: 10.1007/s13593-021-00716-w.

OKSANEN, F. J. et al. Vegan: Community Ecology Package. R package Version 2.4-3. Available at: https://CRAN.R-project.org/package=vegan. Accessed on: 01 Jul. 2022.

OLIVEIRA, M. L. Cocoa tree diseases. In: SODRÉ, G. A. *Cacao cultivation in the state of Bahia*. Ilhéus: MAPA/CEPLAC/CEPEC, p. 67-87, 2017.

ORTIZ RAVELO, J. et al. The effect of supplementation based on cocoa shells (*Theobroma cacao*) in the production and compositional quality of milk in mixed cows in pasture. *Journal of Agricultural and Environmental Research*, v. 14, n. 2, p. 171-188, 2023. DOI: 10.22490/21456453.6500.

PEREIRA, J. L.; VALLE, R. R. Integrated Cocoa Management. In: VALLE, R. R. *Science, Technology and Cocoa Management*. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC/SEFIS, 2012. p. 357-376.

REGES, B. M. et al. Quality variables for technological application of cocoa clones from the Brazilian semiarid region. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 25, n. 3, p. 203-208, 2021.

PORTO, B. H. C. *Produtividade de cultivares clonais de cacaueiro (Theobroma cacao L.) em função de métodos de renovação das lavouras e de atributos edáficos e fisiográficos.* Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal – PPGPV – Ilhéus, BA: UESC, 2024.

SANT'ANA, C. S. et al. Influence of the harvest period on the quality of cocoa from the Southern Bahia Geographical Indication. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 8295-8306, feb. 2020.

SANTOS, E. R. Productivity and export of nutrients by cocoa trees. PhD thesis: State University of Santa Cruz, UESC. Ilhéus, 2018.

SANTOS, E. S. et al. Genetic Structure and Molecular Diversity of Cacao Plants Established as Local Varieties for More than Two Centuries: The Genetic History of Cacao Plantations in Bahia, Brazil. *PLOS ONE*, v. 10, n. 12, p. e0145276, 2015.

SANTOS, R. C.; PIRES, J. L.; CORREA, R. X. Morphological characterization of leaf, flower, pod and seed traits among Brazilian *Theobroma* L. species. *Genetic Resources and Crop Evolution*, v. 59, p. 327-334, 2012.

SILVA, A. R. et al. Evaluation of the experimental coefficient of variation for pepper pod characters. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 58, n. 2, p. 168-171, 2011.

SILVA, R. Mapeamento da autoincompatibilidade sexual do cacau e certificação genética dos clones TSH-1188 e CCN-51 por meio de marcadores microssatélites. *Dissertação de Mestrado* – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

SODRÉ, G. A.; NERY, I. D. Relationships between pod and beans masses to estimate income in cocoa farming. *Agrotrópica*, v. 35, n. 1, p. 15-20, 2023.

SODRÉ, G. A.; MAGNO, A. E. S.; MONTEIRO, W. R. In: SODRÉ, G. A. *Cultivation of the cocoa tree in the state of Bahia*. Ilhéus: MAPA/CEPLAC/CEPEC, p. 9-26, 2017.

MOTAMAYOR, J. C. et al. Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. *Heredity*, v. 89, n. 5, p. 475-481, 2002.

SILVA, J. R. et al. Resistência de progênies de cacaueiro à murcha-de-Ceratocystis. *Tropical Plant Pathology*, v. 37, n. 3, p. 151-156, maio-jun. 2012. DOI: 10.1590/S1982-56762012000300005.

TOMICIOLI, R. M.; LEAL, F. T.; COELHO, A. P. Limitação da produtividade pela deficiência de boro nas culturas da soja, milho, feijão e café. *South American Sciences*, v. 2, n. 1, e21100, 2020. DOI: https://doi.org/10.17648/sas.v2i1.100.

VAAST, P.; SOMARRIBA, E. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems*, v. 88, p. 947-956, 2014. DOI: 10.1007/s10457-014-9762-x.

VENCOSKY, R.; BARRIGA, P. *Genética biométrica no fitomelhoramento*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Genética, 1992.

ZHANG, D.; MOTILAL, L. Origin, dispersal, and current global distribution of cacao genetic diversity. In: BAILEY, B.; MEINHARDT, L. (eds.) *Cacao Diseases*. Cham: Springer, 2016. p. 1-18. DOI: 10.1007/978-3-319-24789-2_1.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DE TRILHA DE COMPONENTES DE PRODUÇÃO DE CULTIVARES CLONAIS DE CACAU

Alane Paula Peixoto Pannain[1,3]

Gonçalo Santos Silva[1,2]

Dario Ahnert[1,2]

Ronan Xavier Corrêa[1,3]

[1] Universidade Estadual de Santa Cruz, Rodovia Jorge Amado, km 16, 45662-900 Ilhéus, Bahia, Brazil

[2] Centro de Inovação do Cacau, Ilhéus, Bahia, Brazil

[3] Centro de Biotecnologia e Genética, Departamento de Ciências Biológicas, UESC, Ilhéus, BA, Brasil

RESUMO

A produtividade de cacau, obtida através do número de frutos e peso de amêndoas por planta, por unidade de área, é influenciada por fatores ambientais, genéticos e de manejo. A compreensão do efeito das características dos frutos sob a produtividade é crucial para aumentar o rendimento da cultura, a sustentabilidade das plantações e a renda para os produtores. Este estudo aplicou a análise de variância genética, correção e principalmente análise de trilha, técnica estatística que permite decompor os efeitos diretos e indiretos das variáveis independentes sobre uma variável dependente, para identificar os componentes de produção mais influentes na produtividade do cacau. Foram analisados 25 componentes de produção de cinco cultivares clonais de cacau do 5º ao 7º ano, nas safras agrícolas de 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, em quatro áreas experimentais no sul da Bahia, Brasil. Os resultados mostraram correlações significativas entre a produtividade e os componentes de produção, com destaque para a correlação positiva mais forte entre a produtividade e o número de frutos por planta. A decomposição dos coeficientes de trilha revelou que, embora o número de frutos por planta tenha apresentado um efeito total significativo sobre a produtividade, seu efeito direto não foi significativo. A influência do número de frutos por planta é explicada por efeitos indiretos, principalmente com o tamanho do fruto, peso da placenta e peso de amêndoas. Além disso, a análise indicou que a largura e espessura das amêndoas estão inversamente relacionadas à produtividade, enquanto o número de sementes por fruto e índice de frutos apresentou um efeito direto positivo significativo com produtividade. Este estudo contribui para uma compreensão mais detalhada das interações complexas entre os

componentes de produção de cacau, auxiliando na identificação e seleção das características mais importantes que apresentam efeito direto com a produtividade.
Palavras-chave: Caracterização morfoagronômica; produtividade; *Theobroma cacao* L.

ABSTRACT

Cocoa productivity, obtained through the number of fruits and weight of almonds per plant, per unit area, is influenced by environmental, genetic and management factors. Understanding the effect of fruit characteristics on productivity is crucial to increasing crop yields, plantation sustainability and income for producers. This study applied genetic variance analysis, correction and, above all, path analysis, a statistical technique that allows the direct and indirect effects of independent variables on a dependent variable to be broken down, in order to identify the most influential production components in cocoa productivity. Twenty-five production components of five clonal cocoa cultivars were analyzed from the 5th to the 7th year, in the 2019/2020, 2020/2021 and 2021/2022 agricultural harvests, in four experimental areas in southern Bahia, Brazil. The results showed significant correlations between yield and production components, with the strongest positive correlation between yield and the number of fruits per plant standing out. The decomposition of the path coefficients revealed that although the number of fruits per plant had a significant total effect on productivity, its direct effect was not significant. The influence of the number of fruits per plant is explained by indirect effects, mainly fruit size, placenta weight and kernel weight. In addition, the analysis indicated that kernel width and thickness are inversely related to yield, while the number of seeds per fruit and fruit index showed a significant positive direct effect with yield. This study contributes to a more detailed understanding of the complex interactions between the components of cocoa production, helping to identify and select the most important characteristics that have a direct effect on productivity.
Keywords: Morphoagronomic characterization; productivity; *Theobroma cacao* L.

1. Introdução

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é uma importante cultura para a economia de países tropicais, sendo a principal matéria-prima para a produção de chocolate e outros produtos alimentícios de alto valor agregado. A demanda global por cacau tem crescido continuamente, impulsionada pelo aumento do consumo de chocolate e pela expansão de mercados emergentes, como a Ásia (Guirlanda, Silva & Takahashi, 2021; ICCO, 2024). No entanto, a cultura do cacaueiro enfrenta inúmeros desafios, incluindo a baixa produtividade das lavouras, ocasionada pelas condições climáticas adversas e lavouras envelhecidas e falta de práticas agrícolas de manejo (ICCO, 2024; Lopes et al., 2011; Chiapetti, 2018; Ahnert et al., 2018).

Para maximizar a produção de cacau, é essencial entender as relações entre diferentes componentes de produção, como o número de frutos por planta, o índice de

fruto, o peso e o tamanho dos frutos, o número de sementes por fruto e o índice de semente. Os componentes de produção de cacau de maior interesse agronômico, industrial e comercial são os que possuem características superiores, tais como: frutos maiores, baixo índice de fruto, índice de eficiência e peso de amêndoa maior que 1 g (Monteiro & Ahnert, 2012; Santos, Pires & Corrêa, 2012; Alexandre et al., 2015). O peso médio de uma semente, apesar de os clones apresentarem variação entre diferentes locais e sistema de cultivo, possui alta herdabilidade e é uma interessante característica de rendimento (Doaré, Ribeyre & Cilas, 2020). Os componentes número de sementes por fruto, índice de semente, peso total de sementes por fruto e índice de fruto são consideradas como características de maior interesse econômico (Maharaj et al., 2019). A produção de amêndoas é uma característica de natureza complexa, que depende de muitos fatores e suas interações (Ahnert, 2009; Solís et al., 2022). Estudos têm avançado na identificação de QTLs (*Quantitative Trait Loci*), destacando a influência genética que controla os componentes de produção e identificação de genes candidatos que podem participar das diferentes etapas do desenvolvimento dos frutos e do enchimento das amêndoas (Fernandes et al., 2020).

A interação entre os componentes de produção demonstra como fatores genéticos e ambientais interagem no controle de características complexas, evidenciando os grandes desafios enfrentados pelos melhoristas no processo de seleção de materiais genéticos superiores (Cruz et al., 2021). Por isso, análises simples, testes de comparação e estudos de correlação entre características permitem quantificar apenas associações e não possibilitam estabelecer relações causais, de causa e efeito. Thondaiman & Rajamani (2024), afirmam que embora muitas variáveis como a circunferência da árvore e o número de frutos por árvore apresentem correlações fenotípicas significativas com o rendimento da amêndoa seca, a análise de trilha revelou outras características com efeitos diretos mais relevantes na produtividade.

A análise de trilha é uma técnica estatística robusta para examinar as relações causais entre variáveis, introduzida por Wright em 1921 (Wright, 1934). Essa metodologia permite decompor correlações fenotípicas em efeitos diretos e indiretos, oferecendo uma visão mais clara das interdependências entre variáveis (Cruz et al., 2012). Estudos de análise de trilha para avaliar os componentes de produção de soja identificaram o número de vagens por planta como o principal fator determinante do rendimento (Melo et al. 2018). Em estudos sobre a cultura do cafeeiro, o peso médio dos grãos teve um efeito direto significativo sobre o rendimento total (Pereira et al., 2021).

Porém, para a cultura do cacaueiro, a aplicação dessa metodologia ainda é limitada. A análise de trilha de características morfoagronômicas de cacau foram usadas por Santos et al. (2018) para avaliar progênies tolerantes ao déficit hídrico. Solís et al. (2022) utilizaram a análise de trilha e evidenciaram que o número total de frutos por planta tem efeitos diretos positivos significativos sobre o peso seco de amêndoa, superando outras variáveis em termos de efeito direto. Esta metodologia permite uma compreensão mais profunda das relações causais, diferentemente das correlações simples que podem mascarar a verdadeira natureza das interações entre variáveis (Vencovsky & Barriga, 1992).

Neste estudo, buscamos identificar os componentes de produção que exercem maior influência direta e indireta na produtividade de amêndoas de clones de cacau, utilizando a análise de trilha. Foram analisados 25 componentes de produção e produtividade de cinco cultivares clonais de cacau, através da caracterização morfoagronômica, do 5º ao 7º ano, nas safras agrícolas de 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, em quatro áreas experimentais no sul da Bahia, Brasil.

2. Materiais e métodos

Foram analisadas 26 características morfoagronômicas, incluindo a produtividade, frutos e sementes/amêndoas de cinco cultivares clonais autocompatíveis CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49 e FA 13, resistentes à doença vassoura-de-bruxa e recomendadas para plantio comercial (Pereira & Valle, 2012; Macêdo et al., 2021). Os dados foram coletados nas safras agrícolas de 2019/2020, 2020/2021 e 2021/2022, em plantas com idades produtivas do 5º ao 7º ano. Os frutos foram coletados em quatro fazendas de cacau localizadas nos municípios de Teolândia, Ubatã, Ilhéus e Una, na região sul da Bahia, Brasil. Cada área experimental possui 50 plantas por cultivar, com espaçamento de 3 × 3 m entre cacaueiros em quincôncio, sendo 2,6 m entre linhas simples, com área total de 0,3 hectares. Informações detalhadas sobre preparo do solo, manejo da fertilidade e tratos culturais das áreas experimentais estão descritas em Porto (2024).

A caracterização morfoagronômica dos componentes de produção de frutos e sementes, foi realizada no laboratório da agroindústria da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). Os parâmetros biométricos dos frutos foram mensurados até o quinto dia após a colheita. Foram utilizados balança semianalítica, paquímetro e régua. Foram

aferidas as seguintes características morfoagronômicas: número de frutos por planta (F/PL), peso do fruto (PF), comprimento do fruto (CF), largura do fruto (LF), espessura da casca (EC), massa da casca (PC), massa da placenta (PP), massa de 10 sementes úmidas com polpa por fruto (PSU10), massa de 10 sementes sem polpa (PSP10), a polpa foi retirada com tecido de algodão e peneira com malha de 2 mm, número de sementes por fruto (NS), número de sementes chochas (NSC), número de sementes viáveis (NSV).

As sementes foram fermentadas por cinco dias, em caixas de isopor de 5 L com furos para o escoamento do mel de cacau. As sementes foram depositadas no isopor e cobertas com pano de algodão por 48 h até alcançar 32 °C, fase de fermentação anaeróbica. Posteriormente as amêndoas foram revolvidas a cada 24 h, por três dias, fase de fermentação aeróbica, em que ocorreu produção de ácido acético e temperatura acima de 40 °C, com a decorrente morte do embrião e transformação das sementes em amêndoas. Posteriormente, as amêndoas foram secas em estufa solar por 10 dias, e após a secagem, foram aferidas as seguintes características morfométricas: peso de 10 amêndoas (PA10), espessura das amêndoas (EA), comprimento das amêndoas (CA) e largura das amêndoas (LA).

Após a obtenção dos parâmetros biométricos foram calculadas as seguintes variáveis: rendimento de polpa (RP) — diferença de peso entre PSU10 e PSP10, em porcentagem; rendimento de semente (RS) — quantidade de sementes por fruto, em porcentagem; rendimento de casca (RC) — quantidade de casca por fruto, em porcentagem; índice de semente (IS) — peso de 1 amêndoa seca, obtido através do PA10; fator de conversão (FC) — proporção do peso de PSU10, que resultam em PA10; peso de sementes secas por fruto (PA) — variável que estima o quanto 1 fruto gera de peso de amêndoa, obtido através do PS multiplicado pelo FC; índice de eficiência (IE) — variável que relaciona o peso do fruto ao peso da semente seca; índice de fruto (IF) obtido através da Eq. 1. A produtividade (YIELD) foi obtida em (kg/ha/ano), definida através da Eq. 2.

$$\mathrm{IF} = 1000\mathrm{g} \div (\mathrm{NSV} \times \mathrm{IS}) \qquad (1)$$

Em que:

IF - índice de fruto (nº);

NSV - número de semente viáveis (nº); e,

IS - índice de semente (g).

$$\text{YIELD} = \left(\frac{\text{F}}{\text{PL}} \div \text{IF}\right) \times 1000 \qquad (2)$$

Em que:

F/PL - número de frutos por planta (nº);

IF - índice de fruto (nº/kg); e

1000 plantas/ha.

Os dados dos componentes de produção obtidos foram submetidos à análise de variância, pelo teste F a 0,05 de significância, bem como a herdabilidade e coeficiente de variação genético foram estimadas através do programa GENES (CRUZ, 2013). A herdabilidade (h2) e coeficiente de variação genotípico (CVG) foram calculados a partir da Eq. 3 e 4 (Ngidi et al, 2024).

$$h2 = \left(\frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_\varepsilon^2 \div r}\right) \times 100 \qquad (3)$$

Em que:

σ_g^2 - variância genotípica;

σ_ε^2 - variância do erro; e

r - número de replicações

$$GCV = \left(\frac{\sigma g}{\mu}\right) \times 100 \qquad (4)$$

Em que:

σ - desvio padrão genotípico de uma característica específica;

μ - desempenho médio de uma característica específica

Os dados também foram submetidos à análise de correlação linear de Pearson, $p<0,05$ (teste t), para identificar associações significativas. A análise foi realizada no programa R e foi utilizado o pacote 'ggcorrplot' e uma matriz de correlação usando

'ggplot2' (Kassambara, 2023). Foi empregada a análise de trilha (*path analysis*) para decompor os efeitos diretos e indiretos de 25 componentes de produção, considerados variáveis independentes sobre a variável dependente (YIELD), utilizando-se o programa GENES (CRUZ, 1997). Para estimar os efeitos diretos em cada uma das análises, as matrizes de correlações fenotípicas foram decompostas e organizadas no seguinte sistema de matrizes Eq. 5 (Solís et al,. 2022).

$$P = A^{-1} \times R \qquad (5)$$

Em que:

A^{-1} - inverso da matriz de correlação;

R - vetor de coeficientes de correlação entre as variáveis explicativas com a variável dependente.

A adequação do modelo foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2 = 0,99) e dos valores de significância dos coeficientes de trilha.

3. Resultados

A análise de variância revelou diferença significativa entre os acessos, a 0,05 de probabilidade, pelo teste F, para maioria das componentes de produção, exceto para CF, PY e YIELD (Tabela 1). Em relação à herdabilidade (h2) pode-se observar que a maioria das características obtiveram valores altos (Tabela 1). Apenas para CF, PY e YIELD apresentaram herdabilidades abaixo de 80%. Os coeficientes de variação genética variaram de 3.3% para PWi até 70.1% para ESN, no entanto a maioria possuíram valores abaixo de 30% (Tabela 1).

Tabela 1. Análise de variância, estimativa de herdabilidade e coeficiente de variação genotípico dos componentes de produção.

Variables		Quadrado Médio	Mean	CV %	h2 (%)	VCG (%)
PL	(mm)	8689.8*	205.5	4.5	99.0	13.0
PWi	(mm)	133.3*	94.7	3.8	90.4	3.3

PWe	(g)	107630.2*	743.8	10.4	94.4	12.4
PHT	(mm)	29.6*	18.5	7.9	92.8	8.2
PHW	(g)	74344.7*	576.7	12.3	93.2	13.2
PW	(g)	501.4*	18.6	15.6	98.3	34.5
SWP	(g)	11694.8*	143.7	11.6	97.6	21.5
BWP	(g)	1280.9*	55.0	10.0	97.6	18.6
NSP	(nº)	96.3*	42.3	6.6	91.8	6.4
ESN	(nº)	9.1*	1.2	84.3	89.2	70.1
USN	(nº)	134.3*	41.2	7.9	92.2	7.8
WSP10	(g)	541.7*	34.9	10.4	97.6	19.0
WWS10	(g)	164.5*	24.9	12.7	93.9	14.4
DWB10	(g)	51.0*	13.2	5.4	99.0	15.6
CF		0.0	0.4	13.1	78.9	7.3
PY	(%)	101.6	27.7	19.0	72.9	9.0
SI	(g)	0.5*	1.3	5.8	98.9	16.1
PI	(nº/kg)	189.2*	20.5	14.6	95.3	18.9
EI	(g)	77.8*	14.7	14.0	94.6	16.9
BL	(mm)	16.3*	24.7	2.5	97.7	4.7
BW	(mm)	10.41*	12.4	2.4	99.1	7.5
BT	(mm)	7.4*	8.1	5.6	97.2	9.6
HY	(%)	229.1*	78.5	3.8	96.2	5.5
BY	(%)	138.6*	19.8	12.3	95.7	16.8
NPT	nº	2863.4*	45.1	35.0	91.3	32.7
YIELD	(kg/há/ano)	3,780,988.1	2226.4	39.1	79.9	22.5

YIELD; Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY)

Os resultados da correlação linear de Pearson (Figura 1) revelaram que houve correlação significativa ($p<0,05$) entre a produtividade e os componentes de produção analisados. Houve correlação positiva significativa entre a YIELD e as variáveis NPT,

NSP, USN e CF, destacando-se o NPT com a maior correlação positiva. Além disso, os resultados indicam correlação negativa significativa entre a produtividade e as características SI, ESN, PL, PWe, PHW, PW, SWP, WSP10, WWS10, DWB10, BW e BT. Diferente do esperado, a produtividade não apresentou correlação significativa com o PI, EI, PHT, HY e BY.

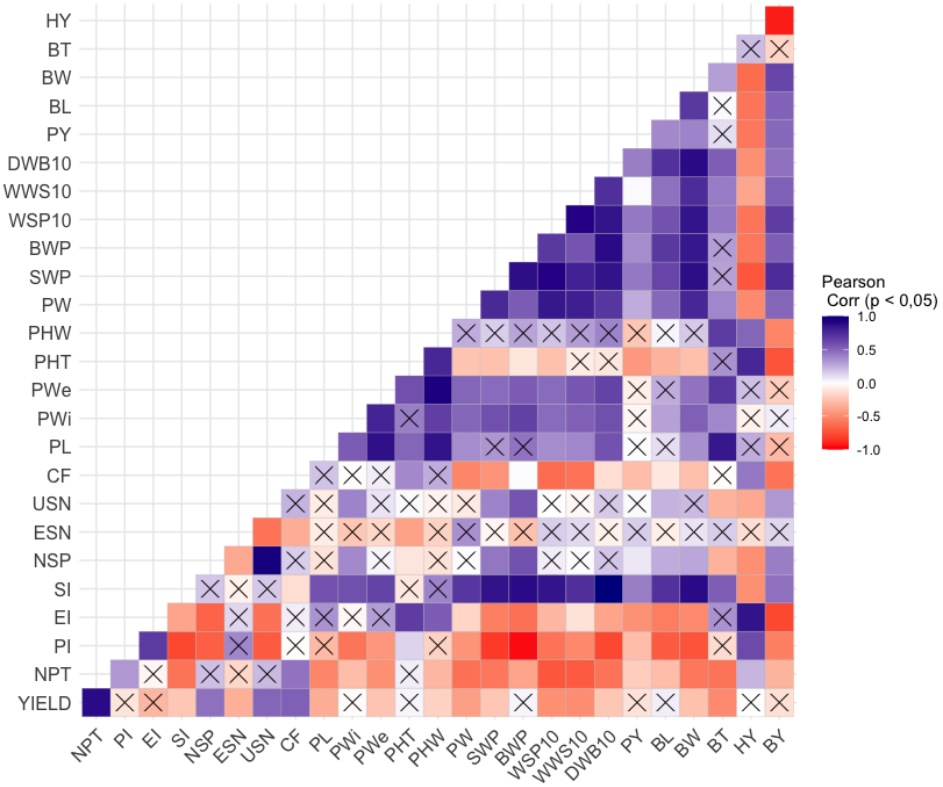


Figura 1. Correlação entre 26 componentes de produção de cinco cultivares clonais de cacau (CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49 e FA 13) do 5° ao 6° ano, de 4 áreas experimentais, nos anos de 2020 a 2022. Ausência de × indica significância pela correlação de Pearson ($p<0,05$).

Características: YIELD; Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY). n = 60 unidades experimentais.

A decomposição dos coeficientes de trilha de 25 características em efeitos diretos (na horizontal) e indiretos (vertical) para produtividade, é mostrada na Tabela 2. A análise apresentou alto coeficiente de determinação (R^2 = 0,99) e o efeito da variável residual de (0,01).

A análise das correlações dos componentes de produção em efeitos diretos e indiretos, por meio da análise de trilha, permitiram entender que apesar do significativo efeito total do NPT (0,9), não possui efeito direto com YIELD (Tabela 2). A associação com YIELD é explicada pelos efeitos indiretos positivos de NPT com PL, PW, CF, PI e BT, além disso, efeitos indiretos negativos com PHW, SWP, BWP, USN, DWB10 e BW (Tabela 2). Isso evidencia que o número de frutos por plantas de cacau é altamente influenciado pelo tamanho do fruto, peso da placenta, rendimento de polpa, índice de fruto e espessura de amêndoas. Além disso, o aumento do peso de casca, sementes, amêndoas e largura de amêndoa reduz o número de frutos por planta. NSP, por sua vez, além de ter apresentado significativo efeito total (0,7), também apresentou efeito direto (0.8) com YIELD (Tabela 2). O aumento do NSP é explicado pelos efeitos indiretos do tamanho do fruto, peso de sementes e largura de semente.

Os efeitos totais de PL e BT de magnitude -0,8 e -0,9 respectivamente, indicaram que quanto menor o fruto e espessura da amêndoa, maior a produtividade (Tabela 2). Os componentes de produção que apresentaram maiores efeitos diretos com a produtividade foram PL, PW, BWP, USN, PI, e BW. O PL é influenciado pelo efeito indireto principalmente com PHW. PW, e possui efeito indireto principalmente de PL, BWP, PI, BW. O efeito indireto de BWP é influenciado por PL e BW. O USN também possui efeito indireto com PL, BWP, NSP, PI, EI e BY. PI está associado principalmente ao peso de amêndoas. BW está mais associado com PL, PW e BWP.

O SI, além de não possuir correlação significativa com YIELD (Figura 1), também não apresentou efeito direto (Tabela 2). No entanto, SI apresentou grande efeito indireto de PL. O aumento do SI também pode ser explicado pelos efeitos indiretos de PW, BWP, PI e BW.

Tabela 2. Efeitos diretos e indiretos da análise de trilha de 25 componentes de produção sobre a produtividade de cinco cultivares clonais de cacau (CCN 51, PS 1319, SJ 02, CP 49 e FA 13) do 5° ao 6° ano, de 4 áreas experimentais, nos anos de 2020 a 2022.

	EFEITO	PL	PWi	PWe	PHT	PHW	PW	SWP	BWP	NSP	ESN	USN	WSP10	WWS10	DWB10	CF	PY	SI	PI	EI	BL	BW	BT	HY	BY	NPT
D	YIELD	-4	1	0	1	2	-2	1	2	1	-1	-3	-1	-1	2	-1	-1	0	3	-1	-1	2	-1	-1	-1	0
I	PL		-3	-4	-2	-4	-2	-2	-2	1	0	1	-2	-2	-3	-1	-2	-3	1	-2	0	-2	-4	-1	1	3
I	PWi	0		1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	1	0	0	0	0
I	PWe	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	PHT	0	0	0		1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
I	PHW	2	1	2	1		0	0	1	-1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	2	1	-1	-1
I	PW	-1	-1	-1	1	0		-2	-1	0	-1	0	-2	-2	-2	2	-2	-2	1	1	-1	-2	-1	2	-1	2
I	SWP	0	1	1	0	0	1		1	1	0	0	1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0	-1	1	-1
I	BWP	1	2	2	0	1	2	2		1	0	1	2	2	2	-1	2	2	-2	-2	2	2	1	-2	2	-2
I	NSP	0	0	0	0	0	0	0	0		0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
I	ESN	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	USN	1	-1	0	0	1	0	-1	-1	-3	2		0	0	0	-1	0	0	1	2	0	-1	1	1	-1	-1
I	WSP10	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	0	0	0		-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1
I	WWS10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I	DWB10	1	2	2	0	1	2	2	2	0	0	0	2	2		-1	2	2	-2	-1	2	2	1	-1	1	-2
I	CF	0	0	0	-1	-1	1	1	0	0	1	0	1	1	1		1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	0

I	PY	0	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1	1		-1	1	1	-1	-1	0	1	-1	1
I	SI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
I	PI	-1	-2	-1	1	0	-2	-2	-3	-2	1	-1	-2	-2	-2	1	-2	-2		2	-2	-2	-1	2	-2	1
I	EI	0	0	0	-1	-1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	-1	1	1	-1		1	1	0	-1	1	0
I	BL	0	0	0	1	0	-1	-1	-1	0	0	0	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1		-1	0	1	-1	0
I	BW	1	1	1	-1	0	2	2	2	1	0	0	2	2	2	-1	2	2	-2	-1	1		1	-1	1	-1
I	BT	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	1
I	HY	0	0	0	-1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	-1	1	0	-1	-1	1	1	0		1	0
I	BY	0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0	1		0
I	NPT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	TOTAL	-0.8	-0.3	-0.7	-0.1	-0.7	-0.6	-0.3	-0.3	0.7	-0.5	0.7	-0.5	-0.5	-0.6	0.2	-0.4	-0.6	0.1	-0.4	-0.2	-0.4	-0.9	-0.1	0.2	0.9

D: Direta; I: Indireta. Características: YIELD; Pod length (PL); Pod width (PWi); Pod husk thickness (PHT); Bean length (BL); Bean width (BW); Bean thickness (BT); Number of seeds per pod (NSP); Empty seeds per pod (ESP); Usable seeds per pod (USP); Pod weight (PWe); Pod husk weight per pod (PHW); Pod placenta weight (PPW); Wet seed weight per pod (SWP); Bean dry weight per pod (BWP); Weight of 10 seeds with pulp (WSP10); Wet weight of 10 seeds (WWS10); Dry Weight of 10 beans (DWB10); Number of pods per tree (NPT); Conversion factor (CF); Seed index (SI); Efficiency index (EI); Pod index (PI); Pulp yield (PY); Husk yield (HY); Beans yield (BY)

4. Discussão

Cultivares clonais de cacaueiro com características superiores e mais produtivas não apenas aumentam a renda dos agricultores (Ahnert, 2009), mas também reduzem a pressão por atividades que causam desmatamento para expansão agrícola (Vaast & Somarriba, 2014). Nesse sentido, é crucial selecionar características que melhor expressam o potencial de melhoramento do cacau. No Brasil, o melhoramento genético visa desenvolver cultivares clonais capazes de alcançar uma produtividade superior a 3.000 kg/ha/ano, com baixo índice de frutos e amêndoas com peso superior a 1g (Ahnert et al., 2018). As cultivares clonais analisadas apresentaram um média superior de produtividade de 3.780 kg/ha (Tabela 1). Superando a produtividade média anual na Bahia de 262 kg/ha (IBGE, 2023). Por isso, o desenvolvimento de cultivares de cacau de alta produtividade enfrenta desafios significativos devido à complexidade inerente à produção de amêndoas (Dias & Resende, 2001).

A análise de variância indicou alta variabilidade para a maioria dos componentes de produção entre as cultivares clonais testadas (Tabela 1). Isso é fundamental para a seleção de características e de cultivares de maior interesse. A ausência de significância para CF, PY e YIELD sugere que esses componentes podem ser menos influenciados pelo genótipo e mais dependentes de fatores ambientais ou de manejo, como já observado em outras culturas (Cruz et al., 2021).

A herdabilidade elevada para a maioria das características indica que a seleção pode ser eficaz em promover ganhos genéticos estáveis ao longo das gerações (Tabela 1). Nesse contexto, umas das teorias é que características que se desenvolvem em um curto período, estariam menos sujeitas ao ambiente e por isso, apresentam maior herdabilidade (Borém et al., 2017). Do mesmo modo, quanto maior o período fenológico de desenvolvimento de uma característica, menor é a herdabilidade (Borém et al., 2017). Essa teoria corrobora com os resultados deste estudo, pois YIELD é afetada pelo ambiente durante todo o ciclo da cultura (Tabela 1). No entanto, em contraponto aos valores de herdabilidade encontrados no presente estudo NPT (h^2 = 91.3), NSP (h^2 = 91.8), BWP (h^2 = 97.6) e SI (h^2 = 98.9) (Tabela 1). Outros autores encontraram valores de herdabilidade menores para a maioria das características. Uma baixa herdabilidade foi observada para NPT (h^2 = 0.14) e peso seco de amêndoa por árvore (h^2 = 0.24) (Solís et al., 2021), e para NSP (h^2 = 17.89) (Alexandre et al., 2015). Apenas SI foi semelhante à herdabilidade encontrada por Solís et al., 2021 (h^2 = 0.99) e próxima a encontrada Alexandre et al., 2015

(h^2 = 80.33). Solís et al. (2022) argumentam considerar outros componentes de produção de maior herdabilidade como peso seco de amêndoas por fruto, mas que possuem correlação com NPT para selecioná-la de forma indireta.

O coeficiente de variação genético moderado a alto, com valores variando de 3,3% a 70,1%, reforça a existência de material genético promissor para o melhoramento, especialmente para características com maior variabilidade, como ESN (Tabela 1). No entanto, os baixos coeficientes de variação para a maioria das características (<30%) indicam que a resposta à seleção pode ser limitada para algumas delas (Tabela 1). Pois um CVG alto indica que a característica pode ser altamente influenciada por fatores genéticos e sugere maior potencial de seleção. Esses resultados corroboram com a literatura sobre genética quantitativa, que destaca a complexa interação entre genes e ambiente no controle de características de interesse (Cruz et al., 2021). Segundo Cilas et al., (2022), o período de avaliação dos componentes de produção a partir do 4º ano, permite uma estimativa confiável do potencial de desempenho do cacau, com correlação genética acima de 0,85. Segundo Dias & Kageyama (1997) para as variáveis NSP e SWP um período mínimo de colheitas sucessivas de dois anos, são suficientes para predizer o valor real dos genótipos, com 90% de determinação.

Assim, estratégias de melhoramento devem considerar não apenas a herança genética, mas também o ambiente e o manejo, para maximizar o desempenho produtivo de futuras cultivares. Estudos de variabilidade genética fornecem informações básicas sobre as propriedades genéticas da população com base nas quais métodos de melhoramento são formulados para melhoria adicional da cultura (Sonu et al., 2018). Segundo Dias & Resende (2001), as variáveis que melhor discriminam características desejáveis para o produtor, são número de frutos, número de sementes, índice de fruto e índice de semente. Para Maharaj et al. (2020), as características de maior valor econômico incluem número de amêndoas, índice de semente, peso total de semente e índice de fruto. Segundo o método de seleção de matrizes para produção, são baseadas nas características de índice de fruto e índice de semente, com o objetivo de reter materiais com alto número de frutos por planta e sementes grandes (Dias & Resende).

A correlação de Pearson revelou uma correlação altamente significativa entre YIELD e NPT, evidenciou que a produtividade depende principalmente do número de frutos por planta (Figura 1). O coeficiente de correlação de Pearson ajudou a verificar a colinearidade de variáveis independentes (Shrestha, 2020). A análise de trilha, por sua vez, forneceu uma compreensão detalhada sobre como diferentes componentes de

produção influenciam a produtividade do cacau (YIELD), tanto de forma direta quanto indireta (Tabela 2). Apesar da produção de amêndoas ser uma característica poligênica e influenciada por várias características de rendimento (Ahnert, 2009; Maharaj et al., 2019; Ngidi et al, 2024), esse estudo evidenciou a importância de desagregar a correlação entre a produção de amêndoas e seus componentes em efeitos diretos e indiretos. Essa abordagem possibilitou uma análise aprofundada das interações complexas entre o rendimento e suas características, permitindo identificar se as influências afetam diretamente o rendimento ou seguem caminhos alternativos que, indiretamente, impactam a produção total (Solís et al., 2022). Além disso, essa desagregação facilitou a seleção de características que mais contribuem para o rendimento, proporcionando uma base para estratégias de seleção tanto direta quanto indireta (Ngidi et al, 2024).

As correlações de Pearson e a análise de trilha identificaram pares de variáveis explicativas que têm correlações muito elevadas, acima de 0,8 e 0,9, o NPT (Figura 1), bem como o NPT, BT e o PL (Tabela 2), que podem ser um sinal de multicolinearidade. Multicolinearidade é um problema que ocorre quando duas ou mais variáveis explicativas estão altamente correlacionadas entre si (Shrestha, 2020). Isso significa que essas variáveis fornecem informações redundantes ao modelo, dificultando a distinção de seus efeitos individuais sobre a variável dependente (Shrestha, 2020). Métodos de seleção de variáveis e os estimadores modificados podem ser usados para mitigar a multicolinearidade (Chan JY-L et al., 2022).

Embora o NPT tenha se destacado como uma das variáveis mais correlacionadas com a produtividade (Figura 1), sua associação é majoritariamente explicada por efeitos indiretos, como o PL, PW e BWP (Tabela 2). Isso sugere que, apesar da forte correlação entre NPT e produtividade, o NPT não atua isoladamente. Esses resultados sugerem que a seleção indireta no NPT melhoraria a eficiência da seleção para alto rendimento de amêndoas nessas cultivares, acelerando e reduzindo custos do que usar um número maior de características (Solís et al., 2022).

Na prática, o aumento na produção de frutos implica, frequentemente, na redução do número de semente, índice de semente, peso de amêndoas secas por fruto, peso do fruto e fator de conversão, com redução do peso de amêndoas devido a competição por fotoassimilados (Dias & Resende, 2001). No presente estudo, os resultados revelaram que o aumento de YIELD implica na redução de ESN, PL, PW, CF, PY, EI, BL, BT, HY e BY, bem como no aumento de PWi, PHT, PHW, SWP, BWP, NSP, PI e BW (Tabela 1).

Na análise de trilha, o aumento de YIELD, resultou em aumento de NPT, NSP e CF, bem como reduziu SI, PL, PWe, ESN, PW, SWP, BW, BT (Tabela 1).

Estudos conduzidos por Solís et al. (2022) com 22 famílias de irmãos completos, derivados de 14 cruzamentos recíprocos e oito cruzamentos diretos, buscaram otimizar a seleção para maior produtividade, avaliando componentes de produção similares aos do presente estudo. No entanto, os resultados de efeitos diretos e indiretos apresentaram divergências (Tabela 2). A análise de trilha realizada por Solís et al. (2022) identificou que o NPT exerceu os maiores efeitos diretos positivos sobre o peso seco de amêndoas por planta. Embora o NPT também tenha sido analisado no presente estudo, aqui a produtividade foi medida em kg/ha, e não apresentou efeito direto significativo (Tabela 2). No presente estudo, o peso seco de amêndoas por fruto apresentou um efeito direto positivo sobre YIELD e um efeito indireto através de NPT (Tabela 2). Em relação ao SI, ambos os estudos não evidenciaram efeitos diretos sobre a produção, mas detectaram efeitos indiretos via peso seco de amêndoas (Solís et al., 2022). De forma similar, o PI apresentou efeitos diretos positivos sobre a produção em ambos os estudos (Solís et al., 2022).

O NSP demonstrou um impacto direto significativo na produtividade, sendo um componente também relevante para a produção de amêndoas. O aumento do NSP é associado a características como o tamanho do fruto e peso das sementes, sugerindo que estratégias de melhoramento genético focadas em maximizar a produtividade devem priorizar essas características. As variáveis PL e BT, com magnitudes negativas, indicam que frutos menores e com amêndoas de menor espessura favorecem mais NSP e NPT, e consequentemente a produtividade. Esses resultados estão alinhados com estudos anteriores, que apontam que a competição por fotoassimilados dentro do fruto pode reduzir tanto o tamanho de fruto e semente (Dias & Resende, 2001). No entanto, como constatado neste estudo, geram o aumento de NPT e produtividade. Do mesmo modo, BWP e SWP influenciam negativamente o NPT, revelando uma relação complexa entre peso de sementes/amêndoas e a quantidade de frutos.

Esses resultados comprovam que as variáveis com correlações fortes, tanto positivas quanto negativas, não podem ser consideradas os principais determinantes da variável básica YIELD (Figura 1). Por sua vez, os efeitos diretos e indiretos devem ser o foco principal de análises adicionais para entender suas contribuições ao comportamento e possuem diferentes níveis de influência em YIELD. Estudos de Sodré & Nery (2023) apontaram para o uso de outra característica biométrica mais adequada para avaliação da

produtividade, a relação entre massas frescas de frutos e amêndoas (RFA). Característica parecida foi analisada no presente estudo, no entanto foi denominada IE, apesar de não ter apresentado correlação significativa com produtividade (Figura 1), evidenciou efeito direto negativo com YIELD (Tabela 2).

Os resultados indicam que o NPT é fortemente influenciado por fatores indiretos, como peso do fruto e peso das sementes, com variações nessas interações ao longo do tempo (Dessauw et al., 2024). Esses achados têm implicações para o manejo agronômico, sugerindo que práticas como poda seletiva, controle de pragas e adubação devem ser ajustadas para maximizar o tamanho e a quantidade de frutos, otimizando o uso de recursos e insumos. Além disso, o manejo fitossanitário exerce influência direta sobre o número de frutos saudáveis (Dessauw et al., 2024), reforçando a importância de práticas adequadas para o aumento de produção. Além disso, a seca também é considerada um dos fatores mais limitantes da produção de cacau, podendo ser intensificada pelas mudanças climáticas globais (Santos et al., 2018). No estudo de Santos et al. (2018) foi evidenciado que os diâmetros do caule e da raiz, além da biomassa seca do caule, tiveram os maiores efeitos diretos no volume da raiz sob condições de seca, sendo características recomendadas para a triagem de progênies de cacau tolerantes à seca.

A relevância de maximizar a produtividade por planta é ainda maior quando se considera a pressão para expandir os plantios de cacau em áreas de floresta nativa para atender a demanda de cacau (Vaast & Somarriba, 2014). Essa relação entre produtividade e sustentabilidade pode ser aprofundada, destacando que uma maior produtividade por hectare, sem aumento da área plantada, é crucial para preservar a biodiversidade e os ecossistemas sensíveis onde o cacau é cultivado, como na região da Mata Atlântica. Para evitar mais desmatamento e expansão de lavouras de cacau para outras áreas sensíveis, é necessário avaliar oportunidades para aumentar a produtividade em terras existentes para atender à crescente demanda por cacau (Asante et al., 2022). Além disso, com Ahnert (2009), cultivares mais produtivas aumentam a renda de pequenos agricultores. E o aumento de produtividade com sombra, aumenta a capacidade dos pequenos produtores de se adaptarem às mudanças globais causadas pela pressão demográfica, segurança alimentar, volatilidade do preço do cacau e mudanças climáticas (Vaast & Somarriba, 2014).

Em termos práticos, esses resultados evidenciam a importância de considerar múltiplos fatores ao selecionar genótipos para o melhoramento genético do cacau. Focar em características isoladas, como o NPT, pode não ser a melhor alternativa, uma vez que

suas interações indiretas podem contrabalançar seu impacto direto, além de estar associada a um efeito de multicolinearidade. A identificação de características que maximizem tanto o número de frutos quanto a qualidade das amêndoas é essencial para aumentar a produtividade. De acordo com Ahnert (2009), o desenvolvimento de cultivares clonais com alta produtividade é um desafio, devido à complexidade da produção de amêndoas e à necessidade de integrar múltiplas características de interesse agronômico. Os melhoristas de cacau no mundo definem e buscam características ideais em seus programas de melhoramento (Ahnert, 2009).

Por fim, o alto coeficiente de determinação (R^2 = 0,99) observado na análise confirma a robustez do modelo, indicando que os componentes de produção estudados explicam a maior parte da variação na produtividade. Isso fornece uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de manejo e melhoramento genético que considerem tanto os efeitos diretos quanto os indiretos dos componentes de produção do cacau (Dias & Resende, 2001; Solís et al., 2022).

5. Conclusões

Os resultados mostraram correlação positiva mais forte entre a produtividade e o número de frutos por planta. A decomposição dos coeficientes de trilha revelou que, embora o número de frutos por planta tenha apresentado um efeito total significativo sobre a produtividade, seu efeito direto não foi significativo. A influência do NPT é explicada por efeitos indiretos, principalmente a partir do tamanho do fruto, peso da placenta e peso de amêndoas, tamanho de frutos e amêndoas foram inversamente relacionados à produtividade. O maior número de sementes por fruto e índice de frutos, influenciam YIELD devido ao efeito direto positivo significativo. Este estudo contribui para uma compreensão mais detalhada das interações complexas entre os componentes de produção de cacau, auxiliando na identificação e seleção das características mais importantes que apresentam associação com a produtividade. A alta variabilidade genética observada entre os clones analisados, associada à herdabilidade elevada para características chave, demonstra que há grande potencial para ganhos genéticos por meio da seleção de características específicas. Todas as características de interesse apresentaram alta herdabilidade, exceto YIELD, pois é mais afetada pelo ambiente durante todo o ciclo da cultura. Tais achados são úteis em programas de melhoramento e na escolha em campo de cultivares clonais mais produtivas.

6. Referências bibliográficas

AHNERT, D. Ideotype breeding in cocoa. In: ESKES, A. B.; EFRON, Y.; END, M. J.; BEKELE, F. (Eds.). *Proceedings of the International Workshop on Cocoa Breeding for Farmers'*, San José, Costa Rica, 2006. INGENIC and CATIE, UK and Costa Rica, 2009. p. 157-167. Disponível em: https://www.incocoa.org/data/ingenic_workshop_5_proceedings_2006.pdf#page=169. Acesso em: set. 2024.

AHNERT, D.; MELO, H. L.; SANTOS, F. F. J.; LIMA, L. R.; BALIGAR, V. C. Melhoramento genético e produtividade do cacau no Brasil. In: SOUZA JUNIOR, J. O. (Org.). *Cacau: cultivo, pesquisa e inovação*. Ilhéus: Editus, 2018. p. 151-181.

AHNERT, D.; ESKES, A. B. Sustainable cocoa cultivation. In: UMAHARAN, P. (Ed.). *Achieving sustainable cultivation of cocoa*. Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing, 2018. p. 1-44. DOI: 10.1201/9781351114547.

ALEXANDRE, R. S.; CHAGAS, K.; MARQUES, H. I. P.; COSTA, P. R.; CARDOSO FILHO, J. Caracterização de frutos de clones de cacau na região litorânea do município de São Mateus, ES. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 8, p. 785-790, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p785-790.

ALMEIDA, C. M. V. C.; DIAS, L. A. S.; SILVA, A. P. Agronomic characterization of cacao accessions. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 44, n. 4, p. 368-373, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000400006.

ALMEIDA, C. M. V. C.; VENCOVSKY, R.; CRUZ, C. D.; BARTLEY, B. G. D. Análise de caminho de componentes de rendimento de híbridos de cacau (*Theobroma cacao L.*). *Revista Brasileira de Genética*, v. 17, n. 2, p. 181-186, 1994.

ASANTE, P. A. et al. The cocoa yield gap in Ghana: A quantification and an analysis of factors that could narrow the gap. *Agricultural Systems*, v. 201, p. 103473, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2022.103473.

BARTLEY, B. G. D. The genetic diversity of cacao and its utilization. Cambridge: CABI Publishing, 2005. 341 p.

CARVALHO, C. G. P. D.; ALMEIDA, C. M. V. C. D.; CRUZ, C. D.; MACHADO, P. F. R. Avaliação e seleção de híbridos de cacaueiro em Rondônia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, p. 1043-1051, 2001. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000800006.

CHIAPETTI, J. Produção de cacau na Bahia: análise da trajetória política e econômica. In: SOUZA JUNIOR, J. O. (Org.). *Cacau: cultivo, pesquisa e inovação*. Ilhéus: Editus, 2018. p. 13-34.

DIAS, L. A. S.; RESENDE, M. D. V. Selection strategies and methods. In: DIAS, L. A. S. (Org.). *Melhoramento genético do cacaueiro*. Fundação de Apoio à Pesquisa - UFG, 2001. p. 578.

DIAS, L. A. S.; KAGEYAMA, P. Y. Temporal stability of multivariate genetic divergence in cacao (*Theobroma cacao L.*) in Southern Bahia conditions. *Euphytica*, v. 93, p. 181-187, 1997. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1002991915978.

DOARÉ, F.; RIBEYRE, F.; CILAS, C. Genetic and environmental links between traits of cocoa beans and pods clarify the phenotyping processes to be implemented. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-020-66969-9.

DUVAL, A.; GEZAN, S. A.; MUSTIGA, G.; STACK, C.; MARELLI, J. P.; CHAPARRO, J.; LIVINGSTONE, D.; ROYAERT, S.; MOTAMAYOR, J. C. Genetic parameters and the impact of off-types for *Theobroma cacao L.* in a breeding program in Brazil. *Frontiers in Plant Science*, v. 8, 2017. DOI: https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02059.

ENGELS, J. M. M. The systematic description of cacao clones and its significance for taxonomy and plant breeding. 1986. Doctoral Thesis. Agricultural University, Wageningen. Disponível em: https://www.proquest.com/openview/cd30dbb014ef4e56288a84c2d761f672/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y. Acesso em: set. 2024.

CHAN, J. Y. L.; LEOW, S. M. H.; BEA, K. T.; CHENG, W. K.; PHOONG, S. W.; HONG, Z. W.; CHEN, Y. L. Mitigando o problema da multicolinearidade e sua abordagem de aprendizado de máquina: uma revisão. *Matemática*, v. 10, n. 8, p. 1283, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/math10081283.

CRUZ, C. D. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum*, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013. DOI: https://doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; BHERING, L. L. Biometry in plant breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 21, spe, e380621S5, 2021. DOI: https://doi.org/10.1590/1984-70332021v21Sa18.

CRUZ, C. D. Programa GENES - Aplicativo Computacional em Genética e Estatística. Viçosa, MG: Editora UFV, 1997. 442 p.

DESSAUW, D.; PHILLIPS-MORA, W.; MATA-QUIRÓS, A.; et al. Comportamento temporal da produção de clones de cacau ao longo de 18 anos. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 44, n. 34, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s13593-024-00967-3.

DOARÉ, F.; RIBEYRE, F.; CILAS, C. Genetic and environmental links between traits of cocoa beans and pods clarify the phenotyping processes to be implemented. *Scientific Reports*, v. 10, Article 9888, 2020.

FERNANDES, L. D. S.; CORREA, F. M.; INGRAM, K. T.; ALMEIDA, A. A. F.; ROYAERT, S. QTL mapping and identification of SNP-haplotypes affecting yield components of *Theobroma cacao L. Horticulture Research*, v. 7, 2020. DOI: https://doi.org/10.1038/s41438-020-0250-3.

GALILI, T.; O'CALLAGHAN, A.; SIDI, J.; SIEVERT, C. Heatmaply: An R package for creating interactive cluster heatmaps for online publishing. *Bioinformatics*, v. 34, n. 9, p. 1600-1602, 2018. DOI: https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btx657.

GUIRLANDA, C. P.; SILVA, G. G.; TAKAHASHI, J. A. Cocoa honey: Agro-industrial waste or underutilized cocoa by-product? In: *Future Foods*, v. 4, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100061.

JAIMEZ, R. E.; BARRAGAN, L.; FERNÁNDEZ-NIÑO, M.; WESSJOHANN, L. A.; CEDEÑO-GARCIA, G.; SOTOMAYOR CANTOS, I.; ARTEAGA, F. *Theobroma cacao L.* cultivar CCN 51: A comprehensive review on origin, genetics, sensory properties, production dynamics, and physiological aspects. *PeerJ*, v. 10, e12676, 2022. DOI: https://doi.org/10.7717/peerj.12676.

ICCO. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, v. L, n. 2, Cocoa year 2023/24. 31 maio 2024. Disponível em: https://www.icco.org/wp-content/uploads/Production_QBCS-L-No.-2.pdf. Acesso em: set. 2024.

LOPES, U. V.; MONTEIRO, W. R.; AHNERT, D.; et al. Cacao breeding in Bahia, Brazil: Strategies and results. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 11, spe, 2011.

LOPES, U. V.; MONTEIRO, W. R.; PIRES, J. L.; CLEMENT, D.; YAMADA, M. M.; GRAMACHO, K. P. Plant breeding in Bahia, Brazil - strategies and results. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v. 1, 2011. DOI: https://doi.org/10.1590/S1984-70332011000500011.

LOPES, U. V.; PIRES, J. L.; GRAMACHO, K. P.; GRATTAPAGLIA, D. Genome-wide SNP genotyping as a simple and practical tool to accelerate the development of inbred lines in outbred tree species: An example in cacao (*Theobroma cacao L.*). *PLoS ONE*, v. 17, n. 10, e0270437, 2022. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0270437.

MAHARAJ, K.; BEKELE, F. L.; RAMNATH, D.; SANKAR, R.; BEKELE, I.; BIDAISEE, G. G.; MAHARAJ, P.; JENNINGS, K. Selection of putative relic cacao (*Theobroma cacao L.*) genotypes in farmers' fields in Trinidad and Tobago. *Tropical Agriculture (Trinidad)*, v. 96, 2019. DOI: https://doi.org/10.37234/TA96012019/0000960101.

MONTEIRO, W. R.; AHNERT, D. Genetic improvement of the cocoa tree. In: VALLE, R. R. (Ed.). *Cocoa Science, Technology and Management*. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC/SEFIS, 2012. p. 357-376.

NGIDI, A.; SHIMELIS, H.; ABADY, S. et al. Genetic variation and association of yield, yield components, and carbon storage in sorghum (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) genotypes. *BMC Genomics Data*, v. 25, n. 74, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s12863-024-01256-4.

OKSANEN, F. J.; SIMPSON, G. L.; BLANCHET, F. G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MINCHIN, P. R.; et al. Vegan: Community Ecology Package. R package Version 2.4-3. 2017. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=vegan. Acesso em: 01 jul. 2022.

PEREIRA, A. S.; DE ALMEIDA, A. A. F.; BRANCO, M. C. D. S.; COSTA, M. G. C.; AHNERT, D. Combining ability, heritability and genotypic relations of different physiological traits in cacao hybrids. *PLoS ONE*, v. 12, n. 6, e0178790, 2017. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178790.

PORTO, B. H. C. Produtividade de cultivares clonais de cacaueiro (*Theobroma cacao L.*) em função de métodos de renovação das lavouras e de atributos edáficos e fisiográficos. 2024. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal – PPGPV, Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Ilhéus, BA.

SANTOS, R. C.; PIRES, J. L.; CORRÊA, R. X. Morphological characterization of leaf, flower, pod, and seed traits among Brazilian *Theobroma L.* species. *Genetic Resources and Crop Evolution*, v. 59, p. 327-334, 2012.

SANTOS, E. A. dos; ALMEIDA, A. A. F. de; BRANCO, M. C. dos S.; SANTOS, I. C. dos; AHNERT, D.; BALIGAR, V. C.; et al. Path analysis of phenotypic traits in young cacao plants under drought conditions. *PLoS ONE*, v. 13, n. 2, e0191847, 2018. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191847.

SHRESTHA, N. Detecting multicollinearity in regression analysis. *American Journal of Applied Mathematics and Statistics*, v. 8, n. 2, p. 39-42, 2020. DOI: https://doi.org/10.12691/ajams-8-2-1.

SOLÍS, B. J. L.; LOPES, V. U.; ZAMARRIPA, C. A.; MARTINEZ, V. B. B.; AVENDAÑO, A. C. H.; GRAMACHO, P. K. Estimation of genetic parameters associated with frosty pod rot (*Moniliophthora roreri*) and cacao production in Mexico. *Tree Genetics & Genomes*, v. 17, p. 24, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11295-021-01498-8.

SOLÍS BONILLA, J. L.; VANDERLEI LOPES, U.; ZAMARRIPA COLMENERO, A.; et al. Path analyses define criteria that allow to reduce costs in a breeding population of cacao (*Theobroma cacao L.*). *Tree Genetics & Genomes*, v. 18, p. 25, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s11295-022-01554-x.

KUMAR, S.; CHAUHAN, M. P.; TOMAR, A.; KASANA, R. K. Coefficient of variation (GCV & PCV), heritability and genetic advance analysis for yield contributing characters in rice (*Oryza Sativa L.*). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, v. 7, n. 3, p. 2161-2164, 2018.

THONDAIMAN, V.; RAJAMANI, K. Correlation and path coefficient analysis of yield components in cocoa (*Theobroma cacao L.*). *Journal of Plantation Crops*, v. 42, n. 3, p. 358-363, 2024.

VAAST, P.; SOMARRIBA, E. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. *Agroforestry Systems*, v. 88, p. 947-956, 2014. DOI: https://doi.org/10.1007/s10457-014-9762-x.

WRIGHT, S. The Method of Path Coefficients. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 5, n. 3, p. 161-215, 1934. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/2957502.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES GERAIS

A cacauicultura enfrenta desafios relacionados à baixa produtividade das lavouras, atribuída a mudanças climáticas e ao envelhecimento das plantações, bem como a práticas agrícolas inadequadas. Diante do cenário de crescente demanda por produtos à base de cacau e flutuações acentuadas nos preços do produto, é evidente a necessidade urgente de pesquisas focadas nos componentes de produção cacau. A renovação de lavouras com cultivares clonais mais produtivas e resistentes a doenças, combinada com boas práticas de manejo, e o adequado sombreamento, pode contribuir significativamente para aumentar a produtividade da cultura.

Os resultados obtidos indicam que a renovação das lavouras cacaueiras, por meio da utilização de clones com características agronômicas superiores, é uma estratégia promissora para superar os desafios relacionados à baixa produtividade na região. O presente estudo é útil para identificar e nortear padrões complexos dos componentes de produção de clones de cacau brasileiros em comparação com cultivar clonal internacional. Clones como FA 13, PS 1319 e SJ 02 mostraram-se mais produtivos em comparação ao clone CCN 51, evidenciando o potencial desses materiais para serem cultivados não apenas no sul da Bahia, mas também em outras regiões cacaueiras que enfrentam problemas semelhantes.

Apesar do CCN 51 ter obtido as melhores médias para a maioria das características agronômicas relacionadas ao tamanho e peso dos frutos e sementes/amêndoas analisadas. O FA 13 apresentou as melhores médias para as características que estimam produção, número de frutos por planta e número de sementes por fruto. Adicionalmente, PS 1319 e SJ 02 apresentaram maior similaridade morfológica e se destacaram em rendimento de polpa e qualidade sensorial, enquanto o CP 49 apresentou desempenho morfológico inferior aos demais clones.

Contrariando o esperado, interações complexas entre características morfológicas de frutos e clones revelaram que índice de fruto, índice de sementes, não possuem correlação com produtividade. O índice de fruto, índice de sementes e número de fruto por planta possuem relações inversas, quanto maior o número de frutos, maior o índice de frutos e menor o índice de sementes. A produtividade apresentou correlação positiva com o número de frutos por planta e número de sementes por fruto, e correlação negativa com comprimento de frutos e amêndoas, além de peso de fruto e casca. A decomposição dos coeficientes de trilha revelou que, embora o número de frutos por planta tenha

apresentado um efeito total significativo sobre a produtividade, seu efeito direto não foi significativo. A influência do NPT é explicada por efeitos indiretos, principalmente a partir do tamanho do fruto, peso da placenta e peso de amêndoas, tamanho de frutos e amêndoas foram inversamente relacionados à produtividade. Isso indica que outras características agronômicas podem ser utilizadas como estimadores de produtividade para selecionar clones de maior interesse agronômico e comercial.

Os resultados deste estudo indicam que os clones de cacau possuem variação dos componentes de produção em diferentes idades produtivas, sistemas de cultivo e safras. O sistema de cultivo com 80% de sombreado não difere do cultivo ao sol pleno quanto à produção de frutos, sendo recomendado o uso desse sistema sombreado, pois gera inúmeros benefícios socioambientais. A variação sazonal nos componentes de produção destaca a necessidade de considerar as condições climáticas no manejo agrícola dos clones, visando otimizar seu desempenho ao longo das diferentes safras e idades produtivas.

Frente aos desafios de baixa produtividade e pressões crescentes de doenças e pragas, em um cenário de mudanças climáticas e econômicas globais, a renovação das lavouras cacaueiras por clones produtivos e adaptados é crucial para sustentar a economia cacaueira global. Este estudo não apenas contribui para a compreensão das interações complexas dos componentes de produção de clones de cacau, mas também fornece informações práticas para programas de melhoramento genético e o cultivo de cacau. A continuidade das pesquisas nesta área é fundamental para garantir a sustentabilidade e a competitividade da cadeia produtiva do cacau, especialmente em um contexto de mudanças climáticas e pressões econômicas crescentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTARES

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.520:2023 - Citações em documentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023:2018 - Referências. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

AHNERT, D. Ideotype Breeding in Cocoa. In: ESKES, A. B.; EFRON, Y.; END, M. J.; BEKELE, F. (org.). Proceedings of the International Workshop on Cocoa Breeding for Farmers'. San José: INGENIC and CATIE, 2006. p. 157–167.

AHNERT, D. et al. Melhoramento genético e produtividade do cacaueiro no Brasil. In: SOUZA JÚNIOR, J. O. (org.). Cacau: cultivo, pesquisa e inovação. Ilhéus: Editus, 2018. p. 151–181.

AHNERT, D.; ESKES, A. B. Developments in cacao breeding programmes in Africa and the Americas. In: UMAHARAN, P. (org.). Achieving sustainable cultivation of cocoa. Cambridge, UK: Burleigh Dodds Science Publishing, 2018. p. 111–156.

ALBOUKADEL, K. Visualization of a correlation matrix using 'ggplot2'. Package. 0.1.4.1, 2023. Disponível em: http://www.sthda.com/english/wiki/ggcorrplot-visualization-of-a-correlation-matrix-using-ggplot2. Acesso em: 5 dez. 2024.

ALEXANDRE, R. S. et al. Pod characterization of cacao clones in the coastal region of São Mateus, ES. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, n. 8, p. 785–790, 2015.

ALMEIDA, A. A. F.; VALLE, R. R. Ecophysiology of the cacao tree. Brazilian Journal of Plant Physiology, v. 19, n. 4, p. 425–448, 2007.

ARIMI, K.; OMOARE, A. Motivating cocoa farmers to adopt agroforestry practices for mitigating climate change. Renewable Agriculture and Food Systems, v. 36, n. 6, p. 599–604, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1017/S1742170521000223. Acesso em: 5 dez. 2024.

BALIGAR, V.; ELSON, M.; ALMEIDA, A.; DE ARAÚJO, Q.; AHNERT, D.; HE, Z. Carbon dioxide concentrations and light levels on growth and mineral nutrition of juvenile cacao genotypes. American Journal of Plant Sciences, v. 12, p. 818–839, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.4236/ajps.2021.125056.

BIALE, J. B.; BARCUS, D. E. Respiratory pattern in tropical pods of the Amazon Bazin. Tropical Science, v. 12, n. 2, p. 93–104, 1967.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. V.; FRITSCHE-NETO, R. Melhoramento de plantas. 7. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2017.

CHEESMAN, E. Notes on the nomenclature, classification possible and relationships of cocoa populations. Tropical Agriculture (Trinidad), v. 21, p. 144–159, 1944.

CHIAPETTI, J. Cocoa production in Bahia: analysis of the political and economic trajectory. In: SOUZA JÚNIOR, J. O. (org.). Cocoa: cultivation, research and innovation. Ilhéus: Editus, 2018. p. 13–34.

CHIAPETTI, J. et al. Panorama da cacauicultura no Território Litoral Sul da Bahia (2015–2019). In: VANWEY, L. et al. (org.). Revelando desafios e oportunidades sociais, econômicas e ecológicas para restauração de florestas em propriedades rurais na Mata Atlântica do Sul da Bahia. Ilhéus, BA: Instituto Floresta Viva, 2020. p. 1–110. Disponível em: https://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/2020/05/Panorama-dacacauicultura-TILSB-Versao-final-Web.pdf. Acesso em: 9 nov. 2022.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S.; BHERING, L. L. Biometry in plant breeding. Crop Breeding and Applied Biotechnology, v. 21, spe, e380621S5, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1984-70332021v21Sa18.

CRUZ, C. D. Programa GENES - Aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa, MG: Editora UFV, 1997.

DANTAS NETO, A.; CORRÊA, R. X.; MONTEIRO, W. R.; LUZ, E. D.; GRAMACHO, K. P.; LOPES, U. V. Caracterização de uma população de cacaueiro

para mapeamento de genes de resistência à vassoura-de-bruxa e podridão-parda. Fitopatologia Brasileira, v. 30, p. 380–386, 2005.

DIAS, L. A. S.; KAGEYAMA, P. Y. Temporal stability of multivariate genetic divergence in cacao (*Theobroma cacao* L.) in Southern Bahia conditions. Euphytica, v. 93, p. 181–187, 1997.

DIAS, L. A. S.; RESENDE, M. D. V. Selection strategies and methods. In: DIAS, L. A. S. Melhoramento genético do cacaueiro. Fundação de Apoio à Pesquisa - UFG, 2001. p. 578.

DOARÉ, F.; RIBEYRE, F.; CILAS, C. Genetic and environmental links between traits of cocoa beans and pods clarify the phenotyping processes to be implemented. Scientific Reports, v. 10, 9888, 2020.

DUARTE, J. B. Biometria em genética e melhoramento de plantas: tendências e inquietações. In: Simpósio de atualização em genética e melhoramento de plantas: a genética quantitativa e de populações no Brasil, Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010.

DUVAL, A.; GEZAN, S. A.; MUSTIGA, G.; STACK, C.; MARELLI, J.-P.; CHAPARRO, J.; LIVINGSTONE, D., III; ROYAERT, S.; MOTAMAYOR, J. C. Genetic parameters and the impact of off-types for *Theobroma cacao* L. in a breeding program in Brazil. Frontiers in Plant Science, v. 8, art. 2059, p. 12, 2017.

ENGELS, J. M. M. The systematic description of cacao clones and its significance for taxonomy and plant breeding. 1986. Doctoral thesis. Agricultural University, Wagningen. 125 p.

FERNANDES, L. S. et al. QTL mapping and identification of SNP-haplotypes affecting yield components of *Theobroma cacao* L. Horticulture Research, v. 7, art. 26, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41438-020-0250-3.

FERREIRA, A. C. R. F.; AHNERT, D.; MELO NETO, B. A.; MELLO, D. L. N. Guia de beneficiamento de cacau de qualidade. Ilhéus, BA: Instituto Cabruca, 2013.

GALILI, T.; O'CALLAGHAN, A.; SIDI, J.; SIEVERT, C. Heatmaply: an R package for creating interactive cluster heatmaps for online publishing. Bioinformatics, v. 34, n. 9, p. 1600–1602, 2018.

GAMA-RODRIGUES, A. C. et al. Cacao-based agroforestry systems in the Atlantic Forest and Amazon biomes: an ecoregional analysis of land use. Agricultural Systems, v. 194, art. 103270, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103270.

SCHROTH, G.; LÄDERACH, P.; MARTINEZ-VALLE, A. I.; BUNN, C.; JASSOGNE, L. Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: patterns, opportunities and limits to adaptation. Science of The Total Environment, v. 556, p. 231–241, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.024.

HEMING, N. M.; SCHROTH, G.; TALORA, D. C. et al. Cabruca agroforestry systems reduce vulnerability of cacao plantations to climate change in southern Bahia. Agronomy for Sustainable Development, v. 42, art. 48, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13593-022-00780-w.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2023. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457#resultado. Acesso em: 17 out. 2023.

ICCO. Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. L, No. 2, Cocoa year 2023/24. Published: 31-05-2024. Disponível em: https://www.icco.org/wp-content/uploads/Production_QBCS-L-No.-2.pdf.

JAIMEZ, R. E. et al. *Theobroma cacao* L. cultivar CCN 51: a comprehensive review on origin, genetics, sensory properties, production dynamics, and physiological aspects. PeerJ, v. 9, p. 1–23, 2022.

JOSE, S. Environmental impacts and benefits of agroforestry. Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science, 2019. Disponível em: https://oxfordre.com/environmentalscience/view/10.1093/acrefore/9780199389414.001.0001/acrefore-9780199389414-e-195. Acesso em: 20 maio 2024.

LASS, R. A. (org.). Cocoa. 4. ed. London: Longman, 2001. p. 248–253.

LOUREIRO, G. A. H. A. Soil quality and cocoa quality. 2014. Master's thesis. State University of Santa Cruz - UESC, Ilhéus. (Unpublished).

LOPES, U. V. et al. Cacao breeding in Bahia, Brazil - strategies and results. Crop Breeding and Applied Biotechnology, v. 11, p. 73–81, 2011.

LOPEZ, A. S.; DIMICK, P. S. Cocoa fermentation. In: REED, G.; NAGODAWITHANA, T. W. Biotechnology. Amsterdam: Elsevier, v. 14, p. 562–577, 1995.

MACÊDO, M. et al. Clones de cacaueiro quanto a produtividade e incidência de VB e podridão parda. Agrotrópica, v. 33, n. 1, p. 5–16, 2021. Centro de Pesquisas do Cacau, Ilhéus, Bahia, Brasil. DOI: 10.21757/0103-3816.2021v33n1p5-16.

MANDARINO, E. P.; GOMES, A. R. S. Produtividade do cacaueiro (*Theobroma cacao* L.) cultivado em blocos monoclonais, no sul da Bahia, Brasil. Boletim Técnico CEPLAC, n. 197, p. 5–30, 2009.

MOTAMAYOR, J. C. et al. Cacao domestication I: the origin of the cacao cultivated by the Mayas. Heredity, v. 89, n. 5, p. 380–386, 2002.

MOTAMAYOR, J. C. et al. Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (*Theobroma cacao* L.). PLoS ONE, v. 3, n. 10, 2008.

MONTEIRO, W. R.; AHNERT, D. Genetic improvement of the cocoa tree. In: VALLE, R. R. Cocoa Science, Technology and Management. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC/SEFIS, 2012. p. 357–376.

MULLER, M. W.; VALLE, R. R. Ecofisiologia do cultivo do cacaueiro. In: VALLE, R. R. Ciência, tecnologia e manejo do cacaueiro. 2. ed. Brasília: CEPLAC, 2012. 688 p.

NOGUEIRA, R. F.; ROITMAN, I.; ALVIM CARVALHO, F. et al. Desafios para o manejo agroecológico e orgânico de agroecossistemas de cacau Cabruca em três assentamentos rurais no sul da Bahia, Brasil: percepções de atores locais. Agroforest Syst 93 , 1961–1972 (2019). https://doi.org/10.1007/s10457-018-0303-x

NOIA, A. C.; MIDLEJ, M. M. B. C.; ROMANO, J. O. A cacauicultura na região sul da Bahia: trajetória, crises e perspectivas. In: GOMES, A. S.; PIRES, M. M. (org.). *Cacauicultura: estrutura produtiva, mercados e perspectivas.* Ilhéus: Editus, 2015. 272 p. Disponível em: https://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2018/cacauicultura.pdf.

NOTARO, M.; COLLADO, C.; DEPAS, J. K. et al. The spatial distribution and height of associated crops influence cocoa tree productivity in complex agroforestry systems. Agronomy for Sustainable Development, v. 41, 60, 2021. DOI: 10.1007/s13593-021-00716-w.

OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. *Fundamentos de ciências e tecnologia de alimentos.* Barueri: Manole, 2006. 612 p.

OKSANEN, F. J. et al. Vegan: Community Ecology Package. R package Version 2.4-3. 2017. Disponível em: https://CRAN.R-project.org/package=vegan. Acesso em: 1 jul. 2022.

RODRÍGUEZ, T.; BONATTI, M.; LÖHR, K. et al. Analisando fatores de influência para ampliar sistemas agroflorestais na Colômbia: uma avaliação comparativa ex-ante da agricultura de cacau e da pecuária em duas regiões. Agroforestry Systems, v. 96, p. 435–446, 2022. DOI: 10.1007/s10457-022-00730-1.

SANTOS, E. A. d. et al. Path analysis of phenotypic traits in young cacao plants under drought conditions. PLoS ONE, v. 13, n. 2, e0191847, 2018. DOI: 10.1371/journal.pone.0191847.

SANTOS, R. C.; PIRES, J. L.; CORRÊA, R. X. Morphological characterization of leaf, flower, pod and seed traits among Brazilian *Theobroma* L. species. Genetic Resources and Crop Evolution, v. 59, p. 327–334, 2012.

SCHWAN, R. F. Cocoa fermentations conducted with a defined microbial cocktail inoculum. Applied and Environmental Microbiology, v. 64, n. 4, p. 1477–1483, abr. 1998.

SENAR. *Cacau: produção, manejo e colheita.* Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Rural, 2018. 145 p. (Coleção Senar, 215). ISBN: 978-85-7664-197-1.

SODRÉ, G. A.; MAGNO, A. E. S.; MONTEIRO, W. R. Cultivation of the cocoa tree in the state of Bahia. In: SODRÉ, G. A. (org.). Ilhéus: MAPA/CEPLAC/CEPEC, 2017. p. 9–26.

SOLÍS BONILLA, J. L. et al. Análises de caminho definem critérios que permitem reduzir custos em uma população de reprodução de cacau (*Theobroma cacao* L.). Tree Genetics & Genomes, v. 18, 2022. Article 25

STOROPOLI, J.; VILS, L. Estatística com R: relação entre variáveis – correlações. Disponível em: https://storopoli.github.io/Estatistica/5-Correlacoes.html. Acesso em: 11 jan. 2021.

THONDAIMAN, V.; RAJAMANI, K. Correlation and path coefficient analysis of yield components in cocoa (*Theobroma cacao* L.). Journal of Plantation Crops, v. 42, n. 3, p. 358–363, 2024.

VAAST, P.; SOMARRIBA, E. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. Agroforestry Systems, v. 88, p. 947–956, 2014. DOI: 10.1007/s10457-014-9762-x.

ZARRILLO, S. et al. The use and domestication of *Theobroma cacao* during the mid-Holocene in the upper Amazon. Nature Ecology and Evolution, v. 2, n. 12, p. 1879–1888, 2018. DOI: 10.1038/s41559-018-0697-x.

ZHANG, D.; MOTILAL, L. Origin, dispersal, and current global distribution of cacao genetic diversity. In: BAILEY, B.; MEINHARDT, L. (eds.). *Cacao Diseases.* Cham: Springer, 2016. p. 1–16. DOI: 10.1007/978-3-319-24789-2_1.

WRIGHT, S. The method of path coefficients. The Annals of Mathematical Statistics, v. 5, n. 3, p. 161–215, 1934. Disponível em: http://www.jstor.org/stable/2957502.

XAVIER, L. B.; NASCIMENTO Jr, F. D. C.; CHIAPETTI, J. Da crise regional às novas dinâmicas de especialização da produção de cacau no sul da Bahia. Caminhos de Geografia, v. 22, n. 79, p. 77–96, 2021.

WOOD, G. A. R.; LASS, R. A. *Cocoa.* 4. ed. London: Longman, 2001.

APÊNDICE

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

R444a Reunião Anual da SBPC (75. : 2023 : Curitiba, PR).
Anais/resumos da 75ª Reunião Anual da SBPC [recurso eletrônico], 23 a 29 de julho de 2023, UFPR, Curitiba, PR / Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. – São Paulo : SBPC, 2024.

Disponível em: https://livro.sbpcnet.org.br/75ra
ISSN 2176-1221

1. Ciência - Brasil - Congressos. 2. SBPC - Resumos. 3. Reunião Anual. I. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. II. Ciência e democracia para um Brasil justo e desenvolvido.

CDD 23. : Ciência - Brasil 509.81
Ficha catalográfica: Rosângela P. Batista - CRB-8 010465/O

ANEXOS

Tabela 1. Lista de variáveis traduzidas com siglas

VARIÁVEL PORTUGUÊS	VARIÁVEL INGLÊS	SIGLA	UNIDADE
SISTEMA	SYSTEM		
SOMBREADO	SHADE	SHADE	
PLENO SOL	FULL SUN	SUN	
SAFRA	CROP		
PRINCIPAL	MAIN CROP	MAIN	
TEMPORÃO	MINOR CROP	MINOR	
Comprimento do fruto (CF)	Pod length	PL	mm
Largura do fruto (LF)	Pod width	PWi	mm
Peso do fruto (PF)	Pod weight	PWe	g
Espessura da casca (EC)	Pod husk thickness	PHT	mm
Peso da casca (PC)	Pod husk weight	PHW	g
Peso da placenta (PP)	Placenta weight	PW	g
Peso de sementes (PS)	Wet seed weight per pod	SWP	g
Peso de amêndoas (PA)	Dry bean weight per pod	BWP	g
Número de sementes (NS)	Number of seeds per pod	NSP	nº
Número de sementes chochas (NSC)	Empty seeds per pod	ESN	nº
Número de sementes viáveis (NSV)	Usable seeds per pod	USN	nº
Peso de 10 sementes com polpa (PSP10)	Weight of 10 seeds with pulp	WSP10	g

Peso de 10 sementes úmidas (PSU10)	Wet weight of 10 seeds	WWS10	g
Peso de 10 amêndoas secas (PAS10)	Dry Weight of 10 beans	DWB10	g
Fator de conversão (FC)	Conversion factor	CF	
Rendimento polpa (RP)	Pulp yield	PY	%
Índice de semente (IS)	Seed index	SI	g
Índice de fruto (IF)	Pod index	PI	nº
Índice de eficiência (IE)	Efficiency Index	EI	g
Comprimento amêndoa (CA)	Bean length	BL	mm
Largura amêndoa (LA)	Bean width	BW	mm
Espessura amêndoa (EA)	Bean thickness	BT	mm
Rendimento casca (RC)	Husk yield	HY	%
Rendimento semente (RS)	Beans yield	BY	%
Frutos por planta (F/PL)	Number of pods per tree	NPT	nº
Comprimento das sépalas (CS)	Sepal length	SL	mm
Largura das sépalas (LS)	Sepal width	SW	mm
Comprimento das pétalas (CP)	Petal length	PL	mm
Largura das pétalas (LP)	Petal width	PWf	mm
Comprimento dos estaminóides (CE)	Staminode length	SL	mm
Comprimento do estilete (CEL)	Stigma length	SL	mm
Comprimento do ovário (CO)	Ovary length	OL	mm
Largura do ovário (LO)	Ovary width	OW	mm
Número de óvulos (NO)	Number of ovules	NO	nº

Óvulos:Sementes (O:S)	Ovules:Seeds (O:S)		
Qualidade Global	Overall Quality		
Acidez	Acidity		
Adstringência	Astringency		
Amadeirado	Woody		
Amargor	Bitterness		
Amendoado	Nutty		
Doce	Sweet		
Especiarias	Spices		
Floral	Floral		
Frutas Frescas	Fresh pods		
Frutas Marrons	Brown pods		
Sabor cacau	Cocoa Flavor		
Torrado	Roasted		
Off Flavor Animal/couro	Leather Off-Flavor		
Off Flavor Fumaça	Smoke Off-Flavor		
Off Flavor Mofado	Moldy Off-Flavor		
Off Flavor Sobrefermentado	Over-fermented Off-Flavor		
Off Flavor Sujo	Dirty Off-Flavor		