

**VIDOMAR DESTRO DE SOUZA FILHO**

**DESEMPENHO DE POPULAÇÕES DE MILHO SOB SELEÇÃO RECORRENTE  
EM DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTAS E EM BAIXO E ALTO  
NITROGÊNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Rodrigo Oliveira de Lima

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S729d  
2021 Souza Filho, Vidomar Destro de, 1996-  
Desempenho de populações de milho sob seleção recorrente em diferentes densidades de plantas e em baixo e alto nitrogênio / Vidomar Destro de Souza Filho. – Viçosa, MG, 2021.  
50 f. : il. ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Rodrigo Oliveira de Lima.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 41-47.

1. *Zea mays*. 2. Plantas - Populações. 3. Plantas - Efeito do nitrogênio. 4. Stress (Fisiologia). 5. Fertilização de plantas.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento.  
II. Título.

CDD 22. ed. 633.152

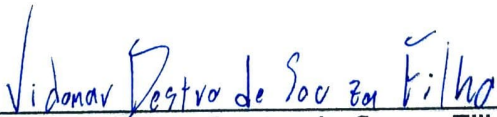
**VIDOMAR DESTRO DE SOUZA FILHO**


**DESEMPENHO DE POPULAÇÕES DE MILHO SOB SELEÇÃO RECORRENTE  
EM DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTAS E EM BAIXO E ALTO  
NITROGÊNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Magister Scientiae*

APROVADA: 22 de março de 2021.

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Vidomar Destro de Souza Filho  
Autor

  
\_\_\_\_\_  
Rodrigo Oliveira de Lima  
Orientador

A Vidomar Destro de Souza (*in memoriam*),  
meu pai, e ao amigo Leonardo Oliveira Pinto  
(*in memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

Ao trino Deus, infinito e pessoal, criador e sustentador dos céus, terra e de toda vida que neles há; sou grato por ser seu filho.

À minha mãe Francislaine, pelo amor incondicional.

À minha avó Maria Aparecida, por me apresentar a Fé em Jesus Cristo.

Ao meu pai Vidomar, pelo exemplo de homem trabalhador, honesto e bem-humorado.

Ao tio Leonard, por me apresentar à paixão pela música.

Ao amigo Leonardo, por sempre me lembrar de ter fé na providência divina.

A Ana Luiza pelo companheirismo.

Aos irmãos da Igreja Presbiteriana de Viçosa, pela amizade, ensinamentos, encorajamento e apoio, seja na festa ou no luto.

A todos os pais, mães e irmãos que encontrei na caminhada.

Ao Professor Rodrigo e amigos do Programa Milho-UFV, por todo investimento de tempo, amizade e paciência em meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento, pela organização e estrutura.

Aos professores Renan Lima e Fabiana Souza pela disposição e zelo na participação da banca de avaliação.

A UFV, por proporcionar uma das melhores estruturas de aprendizado e belas paisagens todos os dias.

Aos amigos da República Sola, pela convivência.

A Viçosa, por toda mudança que aqui passei

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

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

*“Grandes são as obras do SENHOR,  
Dignas de estudo para quem as ama.”  
(Salmos 111.2)*

## RESUMO

SOUZA FILHO, Vidomar Destro de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Desempenho de populações de milho sob seleção recorrente em diferentes densidades de plantas e em baixo e alto nitrogênio.** Orientador: Rodrigo Oliveira de Lima.

Os principais ganhos genéticos em produtividade obtidos em milho nos últimos 50 anos têm sido consequência do aumento da eficiência no uso de N e da adaptação de cultivares a maiores densidades populacionais. Assim, o objetivo foi avaliar o desempenho de seis populações de milho sob seleção recorrente (SR) em diferentes densidades populacionais e condições contrastantes de N. Para isso, dois experimentos foram realizados; um sob aplicação de 380kg de uréia em cobertura (AN) e outro sem adubação de N em cobertura (BN). Os experimentos foram conduzidos em DBC com esquema de parcela subdividida e três repetições. As parcelas constituídas de populações (P) de milho UFVM100, UFVM100(HS)C1, UFVM100(HS)C2, UFVM200, UFVM200(HS)C1 e UFVM200(HS)C2, e sub-parcelas constituídas por densidades populacionais (D) de 30, 45, 60, 75, 90 e 105 mil plantas ha<sup>-1</sup>. Os caracteres avaliados foram altura de planta (AP) e espiga (AE), área da folha da espiga (AF), diâmetro de colmo (DC), comprimento de entrenós abaixo (CEAB) e acima da espiga (CEAC), plantas acamadas e quebradas (AcQ), produtividade de grãos (PG), massa de 1000 grãos (P1000), número de fileiras (NFE), número de grãos (NGE), comprimento de grão (CG), comprimento de espiga (CE) e prolificidade (PROL). Houve efeito de P ( $P < 0,05$ ) para AP, AE, AcQ, NGE, CG e PG em AN e BN; DC apenas em BN e NFE apenas em AN. Houve aumento de produtividade mediante ao avanço dos ciclos de SR em UFVM100 mas o mesmo não ocorreu em UFVM200. PG apresentou regressão quadrática em BN e AN. Os máximos de PG foram 4322,11 kg.ha<sup>-1</sup> em D ótimo de 45,63 mil plantas.ha<sup>-1</sup> em BN e 7303,01 kg.ha<sup>-1</sup> com D ótimo de 83,88 mil plantas.ha<sup>-1</sup> em AN. Apesar de uma diferença de 38,230 mil plantas.ha<sup>-1</sup> entre D ótimos em AN e BN, AN teve apenas 6.355,6 espigas.ha<sup>-1</sup> a mais que em BN. Essa pequena diferença foi devido ao baixo valor de PROL (0,62) no D ótimo de AN.

Palavras-chave: Zea mays. População de plantas. Estresse abiótico. Eficiência no uso de nitrogênio. Variedades de Polinização Aberta

## ABSTRACT

SOUZA FILHO, Vidomar Destro de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2021. **Performance of maize populations under recurrent selection in different plant densities and in low and high nitrogen.** Adviser: Rodrigo Oliveira de Lima.

The most important genetic gains in maize grain yield at the last five decades is due to the improvement of nitrogen efficiency use and cultivars more adapted to high plant densities. In this way, the objective of this study was to evaluate six maize populations under recurrent selection in different plant densities, with and without N top-dressing application. For this, two experiments; one with top-dressing application of 380kg of urea (HN) and other in an experimental field that has not received top-dressing N application for six seasons (LN). The experiments were set up in DBC with split plots and 3 replications. Plots were composed by maize populations (P) UFVM100, UFVM100(HS)C1, UFVM100(HS)C2, UFVM200, UFVM200(HS)C1, UFVM200(HS)C2 and the subplots by plant densities (D) 30, 45, 60, 75, 90, 105 thousand plants ha<sup>-1</sup>. The traits evaluated was plant height (PH, cm), ear height (EH, cm), ear leaf's area (LA, cm<sup>2</sup>), stem diameter (SD, mm), internodes length below (ILBE) and above ear (ILAE), percentage of broken and lodged plants (BL, %), grain yield (GY kg.ha<sup>-1</sup>), 1000 kernel mass (K1000, g), number of rows in the ear (NRE), number of kernel in the ear (NKE), grain length (GL, mm), ear length (EL, cm) and prolificacy (PRL, ears.plant<sup>-1</sup>). There was an effect of P ( $P < 0,05$ ) for PH, EH, BL, NKE and GY in both N levels; SD only in LN and NRE only in HN. There was an increase in GY due to the advance of the selection cycles in UFVM100 but the same did not occur in UFVM200. UFVM100(HS)C1 and UFVM200(HS)C1 had the highest and lowest productivity in their own selection cycle groups, respectively. The GY has a quadratic regression in LN and HN. The maximum values of GY were 4322.11 kg.ha<sup>-1</sup> in optimum D of 45.63 thousand plants.ha<sup>-1</sup> in LN and 7303.01 kg.ha<sup>-1</sup> in optimum D of 83.88 thousand plants.ha<sup>-1</sup> in HN. Comparing HN and LN in relation to the optimal D, despite a difference of 38.230 thousand plants.ha<sup>-1</sup>, HN had only 6,355.6 ears.ha<sup>-1</sup> more than in LN. This small difference was due to the low PRL (0.62) in the optimal D of LN.

Keywords: Zea mays. Plant population. N stress. Efficient use of nitrogen Open pollinated variety. Ear to row method.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	12
2.1. Importância do milho .....	12
2.2 Cultivares .....	12
2.2.1 Híbridos .....	13
2.2.2. Variedades de Polinização Aberta .....	14
2.3 Seleção Recorrente .....	15
2.4 Densidade Populacional.....	17
2.5 Nitrogênio.....	18
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1. Material Genético .....	21
3.2. Execução experimental .....	22
3.3. Caracteres Avaliados .....	22
3.3.1 Caracteres de Arquitetura de Plantas .....	22
3.3.2 Produtividade de grãos e caracteres de espiga .....	23
3.4. Análises Genético-Estatísticas.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Componentes Principais .....	25
4.1.1 Populações .....	25
4.1.2 Densidades Populacionais .....	26
4.2 Arquitetura de Planta .....	27
4.3 Produtividade e Características de Espiga .....	32
5. CONCLUSÕES .....	40
REFERÊNCIAS .....	41
APÊNDICE A – Material Suplementar.....	48

## 1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura que se destaca no Brasil e no mundo por sua imensa diversidade de manejos, em diferentes localidades e usos; o qual predomina a produção de grãos para alimentação animal (DORIGATTI, 2020; MÔRO; FRITSCHÉ-NETO, 2015; PATERNIANI, 1995). Na última safra, o Brasil foi o terceiro maior produtor, segundo exportador e quarto maior consumidor de milho mundialmente (FIESP, 2020). Atualmente no Brasil ocorrem três safras: a primeira safra (ou Safra de Verão), plantada de setembro a dezembro; segunda safra (ou Safrinha), plantada de janeiro a abril e a terceira safra, plantada de abril a junho em alguns estados da região Nordeste (DORIGATTI, 2020). Das três a mais importante é a segunda, que é responsável por cerca de 75% da produção nacional. Para todo esse empreendimento é necessária uma gama de cultivares disponíveis para atender além das demandas edafoclimáticas de cada região, também os diferentes tipos de manejo empregados na cultura do milho.

Os dois principais tipos de cultivares plantados no país e mundo são os cultivares híbridos e as variedades de polinização aberta (VPAs; PEREIRA FILHO; BORGHI, 2020). Dentre os tipos de híbridos os principais são os híbridos simples, híbridos triplos e híbridos duplos. As principais características dos cultivares híbridos são maiores potenciais produtivos e uniformidade, sendo os híbridos simples os de maior potencial produtivo e uniformidade e os duplos de menor potencial e uniformidade dentre os híbridos (BORÉM; MIRANDA, 2013). Outras características relevantes dos híbridos são seu maior custo de sementes e a impossibilidade de se reaproveitar a semente sem perda do potencial produtivo (MORRIS; RISOPOULOS; BECK, 1999). As propriedades rurais que se utilizam de cultivares híbridos geralmente são mais tecnificadas e apresentam maior aporte de outros insumos, como defensivos químicos e fertilizantes. As instituições que se dedicam ao melhoramento de cultivares híbridos são predominantemente do setor privado (BORÉM; MIRANDA, 2013).

As VPAs são caracterizadas por serem populações de base genética ampla, ou seja, cultivares heterogêneos que possuem baixo custo de aquisição e que permitem o reaproveitamento da semente sem que haja perda do vigor (SOUZA JÚNIOR, 2018). As propriedades rurais em que geralmente se plantam VPAs são caracterizadas pela agricultura familiar com baixo aporte de insumos e agricultura

orgânica. As instituições que se dedicam ao melhoramento de VPAS são predominantemente do setor público (BORÉM; MIRANDA, 2013).

O principal método de melhoramento de populações é a seleção recorrente (SR). SR é qualquer processo cíclico de melhoramento com dois principais focos: (i) o aumento da frequência de alelos favoráveis e (ii) a manutenção da variabilidade genética da população. O aumento de alelos favoráveis pode ser tanto em relação a própria população (intrapopulacional), o que chamamos de melhoramento *per se*, quanto o melhoramento da capacidade de combinação desses alelos com os de outra população (interpopulacional), visando a heterose entre essas populações.

Entre os aspectos que mais trouxeram ganho em produtividade nos últimos 75 anos, destacam-se o melhoramento genético e a melhoria das técnicas de manejo, e dentre elas a principal foi o aumento da densidade de plantas (HAARHOFF; SWANEPOEL, 2018; LAMBERT; MANSFIELD; MUMM, 2014). A adaptação de plantas ao adensamento incorreu em uma menor produção por planta e maior produção por área. As modificações sofridas nos cultivares para uma maior adaptação a plantios mais adensados foram predominantemente em sua arquitetura de planta. Arquiteturas de plantas mais compactas, com menor altura, ângulo foliar e área foliar por planta, permitem uma melhor interceptação de luz pelo dossel e por fim uma maior eficiência fotossintética (BREKKE; EDWARDS; KNAPP, 2011; DUVICK, 2005; DUVICK; CASSMAN, 1999). Na avaliação de cultivares sob diferentes densidades populacionais é de suma importância avaliar os caracteres de arquitetura de planta atrelados a altas produtividades.

O N é o nutriente requerido em maior quantidade pela cultura do milho (VERGUTZ; NOVAIS, 2015). Além de representar grande parcela do custo de produção, o que impede o acesso a agricultores com menor poder aquisitivo, o N também tem causado muitas externalidades como a eutrofização de ecossistemas (BÄNZIGER; LAFITTE, 1997; FOWLER et al., 2015; IMEA, 2021; WITHERS et al., 2014). Dito isso, é de extrema importância a identificação de genótipos mais eficientes no uso de N (WORKU et al., 2007). Os principais caracteres relacionados a tolerância a baixos aportes de N são prolificidade, intervalo entre florescimento masculino e feminino, taxa de senescência e demais caracteres relacionados a componentes de produção (BANZINGER, 2000).

As populações UFVM100 e UFVM200 são VPAs desenvolvidas pelo Programa Milho-UFV no início dos anos 2000; ambas obtidas da combinação de híbridos

comerciais. UFVM100 foi composta pela combinação de híbridos com grãos do tipo “dentado”, mais amarelados, e tem aptidão para produção de grãos e silagem. UFVM200 foi composta por materiais de grãos do tipo “duro”, mais alaranjados, e é destinada principalmente à produção de grãos. Essas VPAs são cultivares adaptados a Viçosa-MG e região e representam uma alternativa de baixíssimo custo para agriculturas com baixo aporte tecnológico ou que busquem ser autossuficientes na produção de sementes. O Programa Milho-UFV tem realizado o melhoramento genético dessas populações que se encontram em seu segundo ciclo de seleção recorrente. A avaliação do progresso genético de um programa de melhoramento é importante para o diagnóstico da efetividade dos métodos e recursos empregados no melhoramento das populações em questão. Além desse diagnóstico, este trabalho também proverá informações acerca do desempenho das populações sob diferentes densidades de plantas e em condições contrastantes de N. Esses resultados tanto implementarão a informação sobre o germoplasma avaliado como também poderão abrir portas para novas linhas de pesquisa, assim como serem integrados a linhas de pesquisa já existentes.

O objetivo foi avaliar o desempenho de populações de milho sob seleção recorrente em diferentes densidades populacionais e em condições contrastantes de N.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Importância do milho

O milho (*Zea mays* L.) é um dos cereais de maior relevância econômica e cultural do mundo. Presente desde a agricultura de subsistência aos maiores complexos industriais, possui a maior produção e segunda maior área cultivada, atrás apenas do trigo (*Triticum aestivum* L.) (FAO, 2021). Pode ser encontrado em cultivos comerciais desde a latitude 58° N até 40° S, do nível do mar até 3.800m de altitude (PATERNIANI, 1995), em cinco dos seis continentes. Além da capacidade de ocupar uma ampla gama de ambientes, suas possibilidades de uso também são muitas; são mais de 3.500 possibilidades de uso direto e indireto (MÔRO; FRITSCHÉ-NETO, 2015) destacando-se principalmente a alimentação animal, consumo direto, extração de amido, óleo e produção de biocombustível. Do 1,12 bilhão de toneladas da safra 2019/2020, 63,5% foram produzidos por EUA (31%), China (23,4%) e Brasil (9,1%) (FIESP, 2021). Os principais consumidores mundiais são EUA, China, União Europeia e Brasil, representando juntos 65% do consumo total.

A cultura do milho se destaca no Brasil não apenas por seus números, mas também pelas épocas de plantio. No Brasil, é possível realizar três safras de milho por ano. As regiões Sul, Sudeste e Nordeste se destacam na primeira safra, plantada de setembro a dezembro, quando se observam as maiores produtividades, porém, apenas 25,1% da produção total. A segunda safra é a maior, plantada entre janeiro e abril, nela são colhidos 73,2% da produção total do país; com destaque para a região Centro-Oeste que é líder em área plantada, produção e produtividade nesse período (CONAB, 2021). A terceira safra é plantada em estados da região Nordeste e Norte, entre os meses de abril e junho, e apesar de ainda ser pouco expressiva – 1,7% da produção total – apresentou um aumento de 19,7% em relação ao mesmo período na safra 2018/2019 (CONAB, 2021). A terceira safra representa para a região Nordeste um melhor desenvolvimento dos complexos agroindustriais relacionados ao milho, dado que ainda é uma região deficitária em relação ao abastecimento de milho (DORIGATTI, 2020).

### 2.2 Cultivares

A adequação da cultura do milho a toda essa variedade de ambientes só é possível graças ao melhoramento genético. O produto do melhoramento genético são

cultivares adaptados não só a localidades e épocas de plantio, mas também a diferentes tipos sistemas de produção. De modo geral, os dois tipos principais de cultivares que estão disponíveis ao produtor são os híbridos e as variedades de polinização aberta (VPAs). Esses tipos de cultivares diferem quanto a potencial produtivo, métodos de melhoramento, multiplicação de sementes e adequação a sistemas produtivos mais ou menos tecnificados. Cento e noventa e seis cultivares híbridos e 11 VPAs estavam disponíveis aos agricultores brasileiros na safra 2019/2020. Dos híbridos, 86,4% eram híbridos simples, 5,8% triplos, 3,9% duplos, e 2,6% são híbridos intervarietais (PEREIRA FILHO; BORGHI, 2020).

### **2.2.1 Híbridos**

O que motiva a produção de híbridos é o aproveitamento da heterose, ou vigor híbrido. A heterose é um fenômeno que apesar estar não totalmente esclarecido, é amplamente explorado e consiste na superioridade da prole em relação a seus genitores (HALLAUER; CARENA; MIRANDA FILHO, 2010). Seus métodos de melhoramento visam encontrar melhor combinação entre indivíduos divergentes – pertencentes a grupos heteróticos distintos – afim de se potencializar a heterose (HALLAUER; CARENA; MIRANDA FILHO, 2010). A heterose é função de dois fatores: o desvio de dominância e a divergência genética entre os genitores (FALCONER, 1996; HALLAUER; CARENA; MIRANDA FILHO, 2010).

Os cultivares híbridos disponíveis aos agricultores podem ser divididos em híbridos simples (HS), triplos (HT), duplos (HD) e intervarietais (HI). Os HS são fruto do cruzamento de duas linhagens, que são indivíduos com aproximadamente 100% de seus *locos* em homozigose e de baixo vigor por conta da depressão por endogamia; um fenômeno oposto a heterose (HALLAUER; CARENA; MIRANDA FILHO, 2010). Os HT possuem uma linhagem como genitor masculino e um HS como genitor feminino. Os HD possuem dois HS como genitores e os HI são fruto do cruzamento de duas VPAs ou populações de base genética ampla. O uso de HS ou variedades como genitores permite uma maior produção de sementes por área e reduz significativamente os custos de produção. O nível de homozigose dos genitores interfere no tempo e custo para obtê-los; no custo da produção de sementes; na diversidade genética entre genitores e no grau de heterozigose da prole. De modo geral, HI é o híbrido de menor potencial produtivo e menor custo de produção e aquisição e HS o cultivar de maior custo de produção e aquisição e maior potencial produtivo.

Os HS são o tipo de cultivar mais plantado no mundo por sua alta produtividade e adequação a um sistema de produção mais tecnificado; com aporte de fertilizantes, pesticidas e mecanização de atividades. Dada a complexidade da produção desses cultivares, não é possível que o produtor reaproveite as sementes colhidas sem que haja uma redução do vigor nas gerações seguintes (SOUZA, 2018). Portanto, para manutenção do padrão de produtividade de uma propriedade que planta híbridos é necessária a compra de sementes a cada safra.

### **2.2.2. Variedades de Polinização Aberta**

Uma variedade de polinização aberta (VPA) é principalmente caracterizada pela heterogeneidade dos indivíduos que a compõe. O conceito de VPA pode englobar tanto populações melhoradas como populações nativas de uma determinada região, as chamadas variedades crioulas ou *landraces*. Sua constituição é basicamente de uma população de base genética ampla que atende – de maneira estrita ou análoga – aos critérios de distinguibilidade, homogeneidade e estabilidade exigidos pela Lei de Proteção de Cultivares (BRASIL, 1997). Diferentemente dos híbridos, as VPAs não apresentam heterose e possuem estabilidade produtiva ao longo de sucessivas gerações quando multiplicadas sob cuidados específicos (SOUZA, 2018). Na ausência de seleção, mutação e contaminação com sementes ou pólen alheio à população, as VPAs manterão suas frequências alélicas e principais características ao longo das gerações; o que denominamos Equilíbrio de Hardy-Weinberg (CRUZ, 2005).

Em contextos socioculturais específicos as VPAs representam uma interessante alternativa a outros cultivares. Apesar dos cultivares híbridos terem sido o componente chave para o aumento das produtividades em muitos locais ao redor do mundo (DUVICK, 2005) eles são muitas vezes inacessíveis para agricultura familiar, além da necessidade de serem adquiridos a cada safra. Morris et al. (1999) documentaram perdas de 20% em produtividade na segunda geração de híbridos e até 50% de perda na terceira. Além disso, estresses bióticos e abióticos são grandes limitadores da expressão do potencial produtivo de híbridos, dado que a grande maioria dos programas de melhoramento são conduzidos em condições ideais de cultivo. Alguns trabalhos sugerem que sob condições específicas de estresses e adubação as VPAs apresentaram potencial produtivo e econômico similar ou superior a híbridos (OJIEM; RANSOM; WAKHONYA, 1996; OMONDI; NORTON; ASHILENJE, 2014; UATE et al., 2019). As VPAs também têm sido apontadas como fonte de

variabilidade para a produção de cultivares biofortificados (ULM et al., 2019) e para cultivos agroecológicos. Apesar das VPAs não serem necessariamente uma requisição para o cultivo agroecológico, o conceito de soberania alimentar – que envolve a produção da própria semente – tem sido cada vez mais valorizado nesses contextos (ALTIERI, 2009; SOUZA JÚNIOR, 2018).

### **2.3 Seleção Recorrente**

O principal método para melhoramento de populações é a Seleção Recorrente (SR). Suas principais aplicações tem sido o melhoramento *per se* de VPAs e no melhoramento das fontes de germoplasma como; na melhoria da capacidade de combinação entre populações, reciclagem de linhagens, adaptação de germoplasma exótico e recuperação de linhagens originais após a inserção de evento transgênico (HALLAUER, 1992; HALLAUER; CARENA, 2012; HALLAUER; CARENA; MIRANDA FILHO, 2010; MIKEL, 2006). Esse método consiste em processos cíclicos que unem o aumento da frequência de alelos favoráveis com a manutenção da variabilidade genética (SOUZA JÚNIOR, 2001). A manutenção da variabilidade genética é o que permite que esse método seja usado recorrentemente na mesma população (SOUZA JÚNIOR, 2018). Nos processos que compõem os ciclos de SR, usualmente se trabalham com progênies. O termo progênie vem a ser o conjunto dos descendentes de um cruzamento específico. Quatro etapas são fundamentais nesse método: i) Obtenção – quando as progênies a serem avaliadas são obtidas; ii) Avaliação – quando as progênies são avaliadas por meio de experimentação agrícola para a estimação dos parâmetros genéticos da população; iii) Seleção – quando de posse dos parâmetros genéticos da população avaliada e com base nos objetivos do programa de melhoramento, são definidas as progênies que darão origem ao próximo ciclo e iv) Recombinação – quanto todo o material genético selecionado é inter cruzado de modo a se reestabelecer o equilíbrio de Hardy-Weinberg, o que garantirá a estabilidade da população e a continuidade de suas principais características que não sofreram seleção (BORÉM & MIRANDA, 2013; SOUZA JR., 2018).

A seleção recorrente possui duas subdivisões principais, a seleção recorrente intrapopulacional e seleção recorrente interpopulacional, ou recíproca. A seleção recorrente recíproca melhora a compatibilidade entre duas populações de grupos heteróticos distintos, visando o aproveitamento da heterose na geração F1 do cruzamento entre essas populações ou linhagens extraídas delas (HALLAUER; CARENA; MIRANDA FILHO, 2010). Já a seleção recorrente intrapopulacional – um

método tão antigo quanto o próprio melhoramento de milho (HALLAUER; CARENA; MIRANDA FILHO, 2010) – visa o melhoramento *per se* das populações (SOUZA JÚNIOR, 2018). O principal método empregado no melhoramento de VPAs é a seleção recorrente intrapopulacional.

Há uma diversidade de métodos de SR intrapopulacional que podem ser utilizados e sua principal diferença se dá pelas progênies a serem avaliadas e recombinadas. Fatores como a magnitude dos ganhos de seleção, investimento de tempo e recursos são o que auxiliarão na escolha das progênies. A título de exemplo, enquanto progênies endogâmicas acessam uma porção maior da variância aditiva, o que leva a um maior potencial de ganho genético, elas requerem muitas vezes mais tempo e mão-de-obra para serem obtidas. O inverso vale para progênies de meios-irmãos, que são mais facilmente obtidas, porém acessam uma proporção menor da variância aditiva (CRUZ, 2005).

Comparando seis métodos de SR intrapopulacional para os mesmos caracteres, na mesma população e em no mínimo quatro ciclos, Weyhrich *et al.* (1998), realizaram análises quanto a custos e ganhos em produtividade por ciclo e por ano. Os métodos envolviam seleção massal, progênies endogâmicas (S1 e S2), irmãos-completos e meios-irmãos (método com testador e método modificado espiga-por-linha). Os dois métodos que mais se destacaram foram o baseado em progênies endogâmicas S2 e o método Modificado de Espiga-Por-Linha (MER, sigla em inglês para “*modified ear-to-row*”), baseado na avaliação e recombinação de progênies de meio-irmão (COMPTON; COMSTOCK, 1976). Os métodos S2 e MER foram respectivamente: 212 e 172 kg.ha<sup>-1</sup>.ciclo<sup>-1</sup> e, 71 e 86 kg.ha<sup>-1</sup>.ano<sup>-1</sup> quanto a ganho.ciclo<sup>-1</sup> e ganho.ano<sup>-1</sup>. Quanto aos custos por ciclo, custo por ano e tempo para um ganho de 1000 kg.ha<sup>-1</sup>, os valores de MER representaram 65, 97 e 86% dos valores de S2.

Compton e Bahadur (1977) realizaram dez ciclos de SR baseada em progênies de meio-irmão (MER) na VPA Hays Golden. Houve uma média de 5,26% de ganho em produtividade por ciclo e mesmo após dez ciclos não houve tendência de perda significativa na variabilidade genética da população, exemplificando perfeitamente os dois objetivos principais da seleção recorrente. Trabalhos mais recentes, como Rovaris (2011), Noor *et al.* (2013) e Sheikh (2019), todos com dois ciclos, também tem apresentado ganhos de mesma magnitude de 5% e com a manutenção da

variabilidade genética. Shelton e Tracy (2015) também obtiveram sucesso na seleção de múltiplos caracteres de arquitetura de planta, espiga e grãos em milho doce.

## 2.4 Densidade Populacional

Segundo Duvick (2005) o ganho em produtividade advindo do aumento das densidades populacionais talvez seja a mudança mais clara e quantificável ocorrida no melhoramento de milho. A forte relação entre aumento de produtividade e adensamento populacional já foi explanada em diversos trabalhos (BREKKE; EDWARDS; KNAPP, 2011; DEBRUIN *et al.*, 2017; DUVICK, 2005; RUSSELL, 1974, 1984, 1986). DeBruin *et al.* (2017) observaram uma resposta positiva entre aumento de densidade e produtividade em híbridos mais novos e uma resposta negativa em relação aos híbridos mais antigos; Russel (1991) encontrou resultados parecidos. Os principais ganhos em produtividade vêm da otimização da produção por área em detrimento da produção por planta. Brekke *et al.* (2011) calcularam um aumento de 110% em produtividade por área de 1965 a 2008 em Iowa (EUA), enquanto o aumento de produção por planta foi de apenas 7%.

A resposta da produtividade a densidade populacional é geralmente curvilínea, de modo que há um ponto ótimo de densidade de plantas capaz de maximizar a produtividade de um genótipo em determinado ambiente (TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004). Densidades menores que o ponto ótimo produzem menos, pois o ganho individual por planta não é capaz de suprir a produção das plantas faltantes; densidades maiores podem levar a redução da taxa de crescimento, redução da taxa de absorção e partição de N na planta, aumento da variabilidade entre plantas e da taxa de infertilidade (CIAMPITTI; VYN, 2011). Tokatlidis e Koutroubas (2004) também alertam sobre possíveis efeitos negativos do aumento da população de plantas na estabilidade da produção. A seleção para cultivares mais tolerantes ao adensamento tem simultaneamente diminuído a capacidade desses cultivares compensarem a produção de plantas faltantes. Esse aspecto diminui a estabilidade produtiva de plantios mais adensados, os tornando mais susceptíveis a estresses (TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004; TROYER, 1996).

Acredita-se que a superioridade dos cultivares mais modernos em maiores densidades é consequência de uma arquitetura de planta mais compacta. Duvick (2005) relata uma tendência de redução de altura de planta ao longo do tempo. Duvick e Cassman (1999) relataram um aumento de 122% em ângulo foliar e 36% de redução

de massa seca de pendão, avaliando 36 híbridos lançados de 1967 a 1991. A maior distribuição de luz teria como consequência uma maior eficiência fotossintética a nível de dossel (DONALD, 1968; DUNCAN, 1971; MOCK; PEARCE, 1975; PENDLETON et al., 1968). Mock e Pearce (1975) mostraram que mesmo com 50% de intensidade de luz, folhas de milho ainda são capazes de realizar 80% da fotossíntese de uma folha a pleno sol. Portanto, mesmo que folhas mais eretas interceptem menos luz, sua perda não é superior ao ganho obtido pelo melhor funcionamento das folhas baixas.

Outra importante característica relacionada a penetração da luz no dossel é a área foliar da planta. Dado a fácil medição e alta correlação da área foliar da planta com a área da folha da espiga (AFE), AFE é a referência de área foliar que geralmente é avaliada (PEARCE; MOCK; BAILEY, 1975). Lambert (2010) realizou oito ciclos de seleção recorrente para redução AFE e alcançou uma redução de 29%; trabalhos posteriores (LAMBERT; MANSFIELD; MUMM, 2014) informaram um ganho de 2,1 t.ha<sup>-1</sup> nessa mesma população. Lambert (2014) avaliando híbridos oriundos de linhagens extraídas de plantas com alta AFE e baixa AFE, observou melhores respostas nos híbridos de parentais com baixas AFE em produtividade, área foliar requerida para a produção de 1g, tolerância a adensamento e tolerância a déficit hídrico.

Liu *et al.* (2020) avaliando o diferentes índices de área foliar obtidos pela remoção mecânica de folhas, concluíram que sob em altas densidades, híbridos com remoção parcial de folhas produziram mais do que os que não tiveram folhas removidas. Segundo eles, a área foliar ótima ampliou a capacidade fotossintética e melhorou a relação fonte-dreno. Portanto a área foliar é um parâmetro a ser avaliado e otimizado visando maiores produtividades em milho.

## 2.5 Nitrogênio

O Nitrogênio (N) é o quarto elemento mais abundante na biomassa celular e um dos principais fatores limitadores da produção de biomassa na agricultura. Dentre órgãos vegetativos e reprodutivos, essa biomassa representa o conjunto de toda alimentação humana e animal do nosso planeta (HIREL; KRAPP, 2020). N é o principal macronutriente exigido para que a planta de milho complete seu ciclo (VERGUTZ; NOVAIS, 2015). É componente de proteínas, aminoácidos, pigmentos como a clorofila e enzimas como a RuBisCO (ribulose-1,5,-bisfosfato carboxilase

oxidase). RuBisCO é uma das enzimas mais abundantes no planeta e é fundamental para a fixação de carbono nas plantas (TAIZ et al., 2015).

O suprimento de N para as plantas sempre foi uma questão delicada na agricultura, de modo que Sir William Crookes em 1898 chegou a dizer que seriam os químicos que definiriam a produção de alimento no futuro (SMIL, 2001). De certa forma ele estava parcialmente correto pois 15 anos depois, da união da expertise de Fritz Haber e Carl Bosch, a produção de amônia em larga escala pôde ser operacionalizada (GALLOWAY et al., 2013). Nas primeiras décadas principalmente para fins militares, mas a partir da década de 1950, com a Revolução Verde, a principal utilização da reação de Haber-Bosch foi para produzir fertilizantes agrícolas. A demanda era tanta que em 1970 a espécie humana já fixava mais N do que a própria natureza (GALLOWAY et al., 2013).

Hoje os custos com macronutrientes (N-P-K), cujo N representa a maior parte, variam de 24% do custo operacional de produção na região Sudeste em média tecnologia, a 33% do custo operacional na região Oeste em alta tecnologia (IMEA, 2021). Outro aspecto importante é que mais de 50% do N aplicado é lixiviado ou volatilizado (CAMERON; DI; MOIR, 2013). Além dos altos custos para os produtores, altas aplicações de N têm trazido um alto custo também para o meio ambiente de maneira geral: eutrofização do solo e de cursos de água doce e salgada (WITHERS et al., 2014); a alta emissão de óxido nitroso ( $N_2O$ ) por solos eutrofizados, um gás 300 vezes mais danoso do que o  $CO_2$  para o efeito estufa (FOWLER et al., 2015); acidificação de solos após a deposição da amônia liberada na atmosfera por ambientes eutrofizados (FOWLER et al., 2015; VAN BREEMEN et al., 1982). Entretanto, se o excesso de N é um problema grave, sua ausência também o é; segundo muitos trabalhos boa parte do milho em países subdesenvolvidos é cultivado sob baixas doses de N (CAIXETA et al., 2015; ERTIRO et al., 2020; MCCOWN et al., 1992; SHEHU et al., 2018). Seja pela baixa fertilidade dos solos tropicais, baixa eficiência de uso de N em regiões propensas a seca, alta razão custo de N/preço da saca e baixo poder aquisitivo dos agricultores (BÄNZIGER; LAFITTE, 1997; MONNEVEUX; ZAIDI; SANCHEZ, 2005). Dado esses motivos, a identificação de material genético com maior eficiência de uso de N (EUN) é fundamental para que o mundo seja alimentado de maneira sustentável.

Segundo Worku *et al.* (2007) uma ampla gama de pesquisadores já têm identificado variabilidade genética em diferentes tipos de materiais em condições de

baixo N. Castleberry *et al.* (1984) avaliando VPAs e híbridos lançados entre as décadas de 1930 a 1980, em um ensaio comparativo em solos com alto aporte de N e baixo aporte de N, perceberam ganhos genéticos em ambos ambientes, porém os ganhos em alto N foram maiores. Monneveux *et al.* (2005) avaliando as principais VPAs desenvolvidas pelo CIMMYT, encontraram variabilidade genética para todos os caracteres relacionados a tolerância a estresse por baixo N. Fernandes *et al.* (2005) concluíram que a medida que se aumenta a dose de N a eficiência do uso de N se reduz. Esses resultados denotam a importância da avaliação do germoplasma de um programa sob condições de baixo N. Os principais efeitos do estresse por baixo N em plantas de milho são: redução da fotossíntese, redução da área foliar, aceleração da senescência, aumento do intervalo entre florescimento masculino e feminino, abortamento de espigas e abortamento de grãos (BANZINGER, 2000).

De acordo com Banzinger *et al.*(2000) enquanto a herdabilidade da produtividade decresce em situações de estresse a herdabilidade de caracteres secundários se mantem. Segundo Mundim *et al.* (2018) caracteres secundários relacionados a tolerância a baixo N tem sido estudados com o intuito de se melhorar a seleção de indivíduos mais tolerantes. Caracteres secundários devem ser correlacionados geneticamente com o caractere primário, possuir alta variabilidade e herdabilidade e serem de fácil mensuração (FALCONER, 1996). Os principais caracteres secundários relacionados a tolerância a baixo N são: prolificidade, taxa de senescência, intervalo entre florescimento masculino e feminino e número de fileiras (BANZINGER, 2000; RODRIGUES, 2015). Diversas populações em seleção recorrente têm sido avaliadas em condições contrastantes de N e diferentes respostas tem sido encontradas tanto entre ciclos de seleção baseados nos mesmos critérios, quanto em ciclos de seleção baseados entre critérios diferentes (BANZINGER; BETRÁN; LAFITTE, 1997; LAFITTE; EDMEADES, 1994a, 1994b). Monneveux *et al.* (2005) avaliaram 24 VPAs, 30 linhagens e 25 híbridos sob condições ótimas, baixo N e altas densidades, percebeu uma associação entre intervalo entre florescimento masculino e feminino e produtividade em todos os tipos de material, seja para baixo N ou alta densidade. Vasal *et al.*(1997) sugeriram o melhoramento simultâneo para baixo N e altas densidades.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Material Genético

Neste trabalho, foram avaliadas seis populações de base genética ampla (P) de milho: as variedades de polinização aberta, UFVM100 e UFVM200, e as populações melhoradas a partir das duas VPAs: UFVM100(HS)C1, UFVM100(HS)C2, UFVM200(HS)C1 e UFVM200(HS)C2. As populações UFVM100 e UFVM200 foram melhoradas com emprego de seleção recorrente intrapopulacional baseada em progênies de meios-irmãos:

As populações UFVM100 e UFVM200 foram desenvolvidas pelo Programa Milho-UFV e registradas como variedade de polinização aberta no Registro Nacional de Cultivares do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento em 2003 e 2004, respectivamente. A UFVM100 possui grãos amarelados do tipo dentado (predominância de endosperma farináceo) e tem aptidão para produção de grãos, silagem e milho verde. A UFVM200 possui grãos alaranjados e do tipo Duro (com predominância de endosperma vítreo) e tem aptidão para produção de grãos.

No processo de melhoramento via seleção recorrente foram obtidas progênies com boa performance para caracteres de alta herdabilidade como altura de planta, altura de espiga, bom empalhamento, tipo de grão e sanidade. Após a fase de obtenção, as progênies foram avaliadas e selecionadas com base em parâmetros genéticos.

No primeiro ciclo de seleção de UFVM100 foram selecionadas as dez progênies mais produtivas para a composição do ciclo seguintes. No segundo ciclo de UFVM200 as progênies foram selecionadas 20 progênies com base em um índice que visava selecionar progênies mais precoces, com menor porte e mais produtivas. Nos demais ciclos foram selecionadas as 20 progênies mais produtivas. A recombinação ocorreu em campo isolado com bloco composto pela alternância de duas linhas e quatro linhas de fêmeas. As linhas de macho eram compostas por uma mistura de todas as progênies selecionadas e cada linha de fêmea composta por uma única progênie selecionada. As linhas de fêmea foram emasculadas antes da maturidade das inflorescências masculinas. Uma mesma quantidade de espigas de cada linha de fêmea foi colhida e misturada para a composição do próximo ciclo de seleção. As linhas de macho não foram colhidas.

### **3.2. Execução experimental**

Na safra 2019/2020, Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão de Coimbra (UEPE-Coimbra, 20°50'30"S, 42°48'30"W, altitude de 713 m), foram instalados dois experimentos; i) um em uma área caracterizada pela não aplicação de N em cobertura (baixo N, BN) durante seis safras de plantio de milho, e ii) em uma área que recebe adubação nos níveis recomendados para a região (alto N, AN). A adubação em ambos os experimentos foi de 380 kg ha<sup>-1</sup> de 08-28-16 (NPK) no plantio e 100 kg.ha<sup>-1</sup> KCl em cobertura. Apenas em alto N foi realizada também uma adubação de 380 kg ha<sup>-1</sup> de Ureia em cobertura. Foram avaliadas seis populações de milho (UFVM100, UFVM100(HS)C1, UFVM100(HS)C2, UFVM200, UFVM200(HS)C1 e UFVM200(HS)C2) em seis densidades populacionais (30, 45, 60, 75, 90 e 105 mil plantas ha<sup>-1</sup>).

Ambos os experimentos foram delineados em blocos casualizados (DBC) em esquema de parcelas subdivididas e três repetições; com populações nas parcelas e densidades populacionais nas subparcelas (Figura S1). Cada bloco era formado por seis parcelas e cada parcela era composta de oito linhas de 18m espaçadas a 0,8m e continha seis subparcelas na disposição 2x3. O espaçamento de 0,8 m foi escolhido por ser o mais comum na região de Viçosa-MG, por ser a região para a qual as populações em questão têm sido melhoradas. Cada subparcela era formada de quatro linhas de seis metros de comprimento. A fim de reduzir os efeitos da competição entre subparcelas, apenas os quatro metros centrais das duas linhas interiores foram considerados área útil para a obtenção dos caracteres. A combinação de populações (P) e densidades(D) totalizou 36 combinações possíveis. Em função das três repetições, foram obtidas 108 unidades experimentais em cada experimento. Os demais tratos culturais foram conduzidos conforme as recomendações para a região (GALVÃO; BORÉM; PIMENTEL, 2015).

### **3.3. Caracteres Avaliados**

#### **3.3.1 Caracteres de Arquitetura de Plantas**

Os caracteres avaliados foram: altura de planta (AP, em cm), obtida pela média da distância entre o solo e o colar da folha bandeira (base do limbo foliar) medida em seis plantas; altura de espiga (AE, em cm), média da distância entre o solo e o nó de inserção da primeira espiga medido em seis plantas; área foliar (AF, em cm<sup>2</sup>) estimada a partir do comprimento e da largura da folha, conforme a expressão  $AF = C \times L \times 0,75$

(MONTGOMERY, 1911); diâmetro de colmo (DC, em mm), média do maior diâmetro do primeiro entrenó; comprimento de entrenós abaixo da espiga (CEAB), AE dividida pela média do número de nós abaixo da primeira espiga; comprimento de entrenós acima da espiga (CEAC), a diferença entre AP e AE dividida pela média do número de nós acima da primeira espiga; e AcQ (%), porcentagem de plantas acamada e quebradas em relação ao estande de cada parcela. Quase todos os caracteres foram mensurados em seis plantas pertencentes à área útil da parcela, à exceção de AcQ.

### 3.3.2 Produtividade de grãos e caracteres de espiga

Para produtividade de grãos e caracteres de espiga foram os seguintes caracteres em seis plantas competitivas da área útil da parcela: prolificidade (PROL, espigas planta<sup>-1</sup>), obtida pela relação entre o número de espigas e a densidade de plantas, determinada no momento da colheita; massa de 1.000 grãos (P1000, g); comprimento de grãos (CG, mm), obtida pela metade da diferença entre o diâmetro da espiga menos o diâmetro do sabugo (porção mediana da espiga e do sabugo), mensurado por paquímetro digital na altura do meio da espiga e do sabugo; número de fileiras de grãos (NFE); número de grãos na espiga (NGE), quantidade média de grãos obtida pela multiplicação do número de fileiras pela quantidade de grãos por fileira comprimento de espiga (CE, cm), das espigas despalhadas da base até a ponta; produtividade de grãos (PG, kg ha<sup>-1</sup>), feita pela colheita manual de todas as espigas da área útil, tendo os dados sido corrigidos para 14% de umidade.

Todos os caracteres de espiga foram avaliados em seis espigas consideradas representativas da área útil da parcela.

### 3.4. Análises Genético-Estatísticas

Em cada nível de N (AN e BN), foram realizadas análises estatísticas individuais de acordo com o seguinte modelo estatístico  $Y_{ijk} = \mu + P_i + D_j + B_k + PD_{ij} + Ea_{ik} + Eb_{ijk}$  (PIMENTEL-GOMES, 2000) em que:  $Y_{ijk}$  é o valor observado da  $i$ -ésima população na  $j$ -ésima densidade e no  $k$ -ésimo bloco;  $\mu$  é a média geral;  $P_i$  o efeito da  $i$ -ésima população;  $D_j$  o efeito da  $j$ -ésima densidade;  $B_k$  o efeito do  $k$ -ésimo bloco;  $PD_{ij}$  o efeito da interação entre população e densidade;  $Ea_{ik}$  o erro associado a parcela população e  $Eb_{ijk}$  o erro associado a subparcela. Na análise conjunta dos dois níveis de N foi considerado o seguinte modelo:  $Y_{ijkl} = \mu + A_l + P_i + D_j + B_k + AP_{li} + AD_{lj} + PD_{ij} + APD_{lij} + Ea_{lk} + Eb_{ik} + Ec_{jlk}$  (PIMENTEL-GOMES, 2000) em que:  $Y_{ijkl}$  é o

valor observado na  $i$ -ésima população na  $j$ -ésima densidade e no  $k$ -ésimo bloco do  $l$ -ésimo nível de N;  $\mu$  é a média geral;  $A_l$  o efeito do  $l$ -ésimo ambiente;  $P_i$  o efeito da  $i$ -ésima população;  $D_j$  o efeito da  $j$ -ésima densidade;  $B_k$  o efeito do  $k$ -ésimo bloco;  $AP_{li}$  o efeito da interação do  $l$ -ésimo nível de N com a  $i$ -ésima população;  $AD_{lj}$  o efeito da interação do  $l$ -ésimo nível de N com a  $j$ -ésima densidade;  $PD_{ij}$  o efeito da interação entre população e densidade;  $APD_{lij}$  o efeito da interação entre o  $l$ -ésimo nível de N com a  $i$ -ésima população e  $j$ -ésima densidade;  $Ea_{lk}$  o erro associado a nível de N;  $Eb_{lik}$  o erro associado a população (parcela) e  $Ec_{ijkl}$  o erro associado a densidade (subparcela).

As médias entre P foram comparadas pelo teste LSD a 5% de significância. Modelos de regressão de primeiro e segundo grau foram ajustados para todos os caracteres a fim de mensurar o efeito de D sob cada caractere. A escolha da melhor modelo de regressão foi feita com base nas significâncias dos coeficientes e pelo maior  $R^2$  ajustado. Foi realizada a análise de componentes principais para P e D, ambas com dados BN e AN. Foram realizadas duas análises de componentes principais (PCA) para uma melhor visualização do comportamento dos caracteres em relação a população e densidade populacional. Na interpretação dos gráficos gerados pela PCA; no gráfico das variáveis o cosseno do ângulo entre dois vetores representa a correlação linear entre eles (JAHANGIRLOU et al., 2020). No gráfico dos indivíduos proximidade de pontos indica similaridade (Figura 1 e 2).

Todas as análises foram realizadas com auxílio do software R (DESSAU; PIPPER, 2008). As ANOVAS foram realizadas com auxílio do pacote “agricolae”(MENDIBURU, 2019). Os modelos de regressão com o pacote “Expdes” (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2014) e para análise de componentes principais (PCA) foi utilizado o pacote FactoShiny (VAISSIE; MONGE; HUSSON, 2015).

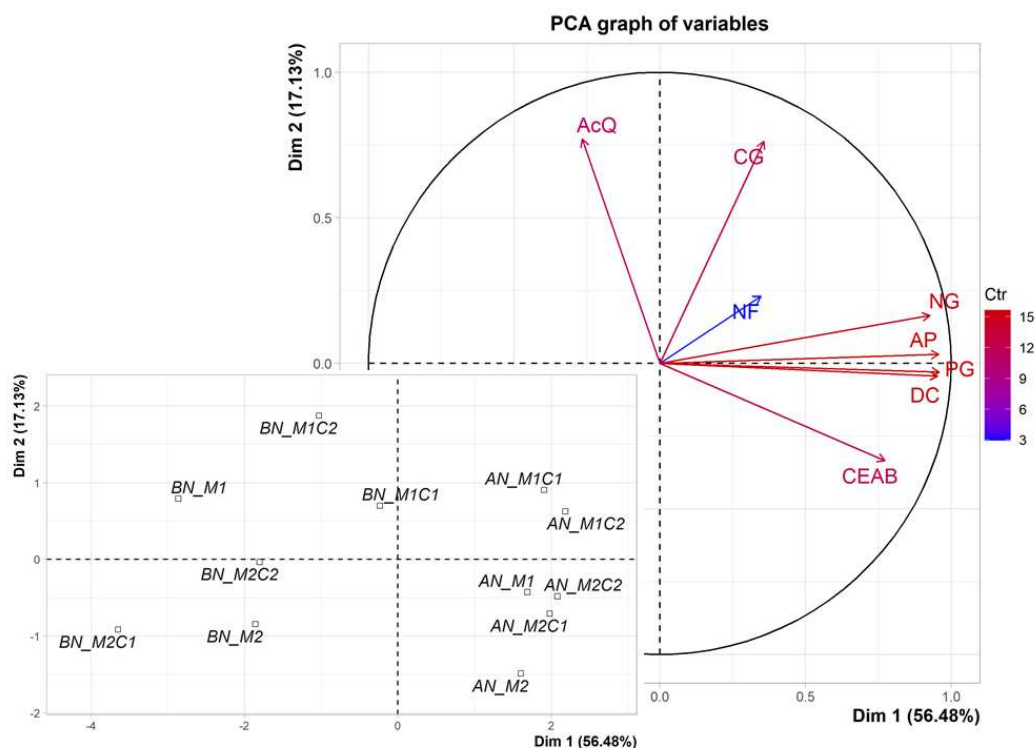
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Componentes Principais

#### 4.1.1 Populações

A análise de componentes principais (PCA) para populações em BN e AN, representou 73,61% da variação total dos dados (Figura 1). Segundo Rencher (2002), pelo menos 70% da variação deve ser explicada pelos dois primeiros componentes principais. Peng *et al.* (2011) também julgaram os dois primeiros componentes suficientes para a explicação de mais de 70% dos dados, avaliando componentes de produção em duas populações de milho. Os caracteres considerados na PCA em P foram apenas aqueles que apresentaram efeito significativo ( $P < 0,05$ ) para P na análise conjunta (Tabelas S1 e S2). AE, apesar de significativo, também foi retirado por apresentar correlação superior a 0,8 com a AP, e por isso agregar muitas informações redundantes à análise. O primeiro componente (CP1; eixo horizontal) explicou 56,48% da variação dos dados e teve correlação significativa ( $P < 0,05$ ) positiva com PG, AP, DC, NG, CEAB, CG e NF. O segundo componente (CP2; eixo vertical) explicou 17,13% da variação dos dados e teve correlação significativa ( $P < 0,05$ ) positiva com AcQ e CG e negativa com CEAB. O CP1 discriminou as populações principalmente quanto ao ambiente que foram avaliadas. Assim, populações avaliadas em AN se agruparam mais próximas aos maiores valores de CP1, denotando superioridade em relação a BN nos caracteres correlacionados ao eixo horizontal. O CP2 discriminou principalmente os ciclos de seleção de UFVM100 dos ciclos de UFVM200. Os ciclos de seleção de UFVM100 se agruparam mais próximos de caracteres correlacionados positivamente ao CP2 (AcQ e CG) e os ciclos de UFVM200 mais próximos a CEAB, um caractere correlacionado negativamente com CP2.

**Figura 1.** *Biplot* das variáveis descritas pelos dois primeiros componentes principais e abaixo *biplot* das populações e seus ciclos nos dois primeiros componentes principais em AN e BN.



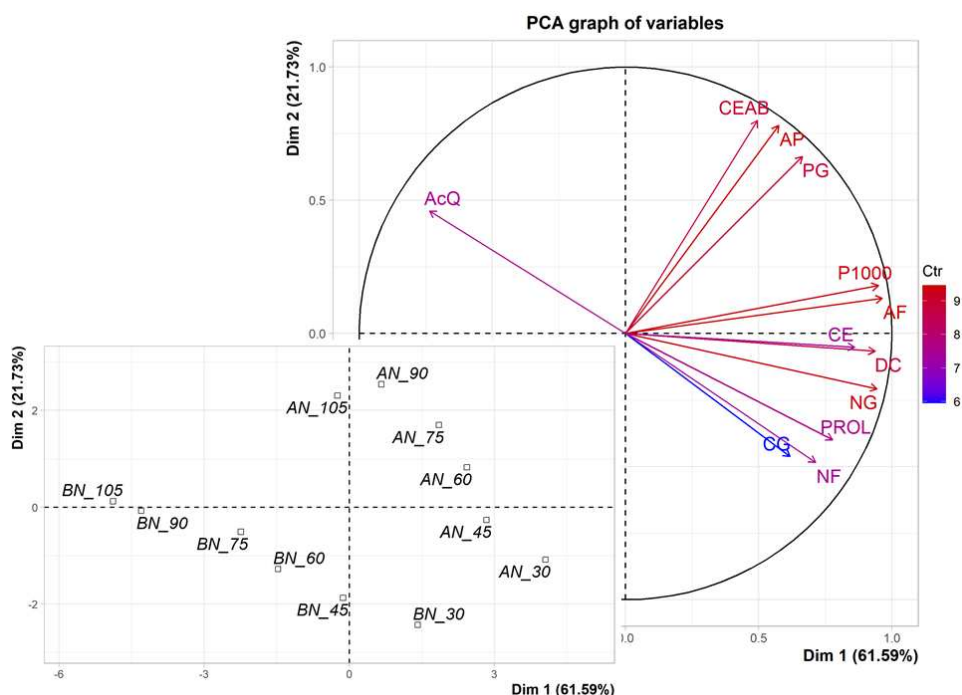
M1, M1C1, M1C2, M2, M2C1 E M2C2 representam UFVM100, UFVM100(HS)C1, UFVM100(HS)C2, UFVM200, UFVM200(HS)C1 e UFVM200(HS)C2, respectivamente.

#### 4.1.2 Densidades Populacionais

Os dois primeiros componentes principais da PCA para densidades (D) explicaram 83,32% da variação dos dados (Figura 2). As variáveis foram selecionadas de maneira semelhante ao que foi feito para a PCA em P. O CP1 explicou 61,59% da variação dos dados e apresentou correlação significativa ( $P < 0,05$ ) e positiva para AF, P1000, NG, DC, CE, PROL, NF, PG, CG, AP e CEAB e negativa para AcQ. O CP2 explicou 21,73% da variação dos dados e apresentou correlação significativa ( $P < 0,05$ ) e positiva para CEAB, AP, PG e AcQ e negativa para PRL, CG, NF. O CP1 apresentou correlações de maiores magnitudes com caracteres de componente de produção, AF e DC, que são caracteres que tendem a diminuir com o aumento de D enquanto o CP2 apresentou correlações de maior magnitude com CEAB, AP e PG, que são caracteres que tendem a aumentar com o aumento de D. No *biplot* com a projeção de D, foi possível identificar os dois agrupamentos de D\_BN e D\_AN. Os dois agrupamentos responderam de maneira

semelhante ao aumento de D; com o aumento de D, CP1 se reduz e CP2 aumenta. Em AN o aumento de CP2 é mais evidente do que a redução de CP1 e em BN ocorre o inverso.

**Figura 2.** *Biplot* das variáveis descritas pelos dois primeiros componentes principais e abaixo *biplot* das densidades nos dois primeiros componentes principais em AN e BN.



30, 45, 60, 75, 90 e 105 representaram as densidades populacionais de 30, 45, 60, 75, 90 e 105 mil plantas.ha<sup>-1</sup>

## 4.2 Arquitetura de Planta

Houve efeito ( $P < 0,05$ ) de população de milho para AP, AE e AcQ em ambos os níveis de N, e para DC em baixo N (Tabela 1). Para densidade de plantas, houve efeito ( $P < 0,05$ ) para AF, DC e AcQ em baixo N e para quase todos os caracteres de arquitetura de plantas em condições de alto N, a exceção de CEAC. Houve efeito dos níveis de N para todos os caracteres, exceto AcQ (Tabela S1). Em relação a interação populações de milho x densidade de plantas, observou-se efeito ( $P < 0,05$ ) de interação apenas para AcQ. Houve interação DxN significativa ( $P < 0,05$ ) em AP, AE e AF (Tabela S1). Os coeficientes de variação (CV) variaram de 6,01% (AP) à 15,94% (AF) e de 4,74% (AP) à 14,00% (CEAC) para parcela e subparcela, respectivamente, em condições de baixo N. Em condições de alto N, todos os CVs apresentaram valores inferiores aos observados em baixo N, e variaram de 4,50% a 7,60% na parcela, e de

3,00% a 10,10% na subparcela, para AP e CEAC, respectivamente. Segundo Soares *et al.* (2011) é esperado que caracteres avaliados em ambientes sob estresse apresentem CVs maiores, pois possuem médias menores e quadrados médios de resíduo maiores. Diversos trabalhos têm identificado CVs maiores em ambientes menos favoráveis (DIAS *et al.*, 2019; SOARES *et al.*, 2011; SOUZA *et al.*, 2010). De acordo com Fritsche-Neto *et al.* (2012), os valores de CVs encontrados podem ser considerados de baixos a intermediários.

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância para caracteres de arquitetura de plantas mensurados em seis populações de milho avaliadas em condições de baixo e alto N. Coimbra, MG. Brazil.

FV	GL	AP <sup>1/</sup>	AE	AF	CEAB	CEAC	DC	AcQ <sup>2/</sup>
<i>Baixo N</i>								
Bloco	2	1511,07	1442,69	8599,41	15,41	20,08	35,49	0,002
População	5	1436,82	1054,05	20311,83	7,35	2,1	35,22**	0,02*
Resíduo	10	201,58	195,64	10757,81	3,37	1,75	4,97	0,004
CV%(a)		6,01%	10,73%	15,94%	12,42	8,47%	10,56%	8,40
Densidad	5	76,2	111,28	126862,95	1,08	0,41	149,93*	0,04*
P x D	25	135,72	89,29	4901,12	1,83	5,93	2,6	0,01*
Resíduo	60	125,37	70,81	3084,91	2,77	4,79	2,06	0,004
CV% (b)		4,74%	6,45%	8,53%	11,27	14,00	6,79%	7,80
<i>Alto N</i>								
Bloco	2	27,01	24,34	9868,8	0,26	3,63	3,02	0,003
População	5	483,79*	454,41*	2428,43	3,27	2,93	4,00	0,01*
Resíduo	10	144,64	83,93	2786,31	1,65	1,07	5,14	0,001
CV%(a)		4,50%	6,20%	6,40%	7,60%	5,80%	8,70%	5,00
Densidad	5	899,45**	1120,38	61858,27**	8,91*	1,4	162,75*	0,03*
P x D	25	75,07	53,96	3125,69	3,02	2,83	2,13	0,003
Resíduo	60	63,26	43,85	3462,33	2,86	1,93	3,00	0,001
CV% (b)		3,00%	4,50%	7,10%	10,10	7,80%	6,70%	4,60

<sup>1/</sup> AP, altura de planta; AE, altura de espiga; AF, área foliar da folha da espiga; CEAB, comprimento de entrenó abaixo da espiga; CEAC, comprimento de entrenó acima da espiga; DC, diâmetro de colmo e AcQ, plantas acamadas. <sup>2/</sup> dados transformados pela equação  $\sqrt{X + 0,5}$ . “\*” e “\*\*” simbolizando P < 0,05 e 0,01, respectivamente, pelo teste F.

Em relação a comparação entre as médias das populações, observou-se que houve um aumento na altura de plantas e de espigas com ao avanço dos ciclos de seleção recorrente em ambos os níveis de N. As populações UFVM100(HS)C2 e UFVM200(HS)C2 apresentaram as maiores alturas comparado com seus ciclos anteriores (LSD, 5%). UFVM100(HS)C2 não diferiu estaticamente de UFVM100 apenas em AcQ em baixo N, nos demais caracteres de arquitetura de plantas houve diferença em ambos os níveis de N. UFVM200(HS)C2 diferiu apenas de

UFVM200(HS)C1 em AP,AE e DC em baixo N; porém, em alto N, a população diferiu apenas de UFVM200 quanto a AP e AE. De modo geral, as populações derivadas de UFVM100 tiveram maior porte. As médias de AP e AE em baixo N foram 11,42% e 12,14% menores do que as médias em alto N (Tabela 3). As populações UFVM200(HS)C1, UFVM100(HS)C2 e UFVM100 apresentaram maior AcQ nas densidades de 45, 90 e 105 mil plantas ha<sup>-1</sup>, respectivamente em baixo N, enquanto as populações UFVM100(HS)C2, UFVM100(HS)C1 e UFVM200(HS)C2 foram as populações que mais acamaram nas densidades de 60, 90 e 105 mil plantas.ha<sup>-1</sup>, respectivamente, em alto N. Diâmetro de colmo (DC) variou de 19,23mm (UFVM200(HS)C1) a 22,84mm (UFVM100(HS)C1) e não apresentou diferença significativa para efeito de populações em alto N. A média de DC em baixo N foi 18,61% menor que em alto N. De maneira geral os valores dos caracteres de arquitetura de planta avaliados em baixo N foram menores. A maior diferença entre níveis de N foi de 21,42% em AF e a menor de 11,42% em AP (Tabela 3).

**Tabela 2.** Médias dos caracteres de arquitetura de plantas mensurados em seis populações de milho avaliados em condições de baixo e alto N. Coimbra, MG. Brasil

Populações	Baixo N				Alto N		
	AP <sup>1</sup>	AE	DC	AcQ	AP	AE	AcQ
UFVM100	227,17c/	123,39c	20,02b	16,9ab	263,66bc	147,34bc	5,8c
UFVM100(HS)	244,13a	135,66a	22,84a	6,6c	267,03ab	149,12ab	12,9a
UFVM100(HS)	247,07a	140,92a	22,44a	20,5a	273,97a	155,47a	14,8a
UFVM200	234,45b	127,20b	20,68b	7,7bc	259,44c	141,25d	5,3c
UFVM200(HS)	225,18c	121,28c	19,23c	13,3ab	265,32ab	145,15cd	8,2c
UFVM200(HS)	239,55a	133,86a	21,54a	13,1ab	270,88ab	151,99ab	9,9bc
Médias	236,25	130,38	21,12	13,0	266,72	148,39	9,5

<sup>1</sup> AP, altura de planta (cm); AE, altura de espiga(cm); DC, diâmetro de colmo (mm); AcQ, plantas acamadas e quebradas (%). <sup>2</sup>Valores seguidos das mesmas letras, dentro as colunas, não diferiram significativamente (LSD, 0,05).

Dado que N é um dos principais nutrientes limitantes ao desenvolvimento da planta de milho (VERGUTZ; NOVAIS, 2015), é natural que as plantas de em baixo N tenham estruturas morfológicas e produtivas menos desenvolvidas que em alto N (Tabela 3 e Tabela 8). Diversos autores têm encontrado um menor desenvolvimento vegetativo de plantas de milho em condições de estresse de N (ÇARPICÍ; ÇEL, 2010; KAMARA et al., 2005; LAFITTE; EDMEADES, 1994a; MONNEVEUX; ZAIDI; SANCHEZ, 2005). Em ambos os conjuntos de ciclos de seleção recorrente, de UFVM100 e UFVM200, houve uma tendência de aumento do porte das plantas à

medida em que se avançaram os ciclos de seleção. Durante os ciclos de seleção foi observada correlação significativa desses caracteres com PG, o principal caractere utilizado como critério de seleção dessas populações (Dados não mostrados). Vários trabalhos já relacionaram aumento de AcQ a maiores valores de altura e menores diâmetros de colmo (FORELL et al., 2015; ROBERTSON et al., 2017; SHI et al., 2016); as médias das populações em alto N apresentam essa relação. Porém, em baixo N, UFVM100(HS)C1 e UFVM100(HS)C2 mesmo apresentando valores similares de AP, AE e DC, diferiram bastante quanto a AcQ, exibindo a menor e a maior taxa de AcQ, respectivamente. Também é possível observar a não associação entre AcQ e os demais caracteres significativos em relação a UFVM200 e UFVM200(HS)C2, em baixo N. Shi *et al.* (2016) também encontraram graus distintos de AcQ em cultivares com DC e altura similares. Além dos caracteres morfológicos do colmo, há também um componente estrutural relacionado ao acamamento e quebraimento de colmo (FORELL et al., 2015; ROBERTSON et al., 2017; SHI et al., 2016). Durães (2006) associa o fenômeno da “isoporização” do colmo de milho à restrição da produção de fotoassimilados, como é o caso do estresse por baixo N (BANZINGER, 2000).

**Tabela 3.** Médias dos caracteres de arquitetura de plantas de seis populações de milho em condições de baixo e alto N. Coimbra, MG. Brasil

Condições	AP <sup>1/</sup>	AE	AF	CEAB	CEAC	DC	AcQ(%)
Alto N	266,72a	148,39a	828,24a	16,8a	17,89 <sup>a</sup>	25,95a	9,5a
Baixo N	236,25b	130,38b	650,81b	14,77b	15,64b	21,12b	13,0a
% variação	-11,42%	-12,14%	-21,42%	-12,08%	-12,58%	-18,61%	-

<sup>1/</sup>AP, altura de planta(cm); AE, altura de espiga(cm); AF, área da folha da espiga (cm<sup>2</sup>); CEAB, comprimento de entrenó abaixo da espiga (cm); CEAC, comprimento de entrenó acima da espiga (cm); DC, diâmetro de colmo (mm); AcQ, plantas acamadas e quebradas (%). Valores seguidos das mesmas letras, dentro as colunas, não diferiram significativamente (LSD, 0,05)

Os caracteres que apresentaram efeito de densidade de plantas pelo teste F foram submetidos a análise de regressão. DC e AF reduziu significativamente ( $P < 0,05$ ) com o aumento da densidade de plantas em ambos os níveis de N. CEAB aumentou significativamente ( $P < 0,05$ ) mediante aumento de densidades populacionais. AP e AE apresentaram resposta quadrática ao aumento da densidade de plantas e tiveram suas médias maximizadas na população de 105 mil plantas ha<sup>-1</sup> em alto N. Em relação ao AcQ, como houve interação entre populações e densidades

populacionais para esse caractere e, então, desdobrou-se a interação em efeito de populações dentro das densidades populacionais. UFVM100(HS)C2 e UFVM200(HS)C2 em baixo N e UFVM100(HS)C1, UFVM100(HS)C2 e UFVM200(HS)C2 em alto N, apresentaram regressões lineares positivas para AcQ. UFVM100 e UFVM200(HS)C1, apresentaram regressões quadráticas em baixo N e alto N, respectivamente. Os pontos de máxima para UFVM100 e UFVM200(HS)C1 foram em 43,5 mil plantas ha<sup>-1</sup> e 51 mil plantas ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

**Tabela 4.** Influência da densidade de plantas em caracteres de arquitetura de plantas de seis populações de milho em condições baixo e alto N.

Caractere	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
<i>Baixo N</i>		
Área foliar (cm <sup>2</sup> )	$\hat{y} = 847,41^{**} - 2,9127x^{**}$	0,95
Diâmetro de colmo (mm)	$\hat{y} = 27,66^{**} - 0,0969x^{**}$	0,89
<sup>1/</sup> Acamamento e quebramento (%)		
-UFVM100	$\hat{y} = 0,92^{**} - 0,0087x^{**} + 0,95$	
-UFVM100(HS)C2	$\hat{y} = 0,65^{**} + 0,0027x^{**}$	0,93
-UFVM200(HS)C2	$\hat{y} = 0,65^{**} + 0,0021x^{**}$	0,81
<i>Alto N</i>		
Altura de planta (cm)	$\hat{y} = 237,93^{**} + 0,69x^{**} - 0,0034$	0,92
Altura de espiga (cm)	$\hat{y} = 117,96^{**} + 0,7x^{**} - 0,0032x^{2**}$	0,96
Área foliar (cm <sup>2</sup> )	$\hat{y} = 967,66^{**} - 2,07x^{**}$	0,98
Comprimento de entrenó abaixo da	$\hat{y} = 15,67^{**} + 0,02x^*$	0,45
Diâmetro de colmo (mm)	$\hat{y} = 33,09^{**} - 0,11x^{**}$	0,97
<sup>1/</sup> Acamamento e quebramento (%)		
-UFVM100(HS)C1	$\hat{y} = 0,65^{**} + 0,0021x^{**}$	0,77
-UFVM100(HS)C2	$\hat{y} = 0,72^{**} + 0,0012x^{**}$	0,73
-UFVM200(HS)C1	$\hat{y} = 0,86^{**} - 0,0051x^{**} + 0,91$	
-UFVM200(HS)C2	$\hat{y} = 0,62^{**} + 0,0022x^{**}$	0,87

<sup>1/</sup>  $\hat{y} = \sqrt{AcQ} + 0,5$ . “\*” e “\*\*” simbolizando P < 0,05 e 0,01, respectivamente, pelo teste F. Densidade 1.000 plantas ha<sup>-1</sup>.

Na literatura, vários estudos tem relatado aumento de AP, AE e AcQ e redução de AF e DC mediante aumento da densidade populacional (DIAS et al., 2019; SANGOI et al., 2002; SHI et al., 2016). De acordo com Sangoi *et al.* (2002), o aumento do porte da planta é consequência de uma maior competição por luz, assim como a redução

de AF e DC são conseqüências do aumento da competição intraespecífica que é exacerbada pelo aumento da densidade populacional. Dada a restrição de N ser um limitador do acúmulo de biomassa (CIAMPITTI; VYN, 2011) e o aumento de D ser um potencializador de todo tipo de estresse (TROYER, 1996), o efeito compensatório do aumento do porte das plantas – visando a redução da competição por luz – não pôde ser observado em baixo N.

### 4.3 Produtividade e Características de Espiga

Houve efeito ( $P < 0,05$ ) de população para NGE e CG em ambos os níveis de N, NFE apenas em alto N e PG apenas em baixo N (Tabela 5). Para densidade de plantas, houve efeito ( $P < 0,05$ ) para todos os caracteres de produtividade e características de espiga nos dois níveis de N. Exceto para CG, houve efeito dos níveis de N para os demais caracteres. Não houve efeito de interação PxD para produtividade e características de espigas (Tabela S2). Houve efeitos ( $P < 0,05$ ) de interações de primeira ordem PxN para NGE, P1000 e PG e DxN para PROL, NGE, P1000 e PG (Tabela S2). Os coeficientes de variação (CV) variaram de 5,89% (NFE) à 37,14% (CE) e 6,05%(NFE) a 39,21%(CE) em parcela e subparcela, respectivamente em baixo N. Em alto N os CVs variaram de 4,70%(NGE) a 11,10% (PROL) e 4,90%(NFE) a 10,80%(PG) para parcela e subparcela, respectivamente (Tabela 5). Os valores de CV podem ser considerados de baixos a intermediários, a exceção de CV%(a) de PG em baixo N e CV%(a) e CV%(b) de CE em ambos os níveis de N (FRITSCHÉ-NETO et al., 2012). Soares *et al.*(2011) encontraram valores de CV-%(a) de 20,0% em alto N e 32,3% em baixo N, para PG. Valores de CV mais alto para PG e caracteres de espiga em condições de estresse têm sido comumente encontrados (BANZIGER; BETRÁN; LAFITTE, 1997; DIAS et al., 2019; SOARES et al., 2011; SOUZA et al., 2010).

Em baixo N, as duas populações com menores NGE, UFVM200(HS)C1 (365,67 grãos espiga<sup>-1</sup>) e UFVM100 (403,28 grãos espiga<sup>-1</sup>), foram as que apresentaram menor PG e as duas com maior NGE, UFVM100(HS)C1 (476,52 grãos espiga<sup>-1</sup>) UFVM100(HS)C2 (445,45 grãos espiga<sup>-1</sup>), foram as mais produtivas (Tabela 6). Em alto N, não houve diferença significativa para PG, que variou de 6635,90 kg ha<sup>-1</sup> em UFVM100 a 7061,61 UFVM100(HS)C1, apresentando uma diferença de apenas 425,7 kg ha<sup>-1</sup> entre a mais e a menos produtiva. Baixo N teve PG 40,20% menor do que alto N e foi o caractere que mais reduziu a média em função do estresse de N. Em alto N, NGE variou de 482,70 grãos espiga<sup>-1</sup> (UFVM200) a 514,20 grãos espiga<sup>-1</sup>

(UFVM100(HS)C2). Não houve diferença significativa para NGE entre ciclos originados da mesma população em alto N. A média de NGE em baixo N foi 15,43% menor do que em alto N (Tabela 8). CG não apresentou diferenças significativas entre níveis de N. CG teve diferenças principalmente relacionadas as populações derivadas de UFVM100 e UFVM200, sendo os maiores e menores valores respectivamente. Dentro das populações descendentes de UFVM100 e UFVM200, em baixo N, houve maior coincidência entre valores de CG e PG. NFE variou de 14,18 fileiras espiga<sup>-1</sup> (UFVM100) a 15,17 fileiras espiga<sup>-1</sup> (UFVM200(HS)C2) e apresentou a menor diferença percentual entre níveis de N (1,17%).

**Tabela 5.** Resumo da análise de variância para caracteres de arquitetura de plantas mensurados em seis populações de milho avaliadas em condições de baixo e alto N. Coimbra, MG. Brazil.

FV	GL	PROL	NFE	NGE	CE	P1000 <sup>1</sup>	CG	PG
<b>Baixo N</b>								
Bloco	2	0,04	0,03	6677,65	25,35	1775,19	0,19	2262335,12
População (P)	5	0,01	1,87	25892,38*	35,46	2719,66	8,97**	10647464,37*
Resíduo (a)	10	0,01	0,71	4952,44	24,08	872,58	0,73	2236099,83
CV%(a)		9,00%	5,89%	16,61%	37,14%	10,64%	8,42%	37,04%
Densidade (D)	5	0,34**	3,69**	118554,69**	80,33*	12299,71**	4,09**	2592121,16**
P x D	25	0,01	0,6	1209,85	22,12	614,02	0,6	311204,1
Resíduo (b)	60	0,01	0,75	2261,71	26,85	393,7	0,52	488303,85
CV% (b)		9,21%	6,05%	11,23%	39,21%	7,15%	7,12%	17,31%
<b>Alto N</b>								
Bloco	2	0,01	0,13	144,69	2,12	348,68	7,86	3884384,65
População (P)	5	0,01	2,86*	2986,95*	0,71	443,59,	3,24**	469691,57
Resíduo (a)	10	0,01	0,64	554,06	0,58	300,75	0,42	377152,31
CV%(a)		11,10%	5,50%	4,70%	4,80%	5,30%	6,30%	9,10%
Densidade (D)	5	0,69**	2,79**	39804,36**	26,52**	3308,03**	0,85*	8017803,91**
P x D	25	0,01	0,70	1916,95	0,74	295,16	0,32	484222,57
Resíduo (b)	60	0,01	0,52	1251,63	0,63	363,83	0,36	532862,73
CV% (b)		9,50%	4,90%	7,10%	5,00%	5,80%	5,80%	10,80%

<sup>1/</sup> P1000, massa de 1000 grãos; NFE, número de fileiras da espiga; NGE número de grãos na espiga; CE, comprimento de espiga; CG, comprimento de grão; PROL, prolificidade e PG, produtividade de grãos. “\*” e “\*\*\*” simbolizando P < 0,05 e 0,01, respectivamente, pelo teste F.

Ao avaliar diferentes o desempenho de híbridos de milho sob densidades populacionais, Kappes *et al.*(2011) também não encontraram interação de genótipos e densidade populacional para produtividade e caracteres de espiga. Para DeBruin *et al* (2017), NGE também foi um dos caracteres que mais contribuiu para o melhor desempenho de cultivares em baixo N. Plantas sob estresse por baixo N tendem a prolongar o intervalo entre florescimento masculino e feminino (BANZINGER, 2000; MONNEVEUX; ZAIDI; SANCHEZ, 2005). O aumento do intervalo entre florescimentos é um dos principais fatores que impacta negativamente os valores de NGE (EDMEADES *et al.*, 2000; EDREIRA *et al.*, 2011; KAPPES *et al.*, 2011). Dias *et al.* (2019) também encontraram relação entre híbridos mais produtivos e CG; é possível observar essa relação entre e dentro dos ciclos derivados de cada população. A desassociação entre PG e NFE em condições favoráveis de N também foi observada em outros trabalhos (DIAS *et al.*, 2019; OMONDI; NORTON; ASHILENJE, 2014).

**Tabela 6.** Médias de componentes de produção e produtividade de grãos mensurados em seis populações de milho em condições de baixo e alto N. Coimbra, MG, Brasil

Populações	Baixo N			Alto N		
	NGE <sup>1/</sup>	CG	PG	NFE	NGE	CG
UFVM100	403,28bc	10,17b	3181,59c	14,18c	513,22a	10,74a
UFVM100(HS)C1	476,52a	11,08a	5228,90a	14,50bc	507,59ab	10,60a
UFVM100(HS)C2	445,45ab	10,83a	4380,52ab	14,22c	514,1967a	10,50a
UFVM200	433,84ab	9,81bc	4110,67bc	14,24c	482,70c	9,98b
UFVM200(HS)C1	365,67c	9,30c	3214,13c	14,83ab	490,14bc	9,90b
UFVM200(HS)C2	417,24bc	9,57bc	4105,69bc	15,17 <sup>a</sup>	497,84abc	9,73b
Médias	423,67	10,13	4036,92	14,52	500,95	10,24

<sup>1/</sup> NGE, número de grão na espiga; CG, comprimento de grãos (mm); PG, produtividade de grãos (kg ha<sup>-1</sup>) e NFE, número de fileiras. Valores seguidos das mesmas letras, dentro as colunas, não diferiram significativamente (LSD, 0,05).

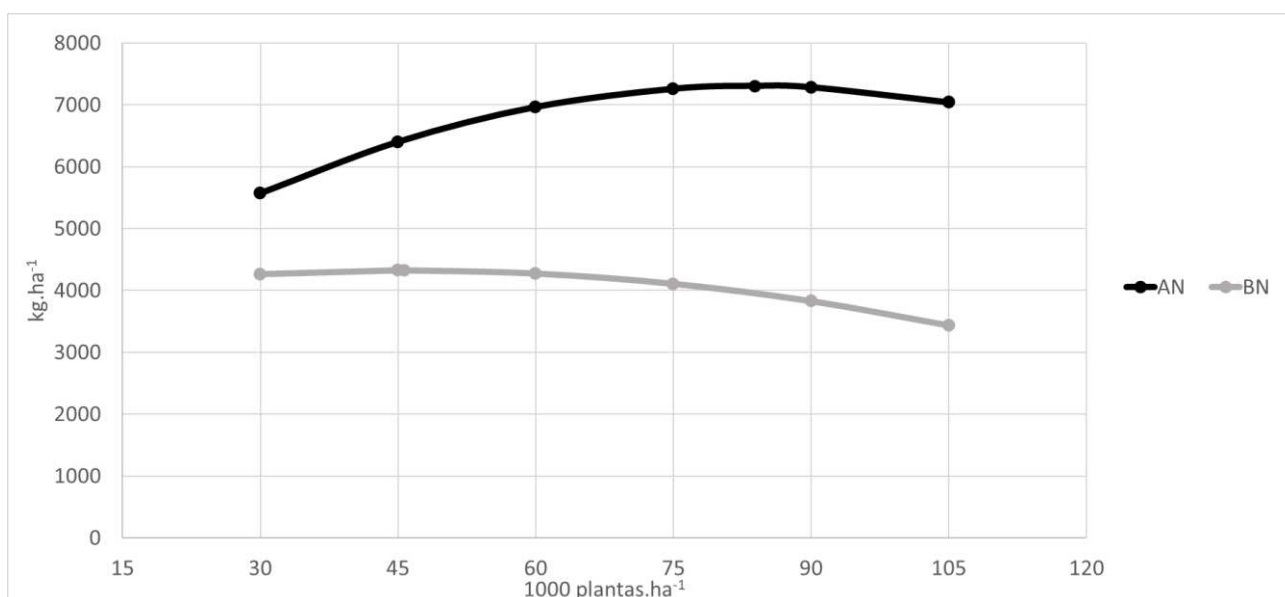
Como não houve efeito de população de milho para PG em alto N e efeito de interação populações de milho x níveis de N (Table S1), as discussões acerca da eficiência dos ciclos de seleção serão feitas com os resultados de BN. A ausência de interação P x N para essas populações também indica a possibilidade de selecionar indivíduos mais eficientes em BN avaliando-os sob AN. Isso se torna uma vantagem devido à dificuldade de se obter várias áreas representativas de baixo N. Ambos os ciclos derivados de UFVM100 diferiram da população original; nos ciclos derivados de UFVM200 não houve diferença significativa da população original. Não houve o progresso esperado para PG em relação aos ciclos de seleção. Ganhos negativos foram observados no segundo ciclo de seleção da população UFVM100 e no primeiro ciclo de seleção recorrente de UFVM200. Esperava-se que os segundos ciclos fossem os mais produtivos, o que não ocorreu em nenhuma das populações. Apesar de UFVM100(HS)C2 ter significativamente mais produtiva que UFVM100, teve uma redução de cerca de 858 kg.ha<sup>-1</sup> em relação ao ciclo anterior, do qual não diferiu significativamente. Entre os ciclos de UFVM200 houve diferença significativa para PG; do ciclo 0 para o ciclo 1 houve uma redução de cerca de quase 896 kg ha<sup>-1</sup> e no ciclo seguinte o aumento de 891 kg ha<sup>-1</sup>. Acredita-se que o provável motivo desse comportamento irregular tenha a ver com a estrutura genética das populações. Tanto UFVM100 como UFVM200 são compostos de híbridos comerciais. UFVM100 composta por materiais do grão mais amarelado, característicos do grupo “dentado” e UFVM200 por materiais de grão alaranjado, característicos do grupo “duro”. Dado a essa composição é possível que grande parte da variância genética das populações originais seja causada por alelos com ação de desvio de dominância. Como a seleção foi baseada em progênies de meios-irmãos, que tem como variância genética ( $\sigma_g^2$ ) igual a ¼ da variância aditiva ( $\sigma_a^2$ ) da população, é possível que alelos com ação e desvio de dominância estejam sendo transmitidos aleatoriamente, causando essas discrepâncias entre o observado e o esperado para os ciclos de seleção. Teoricamente a seleção baseada em progênies endogâmicas seria o método mais efetivo, dado a um maior acesso da variância genética da população (COMSTOCK, 1964; HOLTHAUS; LAMKEY, 1995; WRIGHT, 1980), porém Holthaus & Lamkey (1995), ao avaliar diferentes métodos de seleção recorrente na população BSSS, observaram que os métodos com uso de testador foram mais efetivos do que a seleção intrapopulacional baseada em progênies S2. Holthaus & Lamkey (1995) concluíram que a falta de efetividade do método S2 pode ser devido a variância

genética da população BSSS ser composta por porções equivalentes de variância aditiva e de desvio de dominância ( $\sigma_d^2/\sigma_a^2 = 1,05$ ). Weyhrich *et al.* (1998) avaliaram a população BS11, cuja variância devido a desvio de dominância foi substancialmente menor que a variância aditiva, e registraram métodos baseados em progênies endogâmicas (S1 e S2) e *ear-to-row* (meios-irmãos) como os mais efetivos no melhoramento *per se* da população BS11.

Houve efeito ( $P < 0,05$ ) da densidade populacional em todos os caracteres de produtividade e características de espiga em ambos os níveis de N (Tabela 5). PG teve resposta quadrática ao aumento de população de plantas nos dois níveis de N. Em baixo N, a densidade de plantas de 45,63 mil plantas ha<sup>-1</sup> maximizou com a produtividade de grãos de 4322,11 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 3). Em alto N, a produtividade de grãos máxima de 7303,01 kg ha<sup>-1</sup> foi alcançada na densidade de 83880 mil plantas ha<sup>-1</sup> (Figura 3). Exceto para PG, os demais caracteres reduziram linearmente com o aumento da densidade populacional. Houve interação significativa ( $P < 0,05$ ) D x N para PG, PROL, NGE, P1000 (Tabela S2). Em comparação com os valores de D ótimos para PG em baixo e alto N; NFE, NGE, CE, P1000 e CG foram similares e tiveram  $|^{AN}/_{BN} \%| \leq 8\%$  (Tabela 9). Alto N teve densidade populacional ótima 84% maior, PG 69% maior e PROL 38% menor do que baixo N (Tabela 9).

A resposta quadrática de PG ao aumento da densidade de plantas encontrada no presente trabalho tem sido relatada em outros trabalhos da literatura (AL-NAGGAR *et al.*, 2015; DIAS *et al.*, 2019; MONNEVEUX; ZAIDI; SANCHEZ, 2005; TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004). Segundo Ciampitti e Vyn (2011), até o ponto de máxima há uma compensação da perda de produção por planta (g planta<sup>-1</sup>) pelo aumento do número de plantas contribuindo para a produção total. Os principais fatores envolvidos na redução na produtividade após D ótimo são: redução da taxa de crescimento, redução da taxa de absorção e partição de N na planta, aumento da variabilidade entre plantas e principalmente da taxa de infertilidade (CIAMPITTI; VYN, 2011). Em baixo N, a partir do ponto de máxima para PG, é quando PROL assume valores  $< 1$ .

**Figura 3.** Regressão das médias de produtividade em função das densidades populacionais em AN e BN.



Dado que o aumento de D é capaz de aumentar os efeitos deletérios de vários tipos de estresse, bióticos e abióticos (TROYER, 1996), é natural que uma população já sob estresse (BN) tenha uma tolerância menor ao aumento de D. Haarhoff e Swanepoel (2018) avaliaram dados coletados em 64 trabalhos de 13 países e encontraram D ótimos diretamente proporcionais a taxa de N aplicada. Nos resultados do presente trabalho, é possível observar que os valores de  $\widehat{\beta}_1$ , das regressões lineares, exceto para PROL, representam maiores reduções em baixo N do que em alto N à medida que D aumenta. Apesar de BN apresentar  $\widehat{\beta}_1$  maior que AN para PROL, de modo geral PROL apresentou menores valores em BN (Tabela 8). Menores valores de PROL, ou maiores taxas de infertilidade, estão relacionados ao estresse por baixo N (BANZINGER, 2000; CIAMPITTI; VYN, 2011).

**Tabela 7.** Influência da densidade de plantas em caracteres de componentes de produção de seis populações de milho em condições baixo e alto N.

Caractere	Equação de Regressão	R <sup>2</sup>
Baixo N		
Prolificidade (espigas.planta <sup>-1</sup> )*	$\hat{y} = 1,2^{**} - 0,0044x^*$	0,80
Número de fileiras **	$\hat{y} = 15,39^{**} - 0,0153x^{**}$	0,90
Número de grãos **	$\hat{y} = 614,24^{**} - 2,8233x^{**}$	0,95
Comprimento de espiga (cm)*	$\hat{y} = 17,69^{**} - 0,0663x^*$	0,78
Massa de 1000 grãos (g) **	$\hat{y} = 339,64^{**} - 0,9197x^{**}$	0,97
Comprimento de grão(mm)**	$\hat{y} = 11,25^{**} - 0,0166x^{**}$	0,96
Produtividade de grãos (kg.ha <sup>-1</sup> ) *	$\hat{y} = 3797,84^{**} + 22,97x - 0,2516x^{2*}$	0,83
Alto N		
Prolificidade (espigas.planta <sup>-1</sup> ) **	$\hat{y} = 1,46^{**} - 0,007x^{**}$	0,86
Número de fileiras *	$\hat{y} = 15,3^{**} - 0,01x^*$	0,66
Número de grãos**	$\hat{y} = 610,2^{**} - 1,62x^{**}$	0,93
Comprimento de espiga (cm)**	$\hat{y} = 18,93^{**} - 0,04x^{**}$	0,99
Massa de 1000 grãos (g) **	$\hat{y} = 360,32^{**} - 0,46x^{**}$	0,89
Comprimento de grão(mm)**	$\hat{y} = 10,74^{**} - 0,01x^{**}$	0,92
Produtividade de grãos (kg.ha <sup>-1</sup> ) **	$\hat{y} = 3106,11^{**} + 100,07x^{**} - 0,5965x^{2**}$	0,98

“\*\*” e “\*\*\*” simbolizando P < 0,05 e 0,01, respectivamente, pelo teste F. Densidade 1.000 plantas ha<sup>-1</sup>.

**Tabela 8.** Médias dos componentes de produção e produtividade de grãos de seis populações de milho em condições de baixo e alto N. Coimbra, MG. Brasil

Condições	PROL <sup>1/</sup>	NFE	CE	NGE	P1000	CG	PG
Alto N	1,02a	14,52a	16,02a	500,95a	329,58a	10,24a	6751,2a
Baixo N	0,9b	14,35b	13,21b	423,67b	277,55b	10,13a	4036,92b
% variação	-11,76%	-1,17%	-17,54%	-15,43%	-15,79%	-	-40,20%

<sup>1/</sup>PRL, prolificidade (espigas.planta<sup>-1</sup>); NFE, número de fileiras; CE, comprimento de espiga (cm); NGE, número de grão na espiga; P1000, massa de 1000 grãos (g); CG, comprimento de grãos (mm) e PG, produtividade de grãos (kg.ha<sup>-1</sup>). Valores seguidos das mesmas letras, dentro as colunas, não diferiram significativamente (LSD, 0,05).

Visando melhorar as populações UFVM100 e UFVM200 para altas densidades populacionais seria necessário implementar principalmente suas capacidades de manter PROL em relação ao aumento de D. Mesmo tendo 38,230 mil plantas ha<sup>-1</sup> a mais, alto N teve apenas 6.355,6 espigas ha<sup>-1</sup> a mais do que baixo N. No caso de alto

N, muitas plantas estéreis estariam causando um estresse desnecessário na plantação como um todo. Segundo Tokatlidis & Koutroubas (2004) o fator chave para o aumento de plantas estéreis (ou redução da prolificidade) é a extensão do intervalo entre florescimento masculino e feminino. Cox (1996) e Prior & Russel (1975) observaram melhores respostas de genótipos prolíficos sob altas densidades. Materiais prolíficos possuem maior capacidade de compensação, o que possibilitaria maiores produtividades sob densidades menores e daria maior estabilidade produtiva à população de plantas frente a estresses bióticos e abióticos (POMMEL; BONHOMME, 1998; TOKATLIDIS; KOUTROUBAS, 2004).

**Tabela 9.** Valores calculados com base nas regressões estimadas para produtividade de grãos e componentes de produção nas densidades ótimas para produtividade em baixo N (BN) e alto N (AN).

Caracteres <sup>1/</sup>	BN	AN	$AN/BN$ %
	<sup>2/</sup> 45650 plantas ha <sup>-1</sup>	83880 plantas ha <sup>-1</sup>	184%
<sup>3/</sup> Espigas.ha <sup>-1</sup>	45650	52005,6	114%
PROL	1,00	0,62	62%
NFE	14,69	14,46	98%
NGE	485,36	474,31	98%
CE	14,66	15,57	106%
P1000	297,66	321,73	108%
CG	10,49	9,90	94%
PG	4322,11	7303,09	169%

<sup>1/</sup> PRL, prolificidade (espigas planta<sup>-1</sup>); NFE, número de fileiras; CE, comprimento de espiga (cm); NGE, número de grão na espiga; P1000, massa de 1000 grãos (g); CG, comprimento de grãos (mm) e PG, produtividade de grãos (kg ha<sup>-1</sup>).<sup>2/</sup> Densidades populacionais que maximizam a PG em BN e AN. <sup>3/</sup> Espigas ha<sup>-1</sup> = D ótimo x PROL.

## 5. CONCLUSÕES

Altura de planta, altura de espiga e diâmetro de colmo não foram os fatores determinantes para o que ocorresse plantas acamadas e quebradas sob baixo N.

Houve interação significativa entre populações e densidades populacionais para porcentagem de plantas acamadas e quebradas em diferentes populações para cada ambiente.

UFVM100(HS)C1 foi a população mais produtiva em baixo N.

Não houve diferença significativa para produtividade de grãos nas populações avaliadas em alto N.

O primeiro ciclo de seleção recorrente em UFVM100 e o segundo em UFVM200 foram os ciclos que obtiveram os maiores ganhos ciclo<sup>-1</sup> em produtividade.

As densidades populacionais que maximizaram as produtividades em baixo N e alto N foram 45,650 e 83,880 mil plantas por hectare, respectivamente.

A média de prolificidade na densidade ótima para produtividade em alto N foi baixa.

## REFERÊNCIAS

- AL-NAGGAR, A. M. M. et al. Maize response to elevated plant density combined with lowered N-fertilizer rate is genotype-dependent. **The Crop Journal**, v. 3, n. 2, p. 96–109, abr. 2015.
- ALTIERI, M. A. Agroecology, small farms, and food sovereignty. **Monthly review**, v. 61, n. 3, p. 102–113, 2009.
- BANZIGER, M.; BETRÁN, F. J.; LAFITTE, H. R. Efficiency of High-Nitrogen Selection Environments for Improving Maize for Low-Nitrogen Target Environments. **Crop Science**, v. 37, n. 4, p. 1103–1109, jul. 1997.
- BÄNZIGER, M.; LAFITTE, H. R. Efficiency of secondary traits for improving maize for low-nitrogen target environments. **Crop Science**, v. 37, n. 4, p. 1110–1117, 1997.
- BANZINGER, M. **Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: From theory to practice**. [s.l.] Cimmyt, 2000.
- BORÉM, A.; MIRANDA, G. V. Melhoramento de plantas. rev. e ampl. **Viçosa: UFV**, 2013.
- BREKKE, B.; EDWARDS, J.; KNAPP, A. Selection and Adaptation to High Plant Density in the Iowa Stiff Stalk Synthetic Maize (*Zea mays* L.) Population: II. Plant Morphology. **Crop Science**, v. 51, n. 6, p. 2344–2351, nov. 2011.
- CAIXETA, D. S. et al. Early indirect selection for nitrogen use efficiency in maize<sup>1</sup>. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, p. 369–378, jun. 2015.
- CAMERON, K. C.; DI, H. J.; MOIR, J. L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. **Annals of Applied Biology**, v. 162, n. 2, p. 145–173, 2013.
- ÇARPICI, E. B.; ÇEL, N. YIELD AND QUALITY OF FORAGE MAIZE AS INFLUENCED BY PLANT DENSITY AND NITROGEN RATE. p. 5, 2010.
- CASTLEBERRY, R. M.; CRUM, C. W.; KRULL, C. F. Genetic yield improvement of US maize cultivars under varying fertility and climatic environments 1. **Crop science**, v. 24, n. 1, p. 33–36, 1984.
- CIAMPITTI, I. A.; VYN, T. J. A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. **Field Crops Research**, v. 121, n. 1, p. 2–18, 28 fev. 2011.
- COMPTON, W. A.; BAHADUR, K. Ten Cycles of Progress from Modified Ear-to-Row Selection in Corn <sup>1</sup>. **Crop Science**, v. 17, n. 3, p. 378–380, maio 1977.
- COMPTON, W. A.; COMSTOCK, R. E. More on Modified Ear-to-Row Selection in Corn <sup>1</sup>. **Crop Science**, v. 16, n. 1, p. 122–122, jan. 1976.
- COMSTOCK, R. E. **Selection procedures in corn improvement**. 1964
- CONAB. **Séries Históricas das Safras, Milho 1ª Safra; Milho 2ª Safra; Milho 3ª Safra; Milho (1ª, 2ª e 3ª Safras)**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=20>>. Acesso em: 9 fev. 2021.

COX, W. J. Whole-plant physiological and yield responses of maize to plant density. **Agronomy Journal**, v. 88, n. 3, p. 489–496, 1996.

CRUZ, C. D. **Princípios de genética quantitativa**. [s.l.] Universidad Federal de Viçosa, 2005.

DEBRUIN, J. L. et al. Grain Yield and Nitrogen Accumulation in Maize Hybrids Released during 1934 to 2013 in the US Midwest. **Crop Science**, v. 57, n. 3, p. 1431–1446, 2017.

DESSAU, R. B.; PIPPER, C. B. "R"-project for statistical computing. **Ugeskrift for laeger**, v. 170, n. 5, p. 328–330, 2008.

DIAS, F. S. et al. Agronomic Responses of Maize Hybrids to Row Spacing and Plant Population in the Summer and Winter Seasons in Brazil. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 6, p. 3119–3129, nov. 2019.

DONALD, C. T. The breeding of crop ideotypes. **Euphytica**, v. 17, n. 3, p. 385–403, 1968.

DORIGATTI, G. **Você sabia que o Brasil faz uma 3ª safra de milho? Cultivo na região Nordeste está crescendo e aumentando oferta do cereal**. Disponível em: </videos/milho/265015-voce-sabia-que-o-brasil-faz-uma-3-safra-de-milho-cultivo-na-regiao-nordeste-esta-crescendo-e-aumentando.html>. Acesso em: 9 fev. 2021.

DUNCAN, W. G. Leaf Angles, Leaf Area, and Canopy Photosynthesis <sup>1</sup>. **Crop Science**, v. 11, n. 4, p. 482–485, jul. 1971.

DURÃES, F. O. M. **“Isoporização” em colmo de milho**. [s.l.] Embrapa Milho e Sorgo, 2006.

DUVICK, D. N. The Contribution of Breeding to Yield Advances in maize (*Zea mays* L.). In: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 2005. v. 86p. 83–145.

DUVICK, D. N.; CASSMAN, K. G. Post-Green Revolution Trends in Yield Potential of Temperate Maize in the North-Central United States. **Crop Science**, v. 39, n. 6, p. 1622–1630, nov. 1999.

EDMEADES, G. O. et al. The role and regulation of the anthesis-silking interval in maize. **Physiology and modeling kernel set in maize**, v. 29, p. 43–73, 2000.

EDREIRA, J. I. R. et al. Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. **Field Crops Research**, v. 123, n. 2, p. 62–73, ago. 2011.

ERTIRO, B. T. et al. Efficiency of indirect selection for grain yield in maize (*Zea mays* L.) under low nitrogen conditions through secondary traits under low nitrogen and grain yield under optimum conditions. **Euphytica**, v. 216, n. 8, p. 134, ago. 2020.

FALCONER, D. S. **Introduction to quantitative genetics**. [s.l.] Pearson Education India, 1996.

FERNANDES, F. C. S. et al. Doses, Eficiência e Uso de Nitrogênio por Seis Cultivares de Milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, n. 2, p. 195–204, 30 ago. 2005.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. ExpDes: an R package for ANOVA and experimental designs. **Applied Mathematics**, v. 5, n. 19, p. 2952, 2014.

FIESP. **Safra Mundial de Milho**. Disponível em: <<https://www.fiesp.com.br/indices-pesquisas-e-publicacoes/safra-mundial-de-milho-2/>>. Acesso em: 9 fev. 2021.

FORELL, G. V. et al. Preventing lodging in bioenergy crops: a biomechanical analysis of maize stalks suggests a new approach. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 14, p. 4367–4371, jul. 2015.

FOWLER, D. et al. Effects of global change during the 21st century on the nitrogen cycle. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 15, n. 24, p. 13849–13893, 16 dez. 2015.

FRITSCHÉ-NETO, R. et al. Updating the ranking of the coefficients of variation from maize experiments. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 34, n. 1, p. 99–101, mar. 2012.

GALLOWAY, J. N. et al. A chronology of human understanding of the nitrogen cycle <sup/>. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 368, n. 1621, p. 20130120, 5 jul. 2013.

GALVÃO, J. C. C.; BORÉM, A.; PIMENTEL, M. A. Milho: do plantio à colheita. **UFV**, p. 46–47, 2015.

HAARHOFF, S. J.; SWANEPOEL, P. A. Plant Population and Maize Grain Yield: A Global Systematic Review of Rainfed Trials. **Crop Science**, v. 58, n. 5, p. 1819–1829, set. 2018.

HALLAUER, A. R. Recurrent selection in maize. **Plant Breed. Rev.**, v. 9, p. 115–179, 1992.

HALLAUER, A. R.; CARENA, M. J. Recurrent selection methods to improve germplasm in maize. p. 18, 2012.

HALLAUER, A. R.; CARENA, M. J.; MIRANDA FILHO, J. B. Quantitative genetics in maize breeding. **Quantitative genetics in maize breeding.**, n. Ed. 3, 2010.

HIREL, B.; KRAPP, A. Nitrogen Utilization in Plants I Biological and Agronomic Importance. In: **Reference Module in Life Sciences**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. B978012809633821265X.

HOLTHAUS, J. F.; LAMKEY, K. R. Population Means and Genetic Variances in Selected and Unselected Iowa Stiff Stalk Synthetic Maize Populations. **Crop Science**, v. 35, n. 6, p. 1581–1589, nov. 1995.

IMEA. **Custo de Produção - Milho**. Disponível em: <<http://www.imea.com.br/imea-site/relatorios-mercado-detalhe?c=3&s=3>>. Acesso em: 7 fev. 2021.

JAHANGIRLOU, M. R. et al. Grain Quality of Maize Cultivars as a Function of Planting Dates, Irrigation and Nitrogen Stress: A Case Study from Semiarid Conditions of Iran. **Agriculture**, v. 11, n. 1, p. 11, 27 dez. 2020.

KAMARA, A. Y. et al. PERFORMANCE OF DIVERSE MAIZE GENOTYPES UNDER NITROGEN DEFICIENCY IN THE NORTHERN GUINEA SAVANNA OF NIGERIA. **Experimental Agriculture**, v. 41, n. 2, p. 199–212, abr. 2005.

KAPPES, C. et al. Desempenho de híbridos de milho em diferentes arranjos espaciais de plantas. **Bragantia**, v. 70, n. 2, p. 334–343, 2011.

- LAFITTE, H. R.; EDMEADES, G. O. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize III. Variation in yield across environments. **Field Crops Research**, v. 39, n. 1, p. 27–38, out. 1994a.
- LAFITTE, H. R.; EDMEADES, G. O. Improvement for tolerance to low soil nitrogen in tropical maize I. Selection criteria. **Field Crops Research**, v. 39, n. 1, p. 1–14, out. 1994b.
- LAMBERT, R. J. Divergent selection for ear leaf area in maize. **Maydica**, v. 55, n. 2, p. 155–161, 2010.
- LAMBERT, R. J.; MANSFIELD, B. D.; MUMM, R. H. Effect of leaf area on maize productivity. p. 7, 2014.
- LIU, G. et al. Leaf Removal Affects Maize Morphology and Grain Yield. **Agronomy**, v. 10, n. 2, p. 269, 13 fev. 2020.
- MCCOWN, R. L. et al. Strategies for Sustainable Crop Production in Semi-Arid Africa. **Outlook on Agriculture**, v. 21, n. 1, p. 21–31, mar. 1992.
- MENDIBURU, M. F. Package ‘agricolae’. **R Package, Version**, p. 1–2, 2019.
- MIKEL, M. A. Availability and Analysis of Proprietary Dent Corn Inbred Lines with Expired U.S. Plant Variety Protection. **Crop Science**, v. 46, n. 6, p. 2555–2560, 2006.
- MOCK, J. J.; PEARCE, R. B. An ideotype of maize. **Euphytica**, v. 24, n. 3, p. 613–623, 1975.
- MONNEVEUX, P.; ZAIDI, P. H.; SANCHEZ, C. Population Density and Low Nitrogen Affects Yield-Associated Traits in Tropical Maize. **Crop Science**, v. 45, n. 2, p. 535–545, mar. 2005.
- MONTGOMERY, E. G. Correlation studies in corn. **Neb. Agric. Exp. Stn. Annu. Rep**, v. 24, p. 108–159, 1911.
- MÔRO, G. V.; FRITSCHÉ-NETO, R. Importância e usos do milho no Brasil. **BORÉM, A.; GALVÃO, JCC; PIMENTEL, MA Milho: do plantio à colheita. Viçosa: Ed. UFV**, p. 9–25, 2015.
- MORRIS, M. L.; RISOPOULOS, J.; BECK, D. Genetic change in farmer-recycled maize seed: A review of the evidence. 1999.
- MUNDIM, G. B.; RODRIGUES, M. C.; DELIMA, R. O. Melhoramento para estresses abióticos. In: **Melhoramento de Milho**. 1a. ed. [s.l.] Rodrigo DeLima; Aluísio Borém, 2018. p. 220–239.
- NOOR, M. et al. Evidence of Improving Yield and Morphological Attributes via Half-Sib Family Recurrent Selection in Maize. **Journal of Experimental Agriculture International**, p. 557–570, 7 maio 2013.
- OJIEM, J. O.; RANSOM, J. K.; WAKHONYA, H. W. **Performance of hybrid and local maize with and without fertilizer in western Kenya**. Maize Productivity Gains Through Research and Technology Dissemination, Proceedings of the 5th Eastern and Southern Africa Regional Maize Conference in Arusha, Tanzania, CIMMYT Maize Program. **Anais...**1996

OMONDI, E. C.; NORTON, J. B.; ASHILENJE, D. S. Performance of a local open pollinated maize variety and a common hybrid variety under intensive small-scale farming practices. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 11, p. 950–955, 2014.

PATERNIANI, E. Importância do Milho na Agroindústria In: OSUNA. **J, A, E MORO, J, R, Produção e Melhoramento do Milho, Jaboticabal: FUNEP**, p. 1–12, 1995.

PEARCE, R. B.; MOCK, J. J.; BAILEY, T. B. Rapid Method for Estimating Leaf Area Per Plant in Maize <sup>1</sup>. **Crop Science**, v. 15, n. 5, p. 691–694, set. 1975.

PENDLETON, J. W. et al. Field Investigations of the Relationships of Leaf Angle in Corn (*Zea mays* L.) to Grain Yield and Apparent Photosynthesis <sup>1</sup>. **Agronomy Journal**, v. 60, n. 4, p. 422–424, jul. 1968.

PENG, B. et al. QTL analysis for yield components and kernel-related traits in maize across multi-environments. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 122, n. 7, p. 1305–1320, maio 2011.

PEREIRA FILHO, I.; BORGHI, E. Sementes de milho: nova safra, novas cultivares e continua a dominância dos transgênicos. **Embrapa Milho e Sorgo-Documents (INFOTECA-E)**, 2020.

PIMENTEL-GOMES, F. Curso de estatística experimental. 14. **Piracicaba: Universidade de São Paulo**, 2000.

POMMEL, B.; BONHOMME, R. Variations in the vegetative and reproductive systems in individual plants of an heterogeneous maize crop. **European Journal of Agronomy**, v. 8, n. 1–2, p. 39–49, 1998.

PRIOR, C. L.; RUSSELL, W. A. Yield Performance of Nonprolific and Prolific Maize Hybrids at Six Plant Densities 1. **Crop Science**, v. 15, n. 4, p. 482–486, 1975.

RENCHER, A. C. Methods of multivariate analysis. a john wiley & sons. **Inc. Publication**, p. 727, 2002.

ROBERTSON, D. J. et al. Maize Stalk Lodging: Morphological Determinants of Stalk Strength. **Crop Science**, v. 57, n. 2, p. 926–934, mar. 2017.

RODRIGUES, M. C. Avaliação de linhagens de milho tropical para eficiência no uso de nitrogênio. 2015.

ROVARIS, S. R. S. et al. Estimates of genetic parameter in maize commercial variety IPR 114 at Paraná State, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 4, p. 621–625, 29 set. 2011.

RUSSELL, W. A. **Comparative performance for maize hybrids representing different eras of maize breeding**. Proc. 29th Annu. Corn Sorghum Res. Conf. **Anais...**1974

RUSSELL, W. A. Agronomic performance of maize cultivars representing different eras of breeding. 1984.

RUSSELL, W. A. CONTRIBUTION OF BREEDING TO MAIZE IMPROVEMENT. **Iowa Stat**, p. 5, 1986.

RUSSELL, W. A. Genetic Improvement of Maize Yields. In: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, 1991. v. 46p. 245–298.

SANGOI, L. et al. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. **Field Crops Research**, v. 79, n. 1, p. 39–51, dez. 2002.

SHEHU, B. et al. Quantifying Variability in Maize Yield Response to Nutrient Applications in the Northern Nigerian Savanna. **Agronomy**, v. 8, n. 2, p. 18, 10 fev. 2018.

SHEIKH, F. Impact of half-sib family recurrent selection on grain yield in maize population ZM-309. **Pure and Applied Biology**, v. 8, n. 4, 10 dez. 2019.

SHELTON, A.; TRACY, W. Recurrent Selection and Participatory Plant Breeding for Improvement of Two Organic Open-Pollinated Sweet Corn (*Zea mays* L.) Populations. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5139–5152, 27 abr. 2015.

SHI, D. Y. et al. Effects of plant density and nitrogen rate on lodging-related stalk traits of summer maize. **Plant, Soil and Environment**, v. 62, n. No. 7, p. 299–306, 24 jul. 2016.

SMIL, V. **Enriching the earth: Fritz Haber, Carl Bosch, and the transformation of world food production**. [s.l.] MIT press, 2001.

SOARES, M. O. et al. Parâmetros genéticos de uma população de milho em níveis contrastantes de nitrogênio. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 168–174, mar. 2011.

SOUZA, L. V. DE et al. Inter-relações de nitrogênio e fósforo na capacidade de combinação e na seleção em milho. **Revista Ceres**, v. 57, n. 5, p. 633–641, out. 2010.

SOUZA, J. C. Cultivares. In: **Melhoramento de Milho**. 1a. ed. [s.l.] Rodrigo DeLima; Aluísio Borém, 2018. p. 295–306.

SOUZA JÚNIOR, C. D. Melhoramento de espécies alógamas. **Recursos genéticos e melhoramento de plantas**, v. 1, 2001.

SOUZA JÚNIOR, C. L. Seleção Recorrente. In: **Melhoramento de Milho**. 1a. ed. [s.l.] Rodrigo DeLima; Aluísio Borém, 2018. p. 73–101.

TAIZ, L. et al. **Plant physiology and development**. [s.l.] Sinauer Associates Incorporated, 2015.

TOKATLIDIS, I. S.; KOUTROUBAS, S. D. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. **Field Crops Research**, v. 88, n. 2–3, p. 103–114, ago. 2004.

TROYER, A. F. Breeding widely adapted, popular maize hybrids. **Euphytica**, v. 92, n. 1–2, p. 163–174, 1996.

UATE, J. V. et al. Genetic progress, adaptability and stability of maize cultivars for value of cultivation and use trials. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 41, n. 1, p. 42624, 24 maio 2019.

ULM, F. et al. Sustainable urban agriculture using compost and an open-pollinated maize variety. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 622–629, mar. 2019.

VAISSIE, P.; MONGE, A.; HUSSON, F. Factoshiny: perform factorial analysis from FactoMineR with a shiny application. **R package version**, v. 1, 2015.

VAN BREEMEN, N. et al. Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall. **Nature**, v. 299, n. 5883, p. 548–550, out. 1982.

VASAL, S. K. et al. **Choices among breeding procedures and strategies for developing stress tolerant maize germplasm. Developing Drought-and Low N-Tolerant Maize. Proceedings of a Symposium; El Batan, Tex.(Mexico); 25-29 Mar 1996.** ^ TDeveloping Drought-and Low N-Tolerant Maize. Proceedings of a Symposium; El Batan, Tex.(Mexico); 25-29 Mar 1996^ AEdmeades, GO Banziger, M. Mickelson, HR Peña-Valdivia, CB^ AMexico, DF (Mexico)^ BCIMMYT^ C1997. **Anais...**Centro Internacional de Mejoramiento de Maiz y Trigo (CIMMYT), Mexico DF ..., 1997

VERGUTZ, L.; NOVAIS, R. F. Recomendação de corretivos e adubação. **GALVÃO, J. CC; BORÉM, A.; PIMENTEL, MA Milho do Plantio à Colheita. Editora UFV, Viçosa**, p. 108–136, 2015.

WEYHRICH, R. A.; LAMKEY, K. R.; HALLAUER, A. R. Responses to Seven Methods of Recurrent Selection in the BS11 Maize Population. **Crop Science**, v. 38, n. 2, p. 308–321, mar. 1998.

WITHERS, P. J. A. et al. Agriculture and Eutrophication: Where Do We Go from Here? **Sustainability**, v. 6, n. 9, p. 5853–5875, set. 2014.

WORKU, M. et al. Nitrogen Uptake and Utilization in Contrasting Nitrogen Efficient Tropical Maize Hybrids. **Crop Science**, v. 47, n. 2, p. 519–528, 2007.

WRIGHT, A. J. The expected efficiencies of half-sib, testcross and S1 progeny testing methods in single population improvement. **Heredity**, v. 45, n. 3, p. 361–376, 1980.

## APÊNDICE A – Material Suplementar

**Tabela S1.** Resumo da análise de variância para caracteres de arquitetura de plantas mensurados em seis populações de milho avaliadas em condições de baixo e alto N. Coimbra, MG. Brazil.

FV	GL	Quadrado Médio						
		AP <sup>1</sup>	AE	AF	CEAB	CEAC	DC	AcQ
Bloco	2	589,32	550,80	16986,95	9,01	12,75	29,32	0,001
Níveis de N	1	50112,49*	17500,5*	1700112,97**	221,39*	271,29*	1259,23**	0,02
Resíduo (a)	2	948,75	916,23	1481,27	6,65	10,97	9,18	0,003
CV%(a)		12,25%	21,72%	5,20%	16,34%	19,75%	12,87%	7,70%
Populações (P)	5	1504,02**	1295,97**	9284,05	8,67*	2,89	27,56**	0,02**
P x N	5	416,59	212,5	13456,2	1,95	2,14	11,67	0,01*
Resíduo (b)	20	173,11	139,79	6772,06	2,51	1,41	5,06	0,003
CV%(b)		5,23%	8,48%	11,13%	10,03%	7,09%	9,56%	6,90%
Densidade (D)	5	569,76**	797,63**	180881,61**	7,08*	1,15	309,86**	0,07***
D x N	5	405,89**	434,02**	7839,61*	2,91	0,65	2,83	0,002
D x P	25	86,03	67,19	3766,85	2,63	5,38*	2,89	0,005*
D x N x P	25	124,75	76,06	4259,96	2,22	3,38	1,85	0,01***
Resíduo (c)	120	94,32	57,33	3273,62	2,82	3,36	2,53	0,002
CV%(c)		3,86%	5,43%	7,74%	10,64%	10,94%	6,76%	6,50%

<sup>1</sup>AP, altura de planta; AE, altura de espiga; AF, área foliar da folha da espiga; CEAB, comprimento de entrenó abaixo da espiga; CEAC, comprimento de entrenó acima da espiga; DC, diâmetro de colmo e AcQ, plantas acamadas. <sup>2</sup> dados transformados pela equação  $\sqrt{X + 0,5}$

“\*” e “\*\*\*” simbolizando P < 0,05 e 0,01, respectivamente, pelo teste F.

**Tabela S2.** Resumo da análise de variância para caracteres de arquitetura de plantas mensurados em seis populações de milho avaliadas em condições de baixo e alto N. Coimbra, MG. Brazil.

FV	GL	Quadrado Médio						
		PROL	NFE	NGE	CE	CG	P1000	PG
Bloco	2	0,01	0,14	4029,11	6,41	4,71	763,42	5120594,17
Níveis de N	1	0,78*	1,58*	322489,44**	424,03*	0,71	146146,55**	397836145,31**
Resíduo (a)	2	0,03	0,02	2793,23	21,05	3,34	1360,45	1026125,59
CV%(a)		18,90%	1,08%	11,43%	31,39%	17,94%	12,15%	18,78%
Populações (P)	5	0,02	3,19**	17502,64**	15,1	10,99**	1007,71	7483003,31**
P x N	5	0	1,55	11376,69**	21,07	1,22	2155,54*	3634152,62*
Resíduo (b)	20	0,01	0,68	2753,25	12,33	0,57	586,66	1306626,07
CV%(b)		10,25%	5,69%	11,35%	24,03%	7,43%	7,98%	21,19%
Densidade (D)	5	0,99**	6,01**	144107,8**	95,46**	4,17**	13739,49**	3285357,92**
D x N	5	0,04**	0,47	14251,24**	11,39	0,77	1868,24**	7324567,15**
D x P	25	0,01	0,55	1192,58	10,81	0,47	480,66	376246,33
D x N x P	25	0,01	0,75	1934,23	12,04	0,45	428,53	419180,35
Resíduo (c)	120	0,01	0,63	1756,67	13,74	0,44	378,76	510583,29
CV%(c)		9,42%	5,52%	9,07%	25,36%	6,50%	6,41%	13,25%

<sup>/1</sup> P1000, massa de 1000 grãos; NFE, número de fileiras da espiga; NGE número de grãos na espiga; CE, comprimento de espiga; CG, comprimento de grão; PROL, prolificidade e PG, produtividade de grãos ; “\*\*” e “\*\*\*” simbolizando P < 0,05 e 0,01, respectivamente, pelo teste F.

Croqui											
101-1 UFVM200 75	101-2 UFVM200 30	101-3 UFVM200 90		206-6 UFVM100 75	206-5 UFVM100 105	206-4 UFVM100 30		301-1 UFVM200 90	301-2 UFVM200 75	301-3 UFVM200 60	
101-6 UFVM200 60	101-5 UFVM200 105	101-4 UFVM200 45		206-1 UFVM100 60	206-2 UFVM100 45	206-3 UFVM100 90		301-6 UFVM200 105	301-5 UFVM200 45	301-4 UFVM200 30	
102-1 UFVM200(HS)C1 90	102-2 UFVM200(HS)C1 45	102-3 UFVM200(HS)C1 60		205-6 UFVM200 60	205-5 UFVM200 30	205-4 UFVM200 90		302-1 UFVM200(HS)C1 105	302-2 UFVM200(HS)C1 30	302-3 UFVM200(HS)C1 60	
102-6 UFVM200(HS)C1 75	102-5 UFVM200(HS)C1 30	102-4 UFVM200(HS)C1 105		205-1 UFVM200 75	205-2 UFVM200 105	205-3 UFVM200 45		302-6 UFVM200(HS)C1 90	302-5 UFVM200(HS)C1 45	302-4 UFVM200(HS)C1 75	
103-1 UFVM100(HS)C1 75	103-2 UFVM100(HS)C1 60	103-3 UFVM100(HS)C1 45		204-6 UFVM100(HS)C1 90	204-5 UFVM100(HS)C1 105	204-4 UFVM100(HS)C1 30		303-1 UFVM100(HS)C1 105	303-2 UFVM100(HS)C1 75	303-3 UFVM100(HS)C1 30	
103-6 UFVM100(HS)C1 105	103-5 UFVM100(HS)C1 30	103-4 UFVM100(HS)C1 90		204-1 UFVM100(HS)C1 45	204-2 UFVM100(HS)C1 75	204-3 UFVM100(HS)C1 60		303-6 UFVM100(HS)C1 90	303-5 UFVM100(HS)C1 45	303-4 UFVM100(HS)C1 60	
104-1 UFVM200(HS)C2 30	104-2 UFVM200(HS)C2 45	104-3 UFVM200(HS)C2 105		203-6 UFVM200(HS)C1 90	203-5 UFVM200(HS)C1 30	203-4 UFVM200(HS)C1 75		304-1 UFVM100 90	304-2 UFVM100 75	304-3 UFVM100 30	
104-6 UFVM200(HS)C2 75	104-5 UFVM200(HS)C2 60	104-4 UFVM200(HS)C2 90		203-1 UFVM200(HS)C1 45	203-2 UFVM200(HS)C1 105	203-3 UFVM200(HS)C1 60		304-6 UFVM100 60	304-5 UFVM100 45	304-4 UFVM100 105	
105-1 UFVM100(HS)C2 105	105-2 UFVM100(HS)C2 60	105-3 UFVM100(HS)C2 75		202-6 UFVM200(HS)C2 45	202-5 UFVM200(HS)C2 60	202-4 UFVM200(HS)C2 105		305-1 UFVM200(HS)C2 60	305-2 UFVM200(HS)C2 105	305-3 UFVM200(HS)C2 45	
105-6 UFVM100(HS)C2 30	105-5 UFVM100(HS)C2 45	105-4 UFVM100(HS)C2 90		202-1 UFVM200(HS)C2 90	202-2 UFVM200(HS)C2 75	202-3 UFVM200(HS)C2 30		305-6 UFVM200(HS)C2 75	305-5 UFVM200(HS)C2 30	305-4 UFVM200(HS)C2 90	
106-1 UFVM100 30	106-2 UFVM100 45	106-3 UFVM100 60		201-6 UFVM100(HS)C2 90	201-5 UFVM100(HS)C2 45	201-4 UFVM100(HS)C2 105		306-1 UFVM100(HS)C2 75	306-2 UFVM100(HS)C2 105	306-3 UFVM100(HS)C2 45	
106-6 UFVM100 105	106-5 UFVM100 75	106-4 UFVM100 90		201-1 UFVM100(HS)C2 75	201-2 UFVM100(HS)C2 30	201-3 UFVM100(HS)C2 60		306-6 UFVM100(HS)C2 90	306-5 UFVM100(HS)C2 60	306-4 UFVM100(HS)C2 30	

Figura S1. Exemplo de croqui dos experimentos realizados em baixo N e alto N, Coimbra – MG.