



ALEXSANDRO LARA TEIXEIRA

**QUANTIFICAÇÃO DA CAFEÍNA
E SELEÇÃO PRECOCE PARA PRODUÇÃO
EM *Coffea arabica* L.**

LAVRAS – MG

2011

ALEXSANDRO LARA TEIXEIRA

**QUANTIFICAÇÃO DA CAFEÍNA E SELEÇÃO PRECOCE
PARA PRODUÇÃO EM *Coffea arabica* L.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientadora

Dra. Flávia Maria Avelar Gonçalves

LAVRAS - MG

2011

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca da UFLA**

Teixeira, Alexsandro Lara.

Quantificação da cafeína e seleção precoce para produção em
Coffea arabica L. / Alexsandro Lara Teixeira. – Lavras : UFLA,
2011.

86 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2011.

Orientador: Flávia Maria Avelar Gonçalves.

Bibliografia.

1. Café arábica. 2. Melhoramento genético. 3. Correlação. 4.
Análise de trilha. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 633.733

ALEXSANDRO LARA TEIXEIRA

**QUANTIFICAÇÃO DA CAFEÍNA E SELEÇÃO PRECOCE
PARA PRODUÇÃO EM *Coffea arabica* L.**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, área de concentração em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 19 de janeiro de 2011.

Dr. Antônio Carlos de Oliveira	EMBRAPA
Dr. Antônio Nazareno Guimarães Mendes	UFLA
Dra. Juliana Costa de Rezende	EPAMIG
Dra. Lilian Padilha	EMBRAPA

Dra. Flávia Maria Avelar Gonçalves
Orientadora

LAVRAS - MG

2011

OFEREÇO

*A minha adorável esposa, Camila Andrade Silva,
companheira e alicerce da minha vida.*

*Aos meus pais,
Ramon Maciel Teixeira e Mercedes Lara Teixeira,
meus maiores incentivadores.*

A felicidade está no caminho da Conquista!

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, meu companheiro de todas as horas, por sempre atender aos meus pedidos e me amparar nos momentos de dificuldade.

Aos meus pais, Ramon e Mercedes, que estiveram sempre ao meu lado, ofertando apoio, confiança e incentivo ao longo de toda a vida.

À minha esposa, Camila, pela paciência e companheirismo, na alegria e na tristeza, na saúde e na doença, na riqueza e na pobreza, e pelas sinceras demonstrações de carinho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Biologia (DBI), pela oportunidade concedida para a realização do doutorado.

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

À Fapemig e à Secretaria da Ciência e Tecnologia do Estado de Minas Gerais, pela viabilização financeira do projeto.

À minha orientadora, professora Dra. Flávia Avelar, pela amizade e ajuda no desenvolvimento das atividades, participando de forma fundamental na conclusão deste trabalho e, principalmente, como mentora e participante ativa nesses últimos momentos “decisivos”, que foram fundamentais para a realização de um dos meus maiores sonhos: a Embrapa!

Ao professor Samuel Pereira de Carvalho, por contribuir de forma generosa através de seus conhecimentos, com participação ativa na elaboração dos artigos e finalização do trabalho de tese.

Aos pesquisadores Marcelo Ribeiro Malta, Juliana Costa de Rezende e Antônio Alves Pereira, pela disponibilidade e ajuda na realização dos experimentos.

Ao grande amigo Samuel Rosa, pela grandiosa ajuda no desenvolvimento dos trabalhos em laboratório.

Aos pesquisadores Antônio Carlos, Antônio Nazareno, Juliana Rezende e Lilian Padilha, pela participação na banca e disponibilidade para contribuir com este trabalho. Aos professores João Cândido, Magno, João Bosco, Flávia, César, Elaine, José Airton e aos pesquisadores Antônio Carlos e Ângela, pelos ensinamentos transmitidos.

Aos amigos Paulo, Bráulio, Kaio, Luiz, Davi, Cristiane, Alan, Andrezão, Vinícius e Gustavo, pela ajuda nos experimentos e prazerosos momentos de trabalho no laboratório e no campo.

Aos funcionários do Setor de Café/UFLA e da Epamig, José Maurício, Sérgio, Alexandre e Neto, pela disponibilidade e auxílio na condução dos experimentos.

Às secretárias Heloíza, Zélia e Rafaela, pela disponibilidade e eficiência em resolver os problemas burocráticos relacionados à pesquisa.

A todos os colegas da pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, em especial aos amigos do GEN/2009, pelo sucesso na coordenação da gestão.

Aos funcionários do Departamento de Biologia, Raimundo, Lindolfo, Léo, Irondina e Dú, pela ajuda e amizade.

Aos amigos da república “US ARAME FARPADO”, em Viçosa, que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação profissional.

Enfim, a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho foi realizado com os objetivos de identificar acessos de *Coffea arabica* L. com baixos teores de cafeína, verificar a existência de correlação entre o teor de cafeína dos grãos e de folhas ainda no estágio de mudas e viabilizar a utilização da seleção precoce por meio das relações de causa e efeito entre caracteres morfológicos e a produção de grãos. Para isso, foram avaliados acessos de *Coffea arabica* L. (cultivares, híbridos e alguns genótipos selvagens) oriundos do banco de germoplasma de café, instalado na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, em Patrocínio, MG. Avaliaram-se os teores de cafeína presente nos grãos e no terceiro e quarto par de folhas verdadeiras. Os caracteres morfológicos foram avaliados em 2006, 12 meses após a implantação da cultura, com as plantas ainda na fase juvenil. Os dados de produção de grãos são referentes às safras 2008/2009 e 2009/2010. Seis acessos apresentaram teores de cafeína nos grãos menores que 0,88%. Detectou-se também correlação significativa entre os teores de cafeína do terceiro (0,69) e quarto (0,92) par de folhas e dos grãos. Altas correlações também foram observadas entre a produção de grãos e comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (0,99), vigor vegetativo (0,98), largura do quarto par de folhas (0,78) e número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (0,75). Identificaram-se acessos com teores reduzidos de cafeína e boa produtividade de grãos. É possível realizar a seleção precoce para teor de cafeína, em cafeeiros ainda no estágio de mudas, pela avaliação do quarto par de folhas. Por meio da análise de trilha, percebe-se que, o comprimento do primeiro ramo plagiotrópico aos 12 meses de idade é o principal responsável pela variação na produção de grãos, visto que apresenta o maior efeito direto no sentido favorável sobre a produção de grãos. A variável secundária vigor vegetativo é a que apresenta maior importância na explicação das variações encontradas na produção de grãos.

Palavras-chave: Café arábica. Melhoramento genético. Correlação. Análise de trilha.

ABSTRACT

This study was conducted to identify *Coffea arabica* L. accessions with low caffeine content, check the correlation between grain and leaves at the seedling stage, and enable the use of early selection by the relationship cause and effect between morphological traits and the grain yield. For this, *Coffea arabica* L. accessions (cultivars, hybrids and several wild genotypes) were evaluated from the coffee germplasm bank, installed at the experimental farm of the Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Patrocínio, MG. The caffeine content in the grains and the third and fourth pair of true leaves were evaluated. Morphological traits were evaluated in 2006, 12 months after implanting the crop, when the plants were still at the juvenile phase. Data for grain yield are from the 2008/2009 and 2009/2010 crop seasons. Six accessions had caffeine content in grains less than 0.88%. A significant correlation was also detected between the caffeine content in the third (0.69) and fourth (0.92) pair of leaves and grains. High correlations were observed between grain yield and the length of the first plagiotrophical spread (0.99), vegetative vigor (0.98), width of the fourth pair of leaves (0.78) and number of nodes in the first plagiotrophical spread (0.75). Genotypes were identified with low caffeine content and high yield. Early selection can be made for caffeine content in coffee plants, still at the seedling stage, by evaluating the fourth pair of leaves. Path analysis showed that the length of the first plagiotrophical spread, at 12 months of age, is mainly responsible for the variation in yield because it showed the greatest direct effect in a favorable direction on grain yield. The vegetative vigor is the secondary variable most important in explaining the variations found in grain yield.

Keywords: Arabica coffee. Genetic breeding. Correlation. Path analysis.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	10
1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Melhoramento genético do cafeeiro	12
2.2	Seleção de cafés com baixo teor de cafeína.....	15
2.2.1	Processo de extração e análise da cafeína.....	19
2.2.2	Cultivares de café com baixo teor de cafeína	22
2.3	Seleção precoce e análise de trilha	25
3	CONCLUSÕES.....	33
	REFERÊNCIAS	34
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS.....	43
	ARTIGO 1 Avaliação do teor de cafeína em folhas e	
	grãos de acessos de café arábica.....	43
	ARTIGO 2 Seleção precoce para produção de grãos	
	em café arábica	63

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O consumo de café no mundo está em crescente expansão e, cada vez mais, o mercado consumidor exige um café com alta qualidade de bebida. Em 2010, o Brasil alcançou 47 milhões de sacas beneficiadas, com consumo *per capita* chegando a 4,65 kg/ano de café torrado, o que corresponde a uma média de, aproximadamente, 78 litros de café para cada brasileiro (ABIC, 2010). Uma pesquisa realizada pela Agência de Pesquisa TNS-Interscience (2008) revelou que nove em cada dez brasileiros acima de quinze anos consomem café diariamente, o que o torna a segunda bebida comercializada com maior aceitação pela população, atrás apenas da água e à frente do refrigerante e do leite. Uma das razões para o elevado consumo de café é a presença da cafeína em seus grãos. (RAJU; GOPAL, 1979; MAZZAFERA; SILVAROLLA, 2010).

Por outro lado, algumas pesquisas revelam que a ingestão de cafeína em excesso (acima de 300 mg por dia) pode causar vários distúrbios no organismo, como dores de cabeça, irritabilidade, insônia, doenças coronarianas, podendo até evoluir para alguns tipos de câncer (GALLUS et al., 2009; MONTELLA et al., 2009; SIN; HO; CHUNG, 2009; TANG et al., 2009). Devido a esses estudos, a procura pelo café descafeinado tem aumentado consideravelmente, sendo até mesmo recomendado por médicos em determinadas situações.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Café, ABIC, o consumo de café industrialmente descafeinado no Brasil é de aproximadamente 1,2%. Contudo, estima-se que, de todo o café mundialmente comercializado, 10% destinam-se à descafeinação (ABIC, 2010). Esse fato tem especial significado, considerando-se que o Brasil é o maior produtor mundial de café. Somente nos Estados Unidos, em 1999, a demanda por bebidas sem cafeína,

como café e chá verde, chegou a atingir 23% do setor de bebidas desse gênero. (HEILMANN, 2001; SAGIMOTO, 2004).

Atualmente, todo o café descafeinado encontrado no mercado é obtido com o uso de solventes químicos, sendo a extração da cafeína realizada nos grãos crus inteiros, antes do processo de torrefação. Esse procedimento deprecia muito a qualidade de bebida do café (ABRAHÃO et al., 2008). Desse modo, a identificação de plantas com boa produção de grãos e baixos teores de cafeína aceleraria muito os programas de melhoramento do cafeeiro, pois permitiria obter cafés descafeinados com boa qualidade de bebida.

Várias estratégias têm sido empregadas no melhoramento de plantas para produtividade de grãos. Uma delas é o conhecimento das relações de causa e efeito entre caracteres, principalmente quando se trata de caracteres de baixa herdabilidade. Uma das metodologias que têm sido empregadas é a análise de trilha, com o objetivo de entender melhor as relações de causa e efeito entre caracteres morfológicos e a produtividade de grãos (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2004). Resultados provenientes da análise de trilha podem auxiliar o melhorista na escolha dos caracteres a serem utilizados na seleção para produtividade de grãos, almejando maiores ganhos com a seleção.

Neste contexto, é de suma importância desenvolver cultivares de café com baixos teores de cafeína, alta produtividade e qualidade de grãos, no intuito de atender à expansão desse nicho de mercado, visando oferecer uma bebida de alta qualidade, sem a adição de reagentes químicos para extração da cafeína.

O presente trabalho foi realizado com os objetivos de identificar, dentro do banco de germoplasma de café da Epamig, acessos de *Coffea arabica* com baixos teores de cafeína, verificar a existência de correlação entre o teor de cafeína dos grãos e de folhas ainda no estágio de mudas e viabilizar a utilização da seleção precoce por meio das relações de causa e efeito entre caracteres morfológicos e a produção de grãos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Melhoramento genético do cafeeiro

O café provém de uma planta do gênero *Coffea* e, dentre as várias espécies conhecidas, as mais cultivadas são *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, sendo popularmente conhecidas como arábica e robusta.

O cafeeiro é originário da Etiópia, centro da África, onde ainda hoje faz parte da vegetação natural. A Arábia foi o país responsável pela propagação da cultura do cafeeiro. O nome “café” não é originário da Kaffa, local de origem da planta, e sim da palavra árabe *qahwa*, que significa vinho. Por esse motivo, o café era conhecido como *vinho da Arábia* quando chegou à Europa, no século XIV (NEVES, 1974; CIC, 2009).

O hábito de tomar café também foi desenvolvido pelos árabes. No início, o café era conhecido apenas por suas propriedades estimulantes e a fruta era consumida fresca, sendo utilizada para alimentar e estimular os rebanhos durante as viagens. Em 1000 d.C., os árabes começaram a preparar uma infusão com as frutas, fervendo-as em água. Somente no século XIV o processo de torrefação foi desenvolvido e, finalmente, a bebida adquiriu um aspecto mais parecido com a dos dias de hoje (NEVES, 1974).

O café chegou ao norte do Brasil, mais precisamente em Belém, em 1727, trazido da Guiana Francesa para o Brasil a pedido do governador do estado do Grão-Pará e Maranhão. Já naquela época, o café possuía grande valor comercial. Devido às condições climáticas favoráveis em alguns estados, o cultivo de café se espalhou rapidamente para São Paulo, Paraná e Minas Gerais, com produção voltada para o mercado doméstico. Num espaço de tempo relativamente curto, o café passou de uma posição secundária para a de produto-base da economia brasileira, cujo desenvolvimento ocorreu com total

independência, ou seja, apenas com recursos nacionais, sendo, afinal, a primeira realização exclusivamente brasileira que visou à produção de riquezas (NEVES, 1974; CIC, 2009).

O Brasil é o maior produtor mundial de café, sendo que a espécie *Coffea arabica* representa 75% da produção cafeeira brasileira, enquanto que o *Coffea canephora*, 25% (ABIC, 2010). O estado de Minas Gerais é o líder, com 50,9% da produção total de café cru, seguido por Espírito Santo (23,4%), São Paulo (9,3%), Bahia (4,9%), Rondônia (4,7%) e Paraná (4,5%). Os outros estados juntos produzem apenas cerca de 2,5%. Atualmente, são produzidas, mundialmente, 138 milhões de sacas de café por ano, sendo 47 milhões de origem brasileira, o que representa a soma do total produzido pelos outros três grandes produtores mundiais, Vietnã, Colômbia e Indonésia, com 20 milhões, 15 milhões e 12 milhões, respectivamente (FAOSTAT, 2009; ABIC, 2010).

O café é a bebida mais comercializada mundialmente depois da água e a sua importância econômica tem incentivado vários estudos, principalmente no que se refere à composição do grão e da bebida (ESTEBAN-DÍEZ; GONZÁLEZ-SÁIZ; PIZARRO, 2004). O café comercializado é composto, basicamente, por grãos de café arábica ou robusta ou da mistura de ambos (*blends*). O café arábica é considerado o de melhor qualidade e, conseqüentemente, o de maior valor econômico, custando cerca de 20-25% mais caro quando comparado ao robusta (CIC, 2009).

A primeira fase do melhoramento do cafeeiro no Brasil vai desde a introdução da cultivar Arábica em 1727, até o início da década de 1930 (cerca de 200 anos). Neste período foi realizado um melhoramento meramente empírico, realizado pelo próprio cafeicultor que utilizava os mutantes e recombinantes, que surgiam em suas lavouras ou materiais exóticos de outras regiões do mundo. A segunda fase, a partir de 1933 até os dias atuais, é marcada pelo melhoramento científico. Para contornar problemas dessa pequena variabilidade

genética, foram introduzidas diversas cultivares plantadas em outros países, além da realização de hibridações, interespecíficas e intraespecíficas, em algumas instituições de pesquisa do Brasil e de outros países, visando à incorporação principalmente de alelos de resistência a patógenos e pragas, além de uma série de mutações (KRUG; MENDES; CARVALHO, 1938; CARVALHO, 1993; MENDES, 1999).

Em qualquer programa de melhoramento genético, a condição básica para se ter sucesso é a existência de variabilidade genética na população, associada à média alta, permitindo a seleção de genótipos superiores e possibilitando o incremento da frequência de alelos favoráveis. Uma das formas de se ampliar a variabilidade é por meio da hibridação. Esse é o procedimento mais amplamente utilizado em todos os programas de melhoramento e no qual melhoristas utilizam toda a sua habilidade e conhecimento científico. Na condução de um programa de melhoramento utilizando hibridação, algumas etapas são muito importantes para o sucesso. Entre elas, a escolha dos genitores a serem cruzados e o modo de obter e conduzir as populações segregantes. Além disso, métodos que permitam identificar genótipos realmente superiores são imprescindíveis (RAMALHO; ABREU; SANTOS, 2001).

Na cultura do cafeeiro, os melhoristas têm dado preferência ao método genealógico com algumas modificações, pois a manutenção das plantas e de suas progênes individualizadas facilita o controle do melhorista e as possibilidades de ganho com a seleção. O método é aplicado até a geração F_4 ou F_5 , com seleção entre e dentro de famílias, em que progênes selecionadas nessa fase passam a ser avaliadas em ensaios de competição, em condições usuais de cultivo, vários locais, em experimentos com repetições e delineamentos apropriados (MENDES, 1999).

Um método que tem merecido atenção nos programas de melhoramento do cafeeiro é a seleção recorrente (RAMALHO, 1999; FERRÃO, 2004; SILVA

et al., 2009). As justificativas para se realizar a seleção recorrente são apresentadas por Ramalho, Abreu e Santos (2001). Um dos argumentos é o fato da maioria dos caracteres de interesse ser controlado por vários genes, além da inexistência de uma linhagem que concentre todos os alelos favoráveis.

Além do melhoramento para a produtividade, tem-se procurado desenvolver cultivares resistentes a pragas e doenças e com teores reduzidos de cafeína nos grãos. A ferrugem do café está entre as principais doenças que prejudicam a produtividade das lavouras, e sabendo disso, os programas de melhoramento procuram selecionar plantas que, além de produtivas, apresentem um grau de tolerância moderado/alto a esse patógeno (BOTELHO et al., 2007). Outro foco é a busca por uma cultivar com teores reduzidos de cafeína nos grãos, que apresente alta produtividade e boa qualidade de bebida. A seleção recorrente pode ser empregada para este fim, em que é possível reduzir os teores de cafeína, melhorar gradativamente os níveis de resistência e, conjuntamente, obter ganhos consideráveis na produtividade (ALVES; RESENDE, 2008).

2.2 Seleção de cafés com baixo teor de cafeína

A cafeína é um composto químico - de fórmula $C_8H_{10}N_4O_2$ - classificado como alcaloide do grupo das xantinas e designado quimicamente como 1,3,7-trimetilxantina.

Ela é sintetizada a partir da via metabólica: *xantosina* → *7-metilxantosina* → *7-metilxantina* → *teobromina* → *cafeína*. Dentre o grupo das xantinas, que incluem a teofilina e a teobromina, a cafeína é a que mais atua sobre o sistema nervoso central. Apresenta-se sob a forma de um pó branco ou pequenas agulhas, que derretem a 238°C e sublimam a 178°C, em condições normais de temperatura e pressão. É extremamente solúvel em água quente, não tem cheiro e apresenta sabor amargo (ASHIHARA; CROZIER, 2001).

Sua descoberta ocorreu em meados de 1820, no chá verde (*Camellia sinensis*) e no café (*Coffea arabica*). Atualmente, ela pode ser encontrada em mais de 63 espécies de plantas, sempre associada a outros dois compostos do mesmo grupo: a teofilina e a teobromina (CAMARGO; TOLEDO, 1998).

Existem algumas hipóteses que tentam explicar o acúmulo de altos teores de cafeína em chá verde, café e algumas outras espécies de plantas. A “teoria da defesa química” propõe que a cafeína em folhas jovens, frutos e flores tem a função de proteger os tecidos, ainda frágeis, de insetos predadores. Já a “teoria alelopática” propõe que a cafeína presente no revestimento da semente é lançada no solo inibindo a germinação de outras sementes, inclusive de plantas invasoras (ASHIHARA; CROZIER, 2001).

Em plantas de café e chá verde, a cafeína é produzida principalmente em folhas jovens e frutos imaturos, seguindo um acúmulo gradual e contínuo durante a maturação. Contudo, essa cafeína é catabolizada lentamente pela remoção de três grupos metil, resultando na formação da xantina (ASHIHARA et al., 1996).

Além da cafeína, o grão de café (café verde) possui uma grande variedade de minerais, aminoácidos, açúcares e lipídeos, como triglicerídeos e ácidos graxos livres. Adicionalmente, o café também possui uma vitamina do complexo B, a niacina e, em maior quantidade que todos os demais componentes, os ácidos clorogênicos, na proporção de 7 a 10%, isto é, 3 a 5 vezes mais que a cafeína. Destes, apenas a cafeína é termoestável, ou seja, não é destruída durante o processo de torrefação (TRUGO; MACRAE, 1989).

Dentre as várias substâncias psicoativas, a cafeína se destaca como uma das mais consumidas no mundo, sendo encontrada em diversas variedades de bebidas, como chás (8 a 107 mg/xícara), cafés (29 a 176 mg/xícara), chocolates (5 a 10 mg/xícara), refrigerantes e energéticos (32 a 65 mg/360 ml), entre outros. Estudos do *Food and Drug Administration* (FDA) apontaram que cerca de mil

drogas prescritas e duas mil drogas não prescritas contêm cafeína. Entre drogas prescritas, esse alcaloide pode ser encontrado em dosagens variando de 30 a 200 mg de cafeína por cápsula, como em comprimidos para resfriados e alergias, analgésicos (15 a 64 mg/U), moderadores de apetite (50 a 200 mg/U) e estimulantes (100 a 200 mg/U). Ele também pode ser encontrado em drogas não prescritas, com doses de 15 a 200mg por cápsula, dependendo do tipo de produto e marca envolvida (GOYAN, 1980; SOUZA; SICHIERI, 2005).

O consumo mundial *per capita* de cafeína, considerando todas as fontes, é de cerca de 3 a 7 mg/kg/dia, ou seja, aproximadamente 200 mg ou duas xícaras de café por dia. Contudo, estudos mostram que esse consumo está aumentando, devido ao aumento das atividades mentais e físicas durante o dia que se prolongam durante algumas horas da noite (BARONE; ROBERTS, 1996; SIN; HO; CHUNG, 2009).

Vários são os estudos com o objetivo de comprovar os efeitos benéficos da cafeína à saúde humana. Dentre estes, alguns autores relatam diminuição da fadiga, aumento do estado de alerta, redução na incidência de cirroses e até diminuição do risco de suicídios (KLATSKY; ARMSTRONG, 1992; NEHLIG, 1999). Alguns autores mostram que, quando consumido com moderação, ou seja, de uma a três xícaras de café por dia, não há riscos para a saúde. Esse consumo moderado pode estar relacionado com uma melhora da pressão arterial, evitar enfarte do miocárdio, diabetes e até auxiliar no controle dos níveis de colesterol (ALPERT, 2009; GALLUS et al., 2009). A cafeína age como um estimulante do sistema nervoso central, aumentando a taxa metabólica, relaxando a musculatura lisa dos brônquios, do trato biliar e gastrointestinal, e de parte do sistema vascular (NEHLIG, 1999; SIN; HO; CHUNG, 2009).

Por outro lado, em vários estudos recentes tem sido mostrado que a ingestão de cafeína em excesso (acima de 300 mg por dia) causa vários distúrbios no organismo, que vão desde sintomas desagradáveis, como

irritabilidade, dores de cabeça, insônia e alteração de humor (BRENELLI, 2003; SIN; HO; CHUNG, 2009), até problemas mais graves, como doenças coronarianas e/ou câncer de pulmão (LOPEZ-GARCIA et al., 2009; TANG et al., 2009). Gallus et al. (2009) não encontraram associação entre consumo de cafeína e aumento nos riscos de incidência de câncer do intestino. Já Tang et al. (2009) observaram que indivíduos não fumantes que consomem acima de duas xícaras de café por dia aumentam em 14% o risco de desenvolverem câncer de pulmão.

Em 1998, foram publicados dois trabalhos sobre o consumo de cafeína e seus efeitos na gravidez. O primeiro sugeriu um provável efeito da cafeína no peso ao nascer, mas não na prematuridade (SANTOS et al., 1998). Já o outro indicou uma modesta, mas significativa relação entre o consumo médio e alto de cafeína na gravidez e o risco de aborto espontâneo e baixo peso ao nascer (BPN) (FERNANDES et al., 1998). Em estudos recentes de Bracken et al. (2003) confirmou-se que existe associação entre BPN e altas doses de cafeína.

Hagen et al. (2009) verificaram que as dores de cabeça eram 18% mais frequentes nos grandes consumidores de cafeína (500 mg por dia ou mais) do que nas pessoas com um consumo reduzido deste estimulante (125 mg por dia).

Vários pesquisadores também procuram estudar o efeito da cafeína em plantas, principalmente nas sementes. Em estudos sobre a inibição do desenvolvimento de sementes de cafeeiro por ação da cafeína exógena, Rosa et al. (2006) avaliaram o efeito de diferentes concentrações de cafeína (0,00%, 0,05%, 0,10%, 0,15%, 0,20%, 0,25% e 0,30%) sobre a germinação e o crescimento *in vitro* de embriões de *Coffea arabica*, cultivar Rubi. Estes autores observaram que a germinação e o desenvolvimento dos embriões são afetados negativamente pela adição de cafeína exógena, sendo o seu efeito mais pronunciado nas radículas do que nos cotilédones. Assim, concluíram que a cafeína pode contribuir para a lenta germinação de sementes e o lento

desenvolvimento de plântulas de cafeeiro (ROSA et al., 2006; MOHANPURIA; YADAV, 2009).

Dos diversos componentes alelopáticos presentes em sementes de cafeeiro, a cafeína é encontrada em maior quantidade e sua influência está bem documentada na literatura, seja inibindo a germinação de sementes ou o crescimento de plântulas, ou mesmo, agindo como agente pesticida natural (PEREIRA et al., 2002).

Segundo Friedman e Waller (1983), durante a germinação, quase toda a cafeína inicialmente presente nas sementes quiescentes do cafeeiro é translocada para a plântula em desenvolvimento, aproximadamente 84% para os cotilédones, 14% para o hipocótilo e 2% para as radículas. Por outro lado, Baumann e Gabriel (1984), estudando o metabolismo e a excreção de cafeína durante o processo de germinação de sementes de *Coffea arabica*, concluíram que, após sete dias de embebição, menos de 1% da cafeína da semente é encontrada no substrato de germinação, o que indica a existência de uma forte barreira à difusão na superfície da semente de café. Contudo, mais tarde, após a germinação, uma considerável quantidade de cafeína (22%) é lixiviada para o solo.

2.2.1 Processo de extração e análise da cafeína

A extração da cafeína é realizada antes do processo de torrefação, nos grãos crus inteiros. A maioria dos processos de extração utiliza solventes, como diclorometano, clorofórmio, álcool, acetona, água e outros (RAMALAKSHMI; RAGHAVAN, 1999), sendo o diclorometano o mais utilizado no Brasil.

Na prática, estão disponíveis dois métodos básicos para a produção de café descafeinado nos quais se utilizam solventes. O primeiro se baseia na extração direta dos grãos pelo solvente e o segundo, a água seguida do uso de

um solvente para extração da cafeína. Uma das funções da água é separar a cafeína associada ao ácido clorogênico e permitir que o solvente tenha acesso à cafeína, além de facilitar sua saída pela parede celular do grão (TOCI; FARAH; TRUGO, 2006). O produto final é um grão com teor entre 0,02 e 0,07% de cafeína. A legislação brasileira define um teor máximo de 0,1% de cafeína para que o café seja considerado descafeinado (BRASIL, 1999).

Os custos com a descafeinação variam de acordo com o método de extração utilizado. Nas extrações utilizando solventes, a mais utilizada atualmente no Brasil, o custo médio é de U\$0,35/kg. Já nas extrações com água ou supercrítico, os custos chegam a U\$0,60/kg e U\$0,90/kg, respectivamente. A média ponderada, considerando a importância relativa dos três tipos de descafeinação em uso, é de U\$0,50/kg. Supõe-se que estes custos possam ser reduzidos com o desenvolvimento de uma cultivar de café naturalmente descafeinada (HEIN; GATZWEILER, 2006).

Durante o processo de extração da cafeína, a perda de outros componentes é inevitável, modificando a composição química dos grãos. O processo de descafeinação com solventes provoca uma modificação nas características físico-químicas dos grãos, ocasionando redução nos teores de sacarose, ácidos clorogênicos totais, trigonelinas e proteínas, substâncias essas responsáveis pelo *flavour* durante a torrefação (TRUGO; MACRAE, 1989; TOCI; FARAH; TRUGO, 2006; DESSALEGN et al., 2008). A descafeinação afeta principalmente a qualidade sensorial do café, tornando esta uma bebida descaracterizada e de qualidade inferior (ABRAHÃO et al., 2008).

A espectrofotometria é um dos métodos utilizados na quantificação da cafeína e se baseia na absorção de radiação eletromagnética na região do ultravioleta (UV). A cafeína apresenta um limite máximo de absorção no UV entre os comprimentos de onda de 271 e 275 nm (HOLIDAY, 1930). Ishler, Finucane e Borker (1948) desenvolveram um método espectrofotométrico de

baixo custo para análise de cafeína em produtos do café. O extrato aquoso da matriz foi tratado com óxido de magnésio e ferrocianeto de zinco para a remoção de trigonelina e outros compostos interferentes. A quantificação da cafeína foi conduzida com base na análise da absorvância no comprimento de onda de 272 nm. Esse método é mais rápido, simples e preciso que as técnicas gravimétricas e de análise do nitrogênio total, porém, os resultados ainda podem ser superestimados pela presença de interferentes (LI; BERGER; HARTLAND, 1990; MARIA; MOREIRA, 2007).

Outra metodologia é a cromatografia, que é um método físico-químico de separação. Ela está fundamentada na migração diferencial dos componentes de uma mistura, que ocorre devido a diferentes interações entre duas fases imiscíveis, a fase móvel e a fase estacionária. A grande variedade de combinações entre fases móveis e estacionárias a torna uma técnica extremamente versátil e de grande aplicação. A *high performance liquid chromatography* (HPLC), conhecida também por cromatografia líquida de alta eficiência, ou CLAE, foi desenvolvida a partir dessa mesma metodologia, com o desenvolvimento e a utilização de suportes com partículas diminutas responsáveis pela alta eficiência, as quais tornam necessário o uso de bombas de alta pressão para a eluição da fase móvel, devido à sua baixa permeabilidade. Misra et al. (2009) utilizaram essa técnica para a estimativa dos teores de cafeína em chá verde.

A técnica de espectroscopia na região do infravermelho próximo (*near infrared spectroscopy* ou NIR) tem sido muito utilizada, nos últimos anos, no Brasil. Algumas vantagens do método são: utilização de pequenas quantidades de amostra, possibilidade de analisar vários constituintes numa única amostra ao mesmo tempo, trata-se de um método não destrutivo (para análises por baguetas), além de ser rápido e de baixo custo (PASQUINI, 2003). A metodologia consiste na medição da intensidade da absorção/reflexão de luz

infravermelha próxima (em uma faixa de 800 a 2.500 nm), em relação ao comprimento de onda, realizada pela amostra (TAIZ; ZEIGER, 2004). Utilizando o NIR, Esteban-Díez, González-Sáiz e Pizarro (2004), descreveram o emprego da técnica como forma de diferenciação baseada na avaliação de cafeína, ácidos clorogênicos e acidez total. Eles classificaram a técnica como promissora para a quantificação de diferentes misturas de variedades, podendo ser empregada na identificação de possíveis misturas fraudulentas.

2.2.2 Cultivares de café com baixo teor de cafeína

Vários trabalhos foram realizados com o objetivo de se obter uma cultivar de café com teores reduzidos de cafeína. Entretanto, todos esses genótipos obtidos até agora possuem baixa produtividade e qualidade de bebida inferior àquela exigida pelo mercado (MAZZAFERA; CARVALHO, 1991; SILVAROLLA; MAZZAFERA; FAZUOLI, 2004; NAGAI et al., 2008).

As cultivares da espécie *Coffea arabica* tem, em média, teores de cafeína próximos de 1,2%. Já a espécie *Coffea canephora* apresenta teores elevados, com média de 2,5% (CARVALHO; TANGO; MONACO, 1965; AGUIAR et al., 2005). Algumas espécies do gênero, como *C. eugenioides*, possuem teores muito reduzidos de cafeína, ou mesmo, não produzem esse alcaloide, como é o caso de *Coffea bengalensis*. Dentro da espécie *Coffea arabica*, a cultivar Laurina é a que apresenta menores teores de cafeína. Por outro lado, a baixa produtividade e a má qualidade de bebida oriundas desses genótipos impedem que os mesmos sejam explorados comercialmente (CARVALHO; FAZUOLI; MAZZAFERA, 1988).

Com a finalidade de investigar a herança genética da produção de cafeína, Priolli et. al. (2008), realizaram cruzamentos entre *Coffea arabica* x

Coffea canephora e verificaram que é um caráter quantitativo controlado por muitos genes de efeitos aditivos.

Alguns autores têm recorrido a hibridações interespecíficas entre *Coffea eugenioides*, *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, a fim de desenvolver genótipos com baixos teores de cafeína. Foram realizados cruzamentos entre *C. eugenioides* ($2n=2x=22$) x *C. canephora* ($2n=2x=22$) e, após indução da duplicação cromossômica das $F_{1,s}$ com colchicina, realizou-se o cruzamento entre as $F_{1,s}$ ($2n=4x=44$) e *C. arabica* ($2n=4x=44$), produzindo uma população de híbridos interespecíficos chamados de GCA's, nome este que designa o cruzamento entre estas três espécies. Alguns desses genótipos apresentaram baixos teores de cafeína, entretanto, o porte das plantas, a produtividade e a qualidade da bebida ficaram abaixo das expectativas (MAZZAFERA; CARVALHO, 1991; NAGAI et al., 2008).

Outra tentativa foi a introdução de genótipos selvagens de *Coffea arabica*, coletados na Etiópia, com teores muito reduzidos de cafeína, próximos de 0,076%. Nesse contexto, pode-se destacar o trabalho desenvolvido pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), onde se avaliaram 3.000 plantas, provenientes de 300 acessos de *Coffea arabica* oriundos da Etiópia, em que foi possível identificar três plantas mutantes completamente livres de cafeína (SILVAROLLA; MAZZAFERA; FAZUOLI, 2004). Todavia, esses genótipos não apresentaram desempenho satisfatório nas nossas condições, mostrando ser necessário investir no melhoramento genético, ou mesmo, utilizá-los como genitores em programas de melhoramento, no intuito de obter cultivares com teores reduzidos de cafeína (SILVAROLLA; MAZZAFERA; DE LIMA, 2000).

Apesar da obtenção de plantas com baixo teor de cafeína ser viável, sabe-se que num programa de melhoramento clássico, desde o cruzamento até a obtenção da cultivar, são necessários de 15 a 20 anos para a estabilização das características desejadas e o lançamento da mesma. Nestas circunstâncias, a

utilização da engenharia genética para produzir plantas transgênicas livres de cafeína poderia, finalmente, ser uma proposta mais rápida e prática (HEIN; GATZWEILER, 2006).

Alguns trabalhos têm sido realizados com o objetivo de utilizar a engenharia genética na produção de plantas transgênicas naturalmente livres de cafeína. Alguns autores identificaram genes responsáveis pela codificação da cafeína, como o gene CS (*caffeine synthase*) e os genes N-1, N-3 e N-7 metiltransferases. Logo após, esses genes foram clonados, com o objetivo de realizar estudos básicos da expressão gênica e saber como esses genes poderiam auxiliar no desenvolvimento de uma planta transgênica livre de cafeína. A partir dos resultados, foi possível direcionar o foco das pesquisas e definir quais ferramentas poderão auxiliar no processo, tais como silenciamento gênico, mRNA antisenso ou interferência de RNA (OGITA et al., 2004; HEIN; GATZWEILER, 2006).

Uma forma alternativa para a produção de um café transgênico descafeinado seria a sobre-expressão de um gene que codifica para uma N-demetilase associado à degradação da cafeína. A expressão da atividade da *Pseudomonas putida N-1-demetilase* em qualquer *Coffea arabica* ou *Coffea sinensis* provavelmente não resultaria na deficiência de cafeína porque a cafeína seria degradada em teobromina, que é o precursor imediato da cafeína em ambas as espécies. No entanto, a expressão do gene N-7 que codifica a N-demetilase em *Coffea eugenoides* em plantas transgênicas de café é muito mais provável de conduzir a uma redução do teor de cafeína porque o produto desse gene em *C. eugenoides* catalisará o metabolismo da cafeína para teofilina, enquanto as enzimas nativas catabolizarão o CO₂ e o NH₃ (OGITA et al., 2004; HEIN; GATZWEILER, 2006).

2.3 Seleção precoce e análise de trilha

A eficiência de um programa de melhoramento genético pode ser expressa pelo ganho genético por unidade de tempo. A seleção precoce tem sido muito utilizada nesse contexto, com o objetivo de acelerar os processos de seleção e/ou descarte de materiais. Em se tratando de espécies perenes, o número de anos para se completar um ciclo seletivo é o principal entrave dos programas de melhoramento (REZENDE; BERTOLUCCI; RAMALHO, 1994). Assim, nos ciclos seletivos, o intervalo de tempo entre gerações deve ser reduzido ao máximo, de modo a maximizar os ganhos por unidade de tempo (BORRALHO; COTTERILL; KANOWSKI, 1992) e, neste caso, a seleção precoce assume papel relevante. Na seleção precoce, os caracteres são avaliados em idades prévias ao caráter de interesse e são utilizados como preditores do mesmo, de modo a antecipar as etapas de seleção. Dentre as aplicações da seleção precoce, uma delas é a estimativa da eficiência da seleção na idade juvenil e correspondência na idade adulta (PEREIRA et al., 1997; FARIAS NETO; CASTRO; BIANCHETTI, 2003).

Com o objetivo de acelerar o processo de seleção para baixos teores de cafeína, Chaves et al. (2004) estudaram a correlação entre o teor de cafeína no primeiro par de folhas de mudas e nas sementes maduras de café. Os resultados demonstraram que existe correlação alta e positiva (0,95), o que permite a seleção precoce de genótipos ainda na fase de produção de mudas, em viveiro, reduzindo custos, tempo e mão de obra. Freitas et al. (2007), sem a avaliação direta da produção de grãos e baseando-se apenas na capacidade fotossintética, constataram que a seleção do caráter comprimento dos ramos plagiotrópicos, aos 12 meses de idade, pode ser utilizada como critério na identificação de genótipos superiores.

O conhecimento da associação entre caracteres é de grande importância nos trabalhos de melhoramento, principalmente quando se trata de caracteres de baixa herdabilidade. No estudo da inter-relação entre dois caracteres, a análise do coeficiente de correlação tem sido de grande utilidade na quantificação da magnitude e direção das influências de fatores entre duas variáveis. Essa ferramenta proporciona aos melhoristas uma melhor orientação na escolha dos principais componentes a serem utilizados no momento da seleção (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2004). Apesar do auxílio no entendimento de um caráter complexo ela não determina a importância dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres que a compõem. Assim, não é possível constatar se sua estimativa foi estabelecida por verdadeiras relações de causa e efeito (WRIGHT, 1921; NILES, 1922; VENCOVSKY; BARRIGA, 1992).

Wright (1921), desenvolveu uma metodologia para o desdobramento do coeficiente de correlação, chamada de análise de trilha (*path analysis*), com o objetivo de fornecer uma medida da influência de cada causa e seu efeito. Essa técnica foi empregada pela primeira vez por Dewey e Lu (1959) na seleção para produtividade em trigo.

A análise de trilha consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos de caracteres sobre uma variável principal, cujas estimativas são obtidas por meio de equações de regressão, em que as variáveis são previamente padronizadas. Apesar de ser a correlação uma característica intrínseca a dois caracteres em dada condição experimental, sua decomposição é dependente do conjunto de caracteres estudados que, normalmente, são avaliados pelo conhecimento prévio do pesquisador de suas importâncias e de possíveis inter-relações expressas em diagramas de trilha (CRUZ; REGAZZI; CARNEIRO, 2004).

Outro fato a ser considerado é a utilização de correlações de natureza genotípica nas análises. Resultados incoerentes podem surgir. Os problemas inerentes à estimação de componentes de variância e covariância, bem como a

precisão dessas estimativas, podem conduzir a valores discrepantes dos limites teóricos esperados. Sabe-se que as correlações são medidas de associações lineares entre caracteres, estando entre os valores -1 e +1. Entretanto, coeficientes de correlação genética maiores que o valor absoluto 1 podem ocorrer em consequência de problemas ligados à distribuição das variáveis, ou mesmo, ao modelo utilizado na estimação das variâncias e das covariâncias, que determinam a correlação (CRUZ; CARNEIRO, 2004).

A metodologia de análise de trilha pode ser aplicada considerando um “único diagrama causal” ou com “diagrama causal em cadeia” (Figuras 1 e 2). Nos casos em que a análise de trilha considera um único modelo causal, ela é simplesmente uma análise de regressão parcial padronizada, sendo útil no desdobramento dos coeficientes de correlação em efeito direto e indireto. Já nas situações em que estão envolvidas inter-relações complexas e/ou vários diagramas causais, a análise de trilha se apresenta como uma expansão da regressão múltipla (CRUZ; CARNEIRO, 2004).

Diversos autores têm utilizado a análise de trilha no estudo das relações de causa e efeito entre caracteres quantitativos de inúmeras culturas. Kurek et al. (2001) e Furtado et al. (2002) analisaram os efeitos diretos e indiretos dos caracteres número de vagens por parcela, número de grãos por vagem e peso médio de grãos sobre a variável principal rendimento de grãos em feijoeiro. Eles concluíram que o número de vagens tem influência marcante no rendimento de grãos, podendo ser utilizado como caráter auxiliar na identificação de genótipos superiores nos programas de melhoramento do feijoeiro.

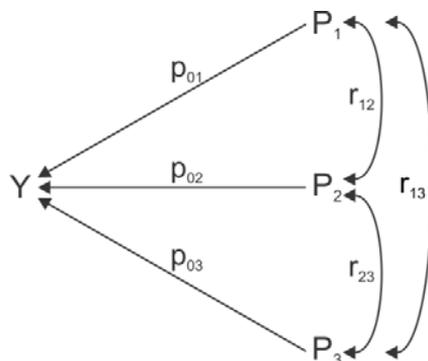


Figura 1 Diagrama causal ilustrativo dos efeitos diretos (p_{0i}) e indiretos ($p_{0i} \times r_{ij}$) das variáveis P_1 , P_2 e P_3 sobre a variável principal Y .

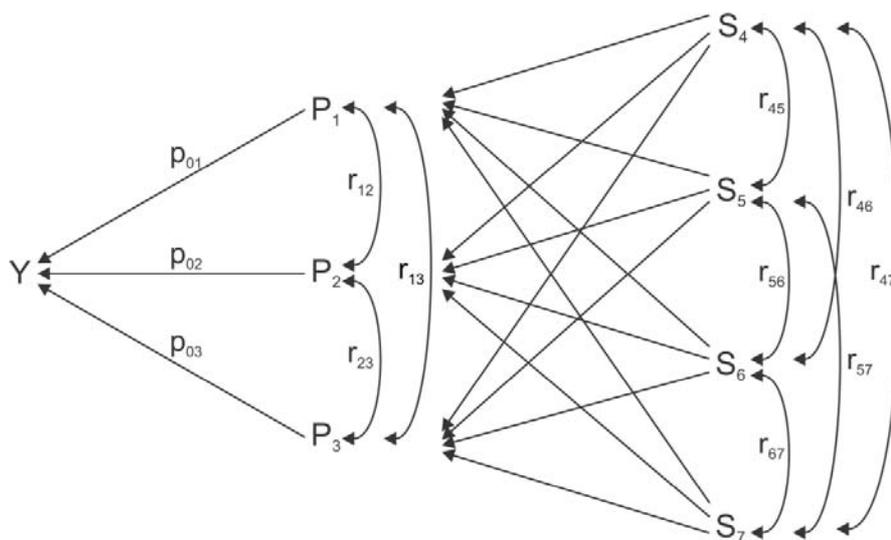


Figura 2 Diagrama causal em cadeia ilustrativo dos efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias S_4 , S_5 , S_6 e S_7 sobre as variáveis primárias P_1 , P_2 e P_3 e a variável principal Y .

Em estudos com capim-elefante, (DAHER et al., 2004) verificaram que caracteres morfológicos, como o número de perfilhos por metro linear e diâmetro de perfilhos a 10 cm do solo, foram capazes de explicar melhor o potencial de produção de matéria seca, atuando, respectivamente, de forma direta e inversamente proporcional sobre a variável principal, alternando-se em função das condições ambientais ocorridas durante o crescimento. Severino et al. (2002), analisando os efeitos diretos e indiretos de alguns caracteres morfológicos sobre a produtividade de grãos em café, constataram que o vigor vegetativo e a seca de ponteiros são bons critérios de avaliação do potencial produtivo. Eles perceberam também que a produção não foi influenciada pelo diâmetro da copa, altura da planta ou curvatura dos ramos plagiotrópicos. Já as análises de trilha em girassol (HABIB et al., 2007) demonstraram que as variáveis dias para florescimento seguidas do teor de óleo e altura da planta tiveram o maior efeito direto positivo sobre a produção de óleo, permitindo inferir que esses caracteres devem ser considerados na avaliação de genótipos superiores de girassol para produção de óleo.

Em trabalhos recentes com tomateiro, realizado por Rodrigues et al. (2010), que avaliaram os efeitos de componentes primários e secundários sobre a produção total de frutos, foi demonstrado que os componentes primários peso médio dos frutos e número total de frutos apresentaram valores de correlação genotípica com produção total de frutos de 0,38 e 0,42, respectivamente. Resultado este inesperado, uma vez que a produção é o produto entre o número de frutos e o peso médio dos frutos. No entanto, esse fato reforça que os coeficientes de correlação simples não representam a relação de causa e efeito dos caracteres e, assim, o emprego da análise de trilha foi de grande utilidade, já que estes caracteres apresentaram grandes efeitos diretos na determinação da produção total de frutos.

A existência de multicolinearidade entre os caracteres estudados é um dos sérios problemas que têm passado despercebido em diversos tipos de análises de dados, como análises de trilha, índices de seleção e correlações canônicas, entre outras. Quando as variáveis estão correlacionadas entre si, diz-se que há inter-relação ou multicolinearidade entre elas (CRUZ; CARNEIRO, 2004). Esse termo é utilizado apenas nos casos em que a correlação entre as variáveis é muito alta ou perfeita (NETER; WASSERMAN, 1974).

Os problemas causados pela multicolinearidade não são devido simplesmente à sua presença, mas sim ao grau que manifesta. Na sua existência, em níveis considerados moderados a severos, entre um conjunto de variáveis explicativas, torna-se difícil avaliar a influência destas sobre a resposta na variável principal, e ignorar seus efeitos pode provocar resultados danosos ou absurdos (CRUZ; CARNEIRO, 2004).

Carvalho et al. (1999), em estudos de análise de trilha em pimentão, observaram uma multicolinearidade moderada a forte entre caracteres relacionados ao fruto. Como consequência, eles obtiveram uma superestimativa da variância dos coeficientes de trilha. Em análises de trilha sob multicolinearidade em soja, Bizeti et al. (2004) compararam as estimativas dos efeitos diretos de vários caracteres sobre a produção, na presença e ausência de multicolinearidade. Os resultados mostraram que, na presença de multicolinearidade, houve uma superestimação das correlações, além da obtenção de um R^2 baixo e negativo. Já Coimbra et al. (2005), ressaltam que, na presença de multicolinearidade, as variâncias associadas aos estimadores dos coeficientes de trilha podem atingir valores demasiadamente elevados, tornando-os pouco confiáveis. Além disso, as estimativas dos coeficientes de trilha podem assumir valores absurdos ou sem nenhuma coerência com o fenômeno biológico estudado.

Dessa forma, diagnósticos de multicolinearidade devem ser realizados, de forma a viabilizar os resultados obtidos. Belsley, Kuh e Welsch (1980) e Carvalho e Cruz (1996) destacam alguns procedimentos para detectar a possibilidade de problemas advindos da multicolinearidade na estimação dos parâmetros:

- a) métodos informais: utilizados para identificar problemas proporcionados pela multicolinearidade, mas não fornecem informações sobre a sua intensidade e natureza. São baseados na magnitude de sinais de estimativas de parâmetros, geralmente coeficientes de regressão, muito discrepantes ou contrários às expectativas do pesquisador;
- b) análise dos elementos da matriz de correlação: consiste na análise dos elementos não diagonais da matriz de correlação. Na existência de variáveis com quase total dependência linear, admite-se que sua correlação será próximo de 1. Valores de correlações altos indicam a existência de efeitos danosos da multicolinearidade, porém, essa condição é suficiente, mas não necessária, o que significa que há possibilidade de ausência de correlação alta entre quaisquer pares de variáveis, mas com problemas sérios de multicolinearidade, principalmente quando está envolvido grande número de variáveis;
- c) verificação do determinante da matriz de correlação: uma matriz de correlação ($X'X$) tem determinante que pode variar de 0 a 1. Será 1,0 se as variáveis consideradas forem ortogonais e 0,0 se existir uma dependência linear entre estas variáveis. À medida que o determinante aproxima-se de zero, a multicolinearidade torna-se mais intensa e seus efeitos tornam-se mais danosos ao processo de estimação. Este é um método de grande utilidade, baseando-se em

simples informação disponível a partir do cruzamento de dados, entretanto, não identifica as variáveis causadoras da multicolinearidade;

- d) análise dos autovalores e autovetores: existindo uma ou mais dependências lineares, total ou aproximada, um ou mais autovalores serão nulos ou muito pequenos. Montgomery e Peck (1981) propõem a avaliação do número de condição (NC) da matriz de correlação. Dada a simetria dessa matriz, o número de condição consiste na razão entre o maior e o menor autovalor, ou seja: $NC = \lambda_{\max}/\lambda_{\min}$. O diagnóstico da multicolinearidade é dado pela seguinte classificação: $NC \leq 100$ = fraca; $100 < NC < 1000$ = moderada a forte; $NC \geq 1000$ = severa.

Detectada a existência de multicolinearidade forte ou severa, é necessário tomar algumas providências para contornar seus efeitos adversos. Um dos procedimentos, que é empregado na maioria dos casos, é a eliminação das variáveis-problema do modelo de regressão. Outra possibilidade é o emprego da análise de regressão em crista que permite a estimação de parâmetros, mesmo na presença de multicolinearidade, sem eliminar quaisquer variáveis (CARVALHO; CRUZ, 1996; CRUZ; CARNEIRO, 2004).

3 CONCLUSÕES

Entre os acessos avaliados, encontram-se genótipos com teores reduzidos de cafeína e boa produtividade de grãos.

Existe correlação alta e positiva entre o teor de cafeína dos grãos e do quarto par de folhas de mudas, o que evidencia a possibilidade de utilizar a seleção precoce para teor de cafeína, ainda no estágio de mudas.

O principal responsável pela variação na produção de grãos é o comprimento do primeiro ramo plagiotrópico, aos 12 meses de idade, visto que apresenta o maior efeito direto no sentido favorável sobre a produção de grãos.

A variável secundária vigor vegetativo é a que apresenta maior importância na explicação das variações encontradas na produção de grãos.

REFERÊNCIAS

- ABIC. **Estatísticas**: Produção Agrícola, 2010. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/estatisticas.html>>. Acesso em: 19 dez. 2010.
- ABRAHÃO, S. A. et al. Compostos bioativos em café integral e descafeinado e qualidade sensorial da bebida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 12, p. 1799-1804, dez. 2008.
- AGUIAR, A. T. D. E. et al. Diversidade química de cafeeiros na espécie *Coffea canephora*. **Bragantia**, Campinas, v. 64, n. 4, p. 577-582, out. 2005.
- ALPERT, J. S. "Hey, Doc, is it ok for me to drink coffee?". **American Journal of Medicine**, New York, v. 122, n. 7, p. 597-598, July 2009.
- ALVES, R. M.; RESENDE, M. D. V. Avaliação genética de indivíduos e progênies de cupuaçuzeiro no estado do Pará e estimativas de parâmetros genéticos. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 696-701, set. 2008.
- ASHIHARA, H.; CROZIER, A. Caffeine: a well known but little mentioned compound in plant science. **Trends in Plant Science**, Amsterdam, v. 6, n. 9, p. 407-413, Sept. 2001.
- ASHIHARA, H. et al. Catabolism of caffeine and related purine alkaloids in leaves of *Coffea arabica* L. **Planta**, Berkeley, v. 198, n. 3, p. 334-339, Sept. 1996.
- BARONE, J. J.; ROBERTS, H. R. Caffeine consumption. **Food and Chemical Toxicology**, Orlando, v. 34, n. 1, p. 119-129, Jan. 1996.
- BAUMANN, T. W.; GABRIEL, H. Metabolism and excretion of caffeine during germination of *Coffea arabica* L. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 25, n. 8, p. 1431-1436, Dec. 1984.
- BELSLEY, D. A.; KUH, E.; WELSCH, R. E. **Regression diagnostics**: Identifying influential data and sources of collinearity. New York: Wiley, 1980. 292 p.

BIZETI, H. S. et al. Path analysis under multicollinearity in soybean. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 47, n. 5, p. 669-676, Sept. 2004.

BORRALHO, N. M. G.; COTTERILL, P. P.; KANOWSKI, P. J. Genetic control of growth of *Eucalyptus globulus* in Portugal. 2. Efficiencies of early selection. **Silvae Genetica**, Frankfurt, v. 41, n. 2, p. 70-77, Mar. 1992.

BOTELHO, C. E. et al. Evaluation of coffee progenies from crosses between the Icatu and Catimor cultivars (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, Lavras, v. 2, n. 1, p. 10-19, Jan. 2007.

BRACKEN, M. B. et al. Association of maternal caffeine consumption with decrements in fetal growth. **American Journal of Epidemiology**, Baltimore, v. 157, n. 5, p. 456-466, Mar. 2003.

BRASIL. Portaria n. 377, de 26 de abril de 1999. Regulamento técnico para fixação de identificação e qualidade de café torrado em grão e café torrado e moído. **Diário Oficial da União**, Brasília, v. 137, n. 80, p. 22, 29 abr. 1999. Seção 1.

BRENELLI, E. C. S. A extração de cafeína em bebidas estimulantes: uma nova abordagem para um experimento clássico em química orgânica. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 136-138, jan./fev. 2003.

CAMARGO, M. C. R.; TOLEDO, M. C. F. Teor de cafeína em cafés brasileiros. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 18, n. 4, p. 421-424, out./dez. 1998.

CARVALHO, A. **Histórico do desenvolvimento do cultivo do café no Brasil**. Campinas: SAA/IAC, 1993. 8 p. (Documentos IAC, 34).

CARVALHO, A.; FAZUOLI, L. C.; MAZZAFERA, P. Produtividade de progênies derivadas de hibridação dos cultivares Laurina e Mundo Novo. **Bragantia**, Campinas, v. 47, n. 2, p. 213-222, jul. 1988.

CARVALHO, A.; TANGO, J. S.; MONACO, L. C. Genetic control of the caffeine content of coffee. **Nature**, London, v. 205, n. 4968, p. 314-314, Jan. 1965.

CARVALHO, C. G. P. D. et al. Análise de trilha sob multicolinearidade em pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 4, p. 603-613, abr. 1999.

CARVALHO, S. P.; CRUZ, C. D. Diagnosis of multicollinearity: Assessment of the condition of correlation matrices used in genetic studies. **Brazilian Journal of Genetics**, Ribeirão Preto, v. 19, n. 3, p. 479-484, Sept. 1996.

CHAVES, J. C. D. et al. Estimativa do teor de cafeína nas sementes de café baseada na sua concentração nas folhas de mudas e de plantas adultas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 3, p. 287-292, jul. 2004.

CIC. **História do Café**, 2009. Disponível em: <<http://www.cicbr.org.br/cafe-historia.php>>. Acesso em: 04 out. 2010.

COIMBRA, J. L. M. et al. Consequências da multicolinearidade sobre a análise de trilha em canola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 347-352, mar./abr. 2005.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. Multicolinearidade. In: CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. (Ed.). **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento**. Viçosa, MG: UFV, 2004. p. 293-347.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. Análise de Trilha. In: CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. (Ed.). **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento**. Viçosa, MG: UFV, 2004. p. 180-193.

DAHER, R. F. et al. Análise de trilha de caracteres forrageiros do capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1531-1535, set./out. 2004.

DESSALEGN, Y. et al. Genetic diversity and correlation of bean caffeine content with cup quality and green bean physical characteristics in coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Malden, v. 88, n. 10, p. 1726-1730, Aug. 2008.

DEWEY, D. R.; LU, K. H. A correlation and path-coefficient analysis of components of crested wheatgrass seed production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 51, n. 1, p. 515-518, Jan. 1959.

ESTEBAN-DÍEZ, I.; GONZÁLEZ-SÁIZ, J. M.; PIZARRO, C. An evaluation of orthogonal signal correction methods for the characterisation of arabica and robusta coffee varieties by NIRS. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 514, n. 1, p. 57-67, June 2004.

FAOSTAT. **Statistics**, 2009. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 19 dez. 2010.

FARIAS NETO, J. T.; CASTRO, A. W. V.; BIANCHETTI, A. Aplicação da seleção precoce em famílias de meios irmãos de taxi-branco. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 33, n. 1, p. 85-91, jan. 2003.

FERNANDES, O. et al. Moderate to heavy caffeine consumption during pregnancy and relationship to spontaneous abortion and abnormal fetal growth: a meta-analysis - effects of socioeconomic factors, psychological stress, smoking, alcohol, and caffeine. **Reproductive Toxicology**, Elmsford, v. 12, n. 1, p. 435-444, Jan./Fev. 1998.

FERRÃO, R. G. **Biometria aplicada ao melhoramento genético do café conilon**. 2004. 256 p. Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

FREITAS, Z. M. T. S. et al. Avaliação de caracteres quantitativos relacionados com o crescimento vegetativo entre cultivares de café arábica de porte baixo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, p. 267-275, abr. 2007.

FRIEDMAN, J.; WALLER, G. R. Caffeine hazards and their prevention in germinating seeds of coffee (*Coffea arabica* L.). **Journal of Chemical Ecology**, Dordrecht, v. 9, n. 8, p. 1099-1106, Aug. 1983.

FURTADO, M. R. et al. Análise de trilha do rendimento do feijoeiro e seus componentes primários em monocultivo e em consórcio com a cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 217-220, abr. 2002.

GALLUS, S. et al. Coffee, black tea and risk of gastric cancer. **Cancer Causes and Control**, London, v. 20, n. 8, p. 1-6, Oct. 2009.

GOYAN, J. Food and drug administration news release. **Food and Drug Administration**, Silver Spring, v. 1, n. 1, p. 36-80, Jan. 1980.

HABIB, H. et al. Genetic association and path analysis for oil yield in sunflower (*Helianthus annuus* L.). **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalbad, v. 9, n. 2, Mar. 2007.

HAGEN, K. et al. High dietary caffeine consumption is associated with a modest increase in headache prevalence: results from the Head-HUNT Study. **The Journal of Headache and Pain**, Roma, v. 10, n. 3, p. 153-159, June 2009.

HEILMANN, W. Tecnology II: Decaffeination of coffee. In: CLARK, R. J.; VITZTUM, O. G. (Ed.). **Coffee: Recent development**. Oxford: Blackwell Science, 2001. p. 108-124.

HEIN, L.; GATZWEILER, F. The economic value of coffee (*Coffea arabica*) genetic resources. **Ecological Economics**, London, v. 60, n. 1, p. 176-185, Nov. 2006.

HOLIDAY, E. R. The characteristic absorption of ultra-violet radiation by certain purines. **Biochemical Journal**, London, v. 24, n. 3, p. 619-625, May/June 1930.

ISHLER, N. H.; FINUCANE, T. P.; BORKER, E. Rapid spectrophotometric determination of caffeine. **Analytical Chemistry**, Moscow, v. 20, n. 12, p. 1162-1166, Dec. 1948.

KLATSKY, A. L.; ARMSTRONG, M. A. Alcohol, smoking, coffee, and cirrhosis. **American Journal of Epidemiology**, Baltimore, v. 136, n. 10, p. 1248-1257, Nov. 1992.

KRUG, C. A.; MENDES, J. E. T.; CARVALHO, A. **Taxonomia de Coffea arabica L.**: Descrição das variedades e formas encontradas no Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônomo, 1938. 57 p. (Boletim Técnico, 62).

KUREK, A. J. et al. Análise de trilha como critério de seleção indireta para rendimentos de grãos em feijão. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 7, n. 1, p. 29-32, jan./abr. 2001.

LI, S.; BERGER, J.; HARTLAND, S. UV spectrophotometric determination of theobromine and caffeine in cocoa beans. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 232, n. 1, p. 409-412, Jan. 1990.

LOPEZ-GARCIA, E. et al. Coffee consumption and risk of stroke in women. **Circulation**, Dallas, v. 119, n. 8, p. 1116-1123, Mar. 2009.

MARIA, C. A. B.; MOREIRA, R. F. A. Caf eina: revis o sobre métodos de análise. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 99-105, jan./fev. 2007.

MAZZAFERA, P.; CARVALHO, A. Breeding for low seed caffeine content of coffee (*Coffea* L.) by interspecific hybridization. **Euphytica**, Wageningen, v. 59, n. 1, p. 55-60, Nov. 1991.

MAZZAFERA, P.; SILVAROLLA, M. B. Caffeine content variation in single green arabica coffee seeds. **Seed Science Research**, Wageningen, v. 20, n. 3, p. 13-167, Sept. 2010.

MENDES, A. N. G. Métodos de melhoramento aplicados na cultura do cafeeiro. In: SIMP SIO DE ATUALIZA O EM GENÉTICA E MELHORAMENTO DE PLANTAS, 3., 1999, Lavras. **Anais...** UFLA: GEN, 1999. p. 18-35.

MISRA, H. et al. Study of extraction and HPTLC - UV method for estimation of caffeine in marketed tea (*Camellia sinensis*) granules. **International Journal of Green Pharmacy**, Mandsaur, v. 3, n. 1, p. 47-51, Jan./Mar. 2009.

MOHANPURIA, P.; YADAV, S. K. Retardation in seedling growth and induction of early senescence in plants upon caffeine exposure is related to its negative effect on Rubisco. **Photosynthetica**, Prague, v. 47, n. 2, p. 293-297, June 2009.

MONTELLA, M. et al. Coffee, decaffeinated coffee, tea intake, and risk of renal cell cancer. **Nutrition and Cancer**, Philadelphia, v. 61, n. 1, p. 76-80, Jan. 2009.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1981. 504 p.

NAGAI, C. et al. Production of a new low-caffeine hybrid coffee and the biochemical mechanism of low caffeine accumulation. **Euphytica**, Wageningen, v. 164, n. 1, p. 133-142, Nov. 2008.

NEHLIG, A. Are we dependent upon coffee and caffeine? A review on human and animal data. **Neuroscience & Biobehavioral Reviews**, St. Andrews, v. 23, n. 4, p. 563-576, Mar. 1999.

NETER, J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. Homewood: Richard D. Irwin, 1974. 842 p.

NEVES, C. **A história do café**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro do Café, 1974. 52 p.

NILES, H. E. Correlation, causation and Wright's theory of "path coefficients". **Genetics**, Pittsburgh, v. 7, n. 3, p. 258-273, May 1922.

OGITA, S. et al. Application of RNAi to confirm theobromine as the major intermediate for caffeine biosynthesis in coffee plants with potential for construction of decaffeinated varieties. **Plant Molecular Biology**, Zurich, v. 54, n. 6, p. 931-941, Apr. 2004.

PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 198-219, Mar./Apr. 2003.

PEREIRA, A. B. et al. Eficiência da seleção precoce em famílias de meios irmãos de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, avaliadas na região noroeste do Estado de Minas Gerais. **Revista Cerne**, Lavras, v. 3, n. 1, p. 67-81, jan. 1997.

PEREIRA, C. E. et al. Determinação de inibidores da germinação no espermoderma de sementes de café. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 24, n. 1, p. 306-311, jan. 2002.

PRIOLLI, R. H. G. et al. Caffeine inheritance in interspecific hybrids of *Coffea arabica* x *Coffea canephora* (Gentianales, Rubiaceae). **Genetics and Molecular Biology**, Ribeirão Preto, v. 31, n. 2, p. 498-504, Apr. 2008.

RAJU, K. I.; GOPAL, N. H. Distribution of caffeine in arabica and robusta coffee plants. **Journal of Coffee Research**, Karnataka, v. 9, n. 4, p. 83-90, Oct. 1979.

RAMALAKSHMI, K.; RAGHAVAN, B. Caffeine in Coffee: Its Removal. Why and How? **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Philadelphia, v. 39, n. 5, p. 441 - 456, July 1999.

RAMALHO, M. A. P. Genética: seleção recorrente no melhoramento do cafeeiro. **Informativo Garcafé**, 1999.

RAMALHO, M. A. P.; ABREU, A. D. F. B.; SANTOS, J. B. Melhoramento de espécies autógamas. In: NASS, I. I.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. (Ed.). **Recursos genéticos e melhoramento de plantas**. Rondonópolis: Fundação MT, 2001. p. 1181.

REZENDE, G. D. S. P.; BERTOLUCCI, F. L. G.; RAMALHO, M. A. P. Eficiência da seleção precoce na recomendação de clones de eucalipto avaliados no norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 1, n. 1, p. 45-50, jan. 1994.

RODRIGUES, G. B. et al. Análise de trilha de componentes de produção primários e secundários em tomateiro do grupo Salada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 2, p. 155-162, fev. 2010.

ROSA, S. D. V. F. D. et al. Inibição do desenvolvimento in vitro de embriões de Coffea por cafeína exógena. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 28, n. 3, p. 177-184, dez. 2006.

SAGIMOTO, L. **A descoberta do café sem cafeína**, 2004. Disponível em: <http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/junho2004/ju257pag12>. Acesso em: 15 jun. 2010.

SANTOS, I. S. et al. Caffeine intake and pregnancy outcomes: a meta-analytic review. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 3, p. 523-530, July/Sept. 1998.

SEVERINO, L. S. et al. Associações da produtividade com outras características agrônomicas de café (*Coffea arabica* L. “Catimor”). **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 24, n. 5, p. 1467-1471, dez. 2008.

SILVA, M. G. D. M. et al. Seleção recorrente intrapopulacional no maracujazeiro amarelo: alternativa de capitalização de ganhos genéticos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 1, p. 170-176, jan/fev. 2009.

SILVAROLLA, M. B.; MAZZAFERA, P.; DE LIMA, M. M. A. Caffeine content of Ethiopian *Coffea arabica* beans. **Genetics and Molecular Biology**, Ribeirão Preto, v. 23, n. 1, p. 213-215, Mar. 2000.

SILVAROLLA, M. B.; MAZZAFERA, P.; FAZUOLI, L. C. A naturally decaffeinated arabica coffee. **Nature**, London, v. 429, n. 6994, p. 826, June 2004.

SIN, C. W. M.; HO, J. S. C.; CHUNG, J. W. Y. Systematic review on the effectiveness of caffeine abstinence on the quality of sleep. **Journal of Clinical Nursing**, Oxford, v. 18, n. 1, p. 13-21, Jan. 2009.

- SOUZA, R. A. G. D.; SICHIERI, R. Consumo de cafeína e prematuridade. **Revista de Nutrição**, Campinas, v. 18, n. 5, p. 643-650, set./out. 2005.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- TANG, N. et al. Coffee consumption and risk of lung cancer: A meta-analysis. **Lung Cancer**, Shannon, v. 67, n. 1, p. 17-22, Jan. 2009.
- TNS-INTERSCIENCE. **Tendências do consumo de café no Brasil**, 2008.
Disponível em: <http://www.abic.com.br/estat_pesquisas.html>. Acesso em: 23 jun. 2010.
- TOCI, A.; FARAH, A.; TRUGO, L. C. Efeito do processo de descafeinação com diclorometano sobre a composição química dos cafés arábica e robusta antes e após a torração. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 5, p. 965-971, set./out. 2006.
- TRUGO, R. C.; MACRAE, R. Application of high performance liquid chromatography to the analysis of some non-volatile coffee components. **Archivos Latinoamericanos de Nutrición**, Caracas, v. 39, n. 1, p. 97-107, Mar. 1989.
- VENCOVSKY, R.; BARRIGA, P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**.
Ribeirão Preto: Revista Brasileira de Genética, 1992. 496 p.
- WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**,
Washington, v. 20, n. 7, p. 557-585, Jan. 1921.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

**AVALIAÇÃO DO TEOR DE CAFEÍNA EM FOLHAS E GRÃOS
DE ACESSOS DE CAFÉ ARÁBICA**

**Artigo redigido conforme norma da revista científica
Ciência Agrônômica (Versão preliminar)**

**Avaliação do teor de cafeína em folhas e grãos
de acessos de café arábica**

Evaluation of the caffeine content in leaves and grains
of arabica coffee accessions

Resumo - O presente trabalho foi realizado com o objetivo de identificar, dentro do banco de germoplasma do estado de Minas Gerais, acessos de *Coffea arabica* L. com baixos teores de cafeína e verificar a possibilidade de utilização da seleção precoce por meio da existência de correlação entre o teor de cafeína dos grãos e de folhas ainda no estágio de mudas. Foram avaliados, quanto ao teor de cafeína, 75 acessos de *Coffea arabica* L. (cultivares, híbridos e alguns genótipos selvagens) oriundos do banco de germoplasma de café, instalado na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, em Patrocínio, MG. Para o estudo da correlação, foram utilizadas oito cultivares no delineamento de blocos casualizados com três repetições. Avaliaram-se os teores de cafeína presentes nos grãos e no terceiro e quarto par de folhas verdadeiras. A determinação da cafeína foi realizada utilizando-se espectrofotometria a 273 nm. Seis acessos apresentaram teores de cafeína nos grãos menores que 0,88%. Detectou-se correlação significativa entre os teores de cafeína do terceiro (0,69) e do quarto (0,92) par de folhas e dos grãos. Verifica-se a existência de acessos com teores reduzidos de cafeína e boa produtividade de grãos, podendo ser utilizados como genitores em programas de melhoramento. É possível realizar a seleção precoce para teor de cafeína, em plantas de café ainda no estágio de mudas, por meio da avaliação do quarto par de folhas.

Palavras-chave - *Coffea arabica* L. Melhoramento genético. Correlação fenotípica. Seleção precoce.

Abstract - The aim of this study was to identify, within the germplasm bank of the Minas Gerais state, *Coffea arabica* L. accessions with low content of caffeine and verify the possibility of early selection by the correlation between grain and leaves at the seedling stage. Seventy-five accessions of *Coffea arabica* L. (cultivars, hybrids and several wild genotypes) were evaluated from the coffee germplasm bank, installed at the experimental farm of the Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Patrocínio, MG. In the correlation study, eight cultivars were used on randomized complete block design with three replications. Were evaluated the caffeine content in the grains and the third and fourth pair of true leaves. The determination of caffeine was performed using spectrophotometry at 273 nm. Six accessions had caffeine content in grains smaller than 0.88%. Was also detected a significant correlation between the caffeine content in the third (0.69) and fourth (0.92) pair of leaves and grains. Genotypes were identified with low content of caffeine and great yield may be used as parental in breeding programs. It is possible to perform early selection for caffeine content in coffee plants, still in the seedling stage, by evaluating the fourth pair of leaves.

Key words - *Coffea arabica* L.. Genetic breeding. Correlation phenotypic. Early selection.

Introdução

O consumo de café no mundo está em contínua expansão e, cada vez mais, o mercado consumidor exige um café com alta qualidade de bebida. Em 2010, o Brasil alcançou 47 milhões de sacas beneficiadas, com um consumo *per capita* chegando a 4,65 kg ano⁻¹ de café torrado, o que corresponde a uma média de aproximadamente 78 litros de café para cada brasileiro (ABIC, 2010).

Em uma pesquisa realizada pela agência TNS-Interscience (2008) revelou que nove em cada dez brasileiros com mais de quinze anos de idade consomem

café diariamente, o que torna o café a segunda bebida comercializada com maior aceitação pela população, atrás apenas da água e à frente do refrigerante e do leite. Uma das razões para o elevado consumo de café é devido à presença da cafeína em seus grãos (RAJU; GOPAL, 1979; MAZZAFERA; SILVAROLLA, 2010). A cafeína age como um estimulante do sistema nervoso central, aumentando a concentração e diminuindo a fadiga.

Por outro lado, algumas pesquisas revelam que a ingestão de cafeína em excesso pode causar vários distúrbios no organismo, como dores de cabeça, irritabilidade, insônia, doenças coronarianas e até evoluir para alguns tipos de câncer (GALLUS et al., 2009; MONTELLA et al., 2009; SIN et al., 2009; TANG et al., 2009). Devido a esses estudos, a procura pelo café descafeinado tem aumentado consideravelmente, sendo até mesmo recomendado por médicos.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Café, ABIC, o consumo de café industrialmente descafeinado no Brasil é de aproximadamente 1,2%. Contudo, estima-se que, de todo o café mundialmente comercializado, 10% destinam-se à descafeinação (ABIC, 2010). Este fato tem especial significado, considerando que o Brasil é o maior produtor mundial de café. Somente nos Estados Unidos, em 1999, a demanda por bebidas sem cafeína, como café e chá verde descafeinados, chegou a atingir 23% do setor de bebidas desse gênero. Esses valores variam muito de um país para outro (HEILMANN, 2001; SILVAROLLA et al., 2004).

Atualmente, todo o café descafeinado encontrado no mercado nacional é obtido com o uso de solventes químicos, em que a extração da cafeína é realizada nos grãos crus inteiros, antes do processo de torrefação. Esse procedimento deprecia muito a qualidade de bebida do café (ABRAHÃO et al., 2008). A legislação brasileira define um teor máximo de 0,1% de cafeína para que o café seja considerado descafeinado (BRASIL, 1999). Desse modo, a

identificação de plantas com boa produção de grãos e baixos teores de cafeína permitiria obter café descafeinado com boa qualidade de bebida.

Já existem alguns trabalhos que almejam a obtenção de cultivares de café com teores reduzidos de cafeína. Entretanto, até o momento, os genótipos desenvolvidos possuem baixa produtividade, ou mesmo, qualidade de grãos inadequada para um mercado consumidor cada vez mais exigente (SILVAROLLA et al., 2004; NAGAI et al., 2008; PRIOLLI et al., 2008).

Neste contexto, é de suma importância desenvolver cultivares de café com baixos teores de cafeína, com alta produtividade e qualidade de grãos, no intuito de atender à expansão desse nicho de mercado, oferecendo uma bebida de alta qualidade, sem a adição de reagentes químicos para extração da cafeína. E ainda, em se tratando de plantas perenes, a existência de correlação entre caracteres na fase juvenil e na fase produtiva seria de grande utilidade ao melhorista, já que tornaria viável a utilização da seleção precoce, maximizando os ganhos com a seleção.

O presente trabalho foi realizado com os objetivos de identificar, dentro do banco de germoplasma de café do estado de Minas Gerais, acessos de *Coffea arabica* L. com baixos teores de cafeína e verificar a existência de correlação entre o teor de cafeína dos grãos e de folhas ainda no estágio de mudas, viabilizando a utilização da seleção precoce.

Material e métodos

Foram realizados dois experimentos, sendo o primeiro com o objetivo de identificar acessos com baixos teores de cafeína (Experimento A) e o segundo para verificar a correlação entre o teor de cafeína dos grãos e das folhas de mudas de cafeeiro (Experimento B).

O experimento A foi realizado em Patrocínio, MG, situado nas coordenadas 18°56'38"S e 46°59'34"O. O clima da região é classificado como

tropical de altitude, Cwa (Köppen), com temperaturas médias anuais de 20,2°C, precipitação pluvial média de 1.620 mm, dos quais de 65% a 70% concentram-se no período de dezembro a março. A altitude média é de 972 m.

Foram avaliados 75 acessos de *Coffea arabica* L. do banco de germoplasma de café do estado de Minas Gerais, instalado no ano de 2005, na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Epamig), em Patrocínio, MG. O delineamento utilizado foi o blocos casualizados com duas repetições, espaçamento de 3,5 x 0,8 metros, com dez plantas por parcela. Dentre os acessos avaliados estão: cultivares, híbridos e alguns genótipos selvagens introduzidos de outros países.

O período de coleta dos dados foi entre os meses de junho a julho de 2009. As adubações foram realizadas de acordo com as recomendações para a cultura do cafeeiro. Foram adotadas as práticas de manejo usualmente empregadas na cultura.

As amostras foram colhidas manualmente (500 gramas por acesso), com frutos no estágio cereja de, no mínimo, três plantas diferentes de cada acesso. Em seguida, cada amostra foi despulpada e seca em terreiro. Nessa primeira avaliação, cada acesso foi representado por uma única amostra sem repetição, portanto, três subamostras foram retiradas dessa amostra única, em forma de replicata, para as análises em laboratório. Uma nova avaliação foi realizada no ano de 2010, apenas com os acessos melhores classificados quanto ao baixo teor de cafeína nos grãos, utilizando o delineamento em blocos casualizados com duas repetições, para a confirmação dos resultados obtidos no ano de 2009. Foram coletados também dados da produção de grãos por parcela dos 75 acessos, referentes aos anos de 2009 e 2010. Posteriormente, fez-se a conversão para sacas por hectare.

O experimento B foi conduzido em Lavras, MG, situada a 21°14'43"S e 44°59'59"O. O clima da região é classificado como mesotérmico, Cwa

(Köppen), com temperaturas médias anuais de 19,3°C, precipitação pluvial média de 1.411 mm, com 65% a 70% desse total concentrados no período de dezembro a março. A altitude média é de 919 m. O trabalho foi desenvolvido com amostras extraídas de um experimento instalado em janeiro de 2004, no Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras (DAG/UFLA), em Lavras, MG. O delineamento experimental foi o blocos casualizados, espaçamento de 3,5 x 0,8 metros, com três repetições e sete plantas por parcela.

Foram utilizadas as cultivares Acauã, Catucaí Amarelo 2SL, Obatã IAC - 669-20, Oeiras MG - 6851, Palma II IBC - Palma II, Paraíso MG - H419-1, Robusta e Topázio MG - 1190. A coleta dos frutos maduros foi realizada em junho de 2009. As adubações foram realizadas de acordo com as recomendações para a cultura do cafeeiro. Foram adotadas as práticas de manejo usualmente empregadas na cultura.

Cada parcela foi representada por 500 gramas de frutos no estágio cereja. Parte dos frutos foi utilizada para a quantificação da cafeína e o restante para a produção de mudas. Os frutos utilizados na quantificação da cafeína foram secos em estufa de circulação forçada a 65°C por 48 horas. Para a formação das mudas, as sementes foram despulpadas e secas à sombra. Em seguida, foram semeadas em sacos plásticos e conduzidas em casa de vegetação. Cada parcela foi representada por dez mudas. A coleta das folhas foi realizada quando as mudas atingiram o quarto par de folhas verdadeiras completamente desenvolvidas. Foram coletados o terceiro e o quarto par de folhas verdadeiras para análise. A escolha dos pares de folhas foi baseada na hipótese de que as maiores concentrações de cafeína estão presentes nos últimos pares de folhas emitidos (RAJU; GOPAL, 1979) e que extração de folhas muito cedo (primeiro e segundo par) poderia prejudicar o desenvolvimento das mudas.

As análises de quantificação do teor de cafeína nos grãos e nas folhas, de ambos os experimentos, foram realizadas no laboratório de qualidade do café da

Epamig, em Lavras, MG. Todos os grãos foram secos até umidade próxima a 12%. As amostras em grãos foram inicialmente homogeneizadas em moinho de facas até a obtenção de partículas de tamanho reduzido e passaram por peneira de 0,84 mm de abertura de poro. As amostras de folhas foram secas em estufa de circulação forçada a 65°C por 48 horas e, posteriormente, trituradas em cadinho.

A determinação da cafeína foi realizada utilizando-se espectrofotometria com comprimento de onda a 273 nm, conforme metodologia descrita por Li et al. (1990). O procedimento constou do seguinte: a) preparo da solução padrão de cafeína em H₂O a 0, 10, 25, 50, 100 e 150 mg L⁻¹; b) transferência de 200 mg de amostra de tecido vegetal para frasco de vidro de 50 mL; c) adição de 20 mL de H₂O e 500 mg de MgO; d) aquecimento por 30 minutos, em banho-maria, a 95°C, deixou-se resfriar em temperatura ambiente e, posteriormente, completou-se com água o volume evaporado; e) após decantação do tecido vegetal, transferiram-se 2 mL de alíquota e/ou de solução padrão de cafeína para tubo de vidro, de 25 mL com tampa; f) adicionaram-se 4 mL de CHCl₃, agitando-se por 10 minutos e centrifugando-se; g) transferiram-se 2 mL da fase orgânica para tubo de vidro; h) evaporou-se o CHCl₃ em estufa, a 65°C; i) adicionaram-se 10 mL de H₂O destilada e fez-se a leitura em espectrofotômetro a 273 nm e j) estimou-se a concentração da cafeína por meio da curva analítica.

Os dados dos teores de cafeína em grãos e folhas (%) e da produtividade de grãos (sc ha⁻¹) foram submetidos à análise de variância com a significância dos efeitos verificada pelo teste F, a 5% de probabilidade. Para a produção de grãos realizou-se também a análise conjunta dos anos de 2009 e 2010. A acurácia seletiva (\hat{r}_{gg}), determinada por meio da expressão: $\hat{r}_{gg} = (1-1/F)^{1/2}$, em que F é o valor do teste F de Snedecor para o efeito de genótipo (RESENDE; DUARTE, 2007), foi estimada para aferir a precisão experimental. Também foi estimada a herdabilidade no sentido amplo (h^2). As médias dos genótipos foram agrupadas pelo teste de Scott e Knott (1974) a 5% de probabilidade.

A associação entre os caracteres teor de cafeína no grão e teor de cafeína na folha foi medida pelo coeficiente de correlação linear de Pearson e sua significância foi verificada pela estatística t-Student, a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas no pacote estatístico SAS (Statistical Analysis System) (SAS, 2008).

Resultados e discussão

No experimento A, foi possível observar diferença significativa ($P \leq 0,01$) quanto ao teor de cafeína nos grãos entre os 75 acessos de *Coffea arabica* L. avaliados no ano de 2009 (Tabela 1). A acurácia (\hat{r}_{gg}) e repetibilidade ($\hat{\rho}$) foram de elevada magnitude, mostrando que a precisão experimental foi adequada. O uso da acurácia, como medida de precisão experimental, sugerido por Resende e Duarte (2007), tem a vantagem de não depender da magnitude da média proporcionando maior segurança na utilização da expressão fenotípica como indicador da variação genotípica. Valores de acurácia acima de 70% indicam uma alta precisão experimental.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância quanto ao teor de cafeína nos grãos (%), em acessos de *Coffea arabica* L., Patrocínio, Minas Gerais, 2009-2010

FV	Cafeína ¹ (%) - 2009		Cafeína ² (%) - 2010	
	GL	Quadrado médio	GL	Quadrado médio
Blocos	-	-	1	0,0009
Acessos	74	0,0611**	8	0,0059 ^{NS}
Resíduo	150	0,0031	8	0,0012
Média		1,12		0,89
\hat{r}_{gg} (%)		97,35		89,19
$\hat{\rho}$ (%)		94,78 (92,36;96,54) [#]		-
h^2 (%)		-		79,55 (09,35;95,39) [#]

¹ Referente aos 75 acessos avaliados no ano de 2009. ² Referente aos 9 acessos melhores classificados, reavaliados no ano de 2010. ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

^{NS} Não significativo pelo teste F ($P \leq 0,05$). [#] Intervalo de confiança a 95% de probabilidade.

Quanto à produção de grãos, foi observada diferença significativa entre acessos ($P \leq 0,05$). Houve também diferença entre anos, além de uma interação acessos X anos significativa, indicando que o comportamento dos acessos foi não consistente nos dois anos de avaliação (Tabela 2). A média geral e a herdabilidade (h^2) foram de 16,42 sc ha⁻¹ e 64%, respectivamente. A acurácia também se mostrou elevada ($\hat{r}_{gg} = 80\%$), indicando boa precisão experimental na avaliação da produção.

Tabela 2 - Resumo da análise de variância conjunta quanto à produção de grãos (sc ha⁻¹), dos 75 acessos de *Coffea arabica* L. avaliados nos anos de 2009 e 2010, Patrocínio, Minas Gerais, 2010

FV	Produção (sc ha ⁻¹)	
	GL	Quadrado médio
Acessos	74	427,0177**
Anos	1	176,2414*
Acessos x Anos	74	153,7052**
Resíduo	148	44,5137
Média		16,42
\hat{r}_{gg} (%)		80,00
h^2 (%)		64,00 (43,02;77,26) [#]

** e * Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

[#] Intervalo de confiança a 95% de probabilidade.

Oito por cento dos acessos avaliados apresentaram valores reduzidos para porcentagem de cafeína nos grãos (<0,88%), os quais são MG 1019, MG 0228, MG 0890, MG 0453, MG 0139, MG 0733 (Tabela 3A). Dentre estes, encontra-se a cultivar Laurina (MG 0228) que é considerada dentro da espécie *Coffea arabica* L., a cultivar que apresenta menor teor de cafeína, em torno de 0,62% (CARVALHO et al., 1988). Heilmann (2001) ressalta que as variações para teor de cafeína em genótipos de café arábica e robusta estão entre 0,8% a 2,8%. Com

exceção dos acessos identificados como cultivar (MG 0139 e MG 0228), todos os outros quatro acessos são plantas $F_{1,s}$ oriundas de hibridações, identificadas apenas pelo seu referido código (Tabela 3A). A média geral para teor de cafeína nos grãos foi de 1,12%.

Dentre os acessos avaliados, alguns são identificados como cultivares amplamente utilizadas pelos agricultores pelo seu alto potencial produtivo e/ou pela boa qualidade de bebida (Bourbon amarelo, Catuaí Vermelho, Catucaí Amarelo, Caturra Vermelho, Mundo Novo Amarelo e Obatã Amarelo). A média de produção para as referidas cultivares foi de 29,23 sc ha⁻¹. No entanto, todas apresentaram teores de cafeína acima de 0,86%. Conforme já citado, o teor máximo exigido pela legislação brasileira é de 0,1% de cafeína para cafés descafeinados. Assim, o resultado do presente trabalho indica a inexistência de uma cultivar produtiva que se enquadre nos parâmetros exigidos para ser considerado como um café descafeinado.

Esses teores elevados de cafeína afetam sobremaneira o mercado consumidor de cafés descafeinados, já que há necessidade de se extrair a cafeína presente nos grãos para abastecer o mercado, a um custo médio de US\$0,50 kg⁻¹ (HEIN; GATZWEILER, 2006). Segundo Abrahão et al. (2008) a descafeinação, com o uso de solventes químicos, altera a concentração dos compostos bioativos presentes na bebida do café, afetando a qualidade sensorial e tornando esta uma bebida descaracterizada e de qualidade inferior.

Os nove acessos com melhor classificação quanto ao baixo teor de cafeína nos grãos, reanalisados no ano de 2010, apresentaram valores semelhantes aos observados no ano anterior, com média de 0,89% (Tabela 4). Não foi detectada diferença significativa entre os mesmos (Tabela 1). Dentre esses nove acessos reanalisados, percebe-se uma diferença no teor de cafeína entre as avaliações de 2009 e 2010. Isso se deve ao fato de que o teor de cafeína presente nos grãos é muito influenciado por fatores ambientais, sendo recomendando uma avaliação

no maior número de anos possível. Com relação à produção, a média observada desses acessos foi de 19,87 sc ha⁻¹, produtividade esta semelhante à daqueles acessos representados por cultivares. Destaque para o acesso MG 0139 com produtividade de 63,80 sc ha⁻¹. Os acessos MG 0149 e MG 0245 também apresentaram produção satisfatória (Tabela 3A). Já os outros acessos apresentaram produtividades abaixo da média, o que poderia causar demora no processo de melhoramento.

Produções baixas também foram comentadas por Carvalho et al. (1988) para o acesso MG 0228 (cv. Laurina), que ressaltaram, ainda, a má qualidade dos grãos para essa cultivar. Diante do exposto, os acessos MG 0139, MG 0149 e MG 0245, apesar de não apresentarem teores de cafeína dentro do exigido para o mercado descafeinado, poderiam ser utilizados como genitores na obtenção de uma população de melhoramento com teores reduzidos de cafeína nos grãos.

Tabela 4 - Nove acessos de *Coffea arabica* L. com melhor classificação quanto ao baixo teor de cafeína nos grãos⁽¹⁾ (%) no ano de 2009, reavaliados em 2010, Patrocínio, Minas Gerais, 2009-2010

Rank	Acesso	Cafeína (%)	
		2009	2010
1	MG 1019	0,8242 a	0,8509 a
2	MG 0228	0,8381 a	0,8340 a
3	MG 0890	0,8409 a	0,9184 a
4	MG 0453	0,8610 a	0,8014 a
5	MG 0139	0,8680 a	0,8978 a
6	MG 0733	0,8735 a	0,8759 a
7	MG 1063	0,8986 b	0,9484 a
8	MG 0149	0,9145 b	0,9695 a
9	MG 0245	0,9333 b	0,8882 a
Média		0,87	0,89

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, na vertical, pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott e Knott, a 5% de probabilidade.

No experimento B, em que se procurou detectar associações significativas entre os teores de cafeína presentes nos grãos e no terceiro e quarto par de folhas, foi possível observar estimativas de correlações altas e positivas entre os teores de cafeína presentes nos grãos e no terceiro ($r=0,69$) e quarto ($r=0,92$) par de folhas (Tabela 5). Na Figura 1A é possível visualizar as concentrações de cafeína nos grãos, no terceiro e no quarto par de folhas.

Tabela 5 – Estimativas das correlações fenotípicas de Pearson entre os teores de cafeína nos grãos e no terceiro par de folhas e quarto par de folhas de mudas, Lavras, Minas Gerais, 2009

	Grãos	Terceiro par de folhas	Quarto par de folhas
Grãos	1,00	0,69*	0,92**
Terceiro par de folhas		1,00	0,83**
Quarto par de folhas			1,00

** e * Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Na presença de correlação, a seleção indireta para teor de cafeína torna-se praticável, viabilizando a utilização da seleção precoce. O emprego dessa técnica é muito importante, visto que, em espécies perenes o número de anos para se completar um ciclo seletivo é o principal entrave dos programas de melhoramento. Outros trabalhos têm sido realizados com este mesmo objetivo, estudando a estimativa da eficiência da seleção na idade juvenil e correspondência na idade adulta (FARIAS NETO et al., 2003; MACHADO et al., 2008).

Constatou-se que a concentração de cafeína presente no quarto par de folhas (último par de folhas avaliado) é maior que a concentração do terceiro par de folhas. Raju e Gopal (1979) encontraram a mesma tendência e observaram maiores níveis de cafeína em folhas jovens em relação a folhas velhas. Já

Chaves et al. (2004) obtiveram resultados diferentes, em que observaram nas folhas do primeiro par teores mais elevados de cafeína quando comparado com as folhas do terceiro par.

A partir dos resultados, pode-se inferir que é possível realizar a seleção precoce para teor de cafeína, em cafeeiros, a partir da avaliação do quarto par de folhas de mudas. Isso torna o processo de seleção mais dinâmico, ou seja, pode-se realizar um descarte dos genótipos indesejáveis, reduzindo custos, tempo e mão de obra nos programas de melhoramento genético.

Conclusões

1. Entre os acessos avaliados, encontram-se genótipos com teores reduzidos de cafeína e boa produtividade de grãos.
2. Existe correlação alta e positiva entre o teor de cafeína dos grãos e do quarto par de folhas de mudas, o que evidencia a possibilidade de utilizar a seleção precoce para teor de cafeína, ainda no estágio de mudas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Epamig e à UFLA, pela disponibilização da infraestrutura e de equipamentos, e às agências de fomento Capes, CNPq e Fapemig, pelo auxílio financeiro.

Referências

ABIC. **Estatísticas - Produção Agrícola**, 2010. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/estatisticas.html>>. Acesso em: 19 dez. 2010.

ABRAHÃO, S. A. *et al.* Compostos bioativos em café integral e descafeinado e qualidade sensorial da bebida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 12, p. 1799-1804, dez. 2008.

BRASIL. Portaria n. 377, de 26 de abril de 1999. Regulamento técnico para fixação de identificação e qualidade de café torrado em grão e café torrado e moído. **Diário Oficial da União**, Brasília, v. 137, n. 80, p. 22, 29 abr. 1999. Seção 1.

CARVALHO, A.; FAZUOLI, L. C.; MAZZAFERA, P. Produtividade de progênies derivadas de hibridação dos cultivares Laurina e Mundo Novo. **Bragantia**, v. 47, n. 2, p. 213-222, jul. 1988.

CHAVES, J. C. D. *et al.* Estimativa do teor de cafeína nas sementes de café baseada na sua concentração nas folhas de mudas e de plantas adultas. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 26, n. 3, p. 287-292, jul. 2004.

FARIAS NETO, J. T.; CASTRO, A. W. V.; BIANCHETTI, A. Aplicação da seleção precoce em famílias de meios irmãos de taxi-branco. **Acta Amazonica**, v. 33, n. 1, p. 85-91, jan. 2003.

GALLUS, S. *et al.* Coffee, black tea and risk of gastric cancer. **Cancer Causes and Control**, v. 20, n. 8, p. 1-6, oct. 2009.

HEILMANN, W. Technology II: decaffeination of coffee. In: CLARK, R. J.; VITZTUM, O. G. (Ed.). **Coffee: Recent development**. Oxford: Blackwell Science, 2001. p. 108-124.

HEIN, L.; GATZWEILER, F. The economic value of coffee (*Coffea arabica*) genetic resources. **Ecological Economics**, v. 60, n. 1, p. 176-185, nov. 2006.

LI, S.; BERGER, J.; HARTLAND, S. UV spectrophotometric determination of theobromine and caffeine in cocoa beans. **Analytica Chimica Acta**, v. 232, n. 1, p. 409-412, jan. 1990.

MACHADO, C. D. F. *et al.* Identificação de genótipos de feijão-caupi quanto à precocidade, arquitetura da planta e produtividade de grãos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n. 1, p. 114-123, 2008.

MAZZAFERA, P.; SILVAROLLA, M. B. Caffeine content variation in single green arabica coffee seeds. **Seed Science Research**, v. 20, n. 3, p. 13-167, sep. 2010.

MONTELLA, M. *et al.* Coffee, decaffeinated coffee, tea intake, and risk of renal cell cancer. **Nutrition and Cancer**, v. 61, n. 1, p. 76-80, jan. 2009.

NAGAI, C. *et al.* Production of a new low-caffeine hybrid coffee and the biochemical mechanism of low caffeine accumulation. **Euphytica**, v. 164, n. 1, p. 133-142, nov. 2008.

PRIOLLI, R. H. G. *et al.* Caffeine inheritance in interspecific hybrids of *Coffea arabica* x *Coffea canephora* (Gentianales, Rubiaceae). **Genetics and Molecular Biology**, v. 31, n. 2, p. 498-504, apr. 2008.

RAJU, K. I.; GOPAL, N. H. Distribution of caffeine in arabica and robusta coffee plants. **Journal of Coffee Research**, v. 9, n. 4, p. 83-90, oct. 1979.

RESENDE, M. D. V.; DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, n. 3, p. 182-194, 2007.

SAS. **SAS/STAT® 9.2 User's Guide**. Version 9.2, Cary, NC: SAS Institute Inc., 2008. 584p.

SCOTT, A. J.; KNOTT, M. A. Cluster analyses method for grouping means in the analyses of variance. **Biometrics**, v. 30, n. 3, p. 507-512, 1974.

SILVAROLLA, M. B.; MAZZAFERA, P.; FAZUOLI, L. C. A naturally decaffeinated arabica coffee. **Nature**, v. 429, n. 6994, p. 826, jun. 2004.

SIN, C. W. M.; HO, J. S. C.; CHUNG, J. W. Y. Systematic review on the effectiveness of caffeine abstinence on the quality of sleep. **Journal of Clinical Nursing**, v. 18, n. 1, p. 13-21, jan. 2009.

TANG, N. *et al.* Coffee consumption and risk of lung cancer: A meta-analysis. **Lung Cancer**, v. 67, n. 1, p. 17-22, jan. 2009.

TNS-INTERSCIENCE. **Tendências do consumo de café no Brasil**, 2008. Disponível em: <http://www.abic.com.br/estat_pesquisas.html>. Acesso em: 23 jun. 2010.

Tabela 3 - Relação dos 75 acessos de *Coffea arabica* L., em ordem crescente quanto ao teor de cafeína nos grãos⁽¹⁾ (2009) e produção de café beneficiado⁽¹⁾ (sc ha⁻¹) (2009 e 2010), oriundos do Banco de Germoplasma de Café do estado de Minas Gerais, Patrocínio, Minas Gerais, 2009-2010

Acesso	Genótipo	Cafeína (%)	Produção (sc ha ⁻¹)
MG 1019	Dilla & Alghe x S 333 UFV 329-80	0,8242 a	5,35 d
MG 0228	Laurina	0,8381 a	16,00 d
MG 0890	Bourbon 43/7 x RP 13 x CIFC H 264 UFV 360-01	0,8409 a	1,98 d
MG 0453	Mundo Novo x S 795 UFV 335-77	0,8610 a	15,07 d
MG 0139	Mundo Novo Amarelo	0,8680 a	63,80 a
MG 0733	Catuaí Amarelo x CIFC H 398/06 UFV 489-02	0,8735 a	18,83 c
MG 1063	Sarchimor IAC 1669-1-6 C 1004	0,8986 b	2,56 d
MG 0149	Iarana 1973-74 MS	0,9145 b	29,02 b
MG 0245	Obatã Tardio	0,9333 b	26,23 b
MG 0811	H 66 x S 12 Kaffa UFV 411-10	0,9361 b	6,98 d
MG 0240	Volutifolia Vermelho	0,9389 b	2,60 d
MG 0265	Durandé Arabica x Canephora	0,9472 b	1,30 d
MG 0533	BE 5 Wush-Wush x Híbrido Timor UFV 366-05	0,9590 b	7,91 d
MG 0002	Típica UFV 536	0,9674 c	18,60 c
MG 0765	K 7 x Dilla & Alghe UFV 485-05	0,9715 c	12,56 d
MG 0236	Poliatrófica	1,0007 c	16,18 d
MG 1170	Acauã	1,0042 c	12,32 d
MG 0118	Bourbon Trigo	1,0104 c	25,86 b
MG 0188	Caturra Amarelo	1,0118 c	19,90 c
MG 1059	Sarchimor UFV 350-98	1,0153 c	6,51 d
MG 0421	Mundo Novo x S 795 UFV 315 -05	1,0278 c	19,72 c
MG 0971	S 333 x Dilla & Alghe UFV 327-01	1,0341 c	7,21 d
MG 0230	Catuaí Erecta	1,0362 c	29,39 b
MG 1049	Sarchimor UFV 350-05	1,0417 c	4,19 d
MG 1065	Caturra Amarelo x Sarchimor UFV 351-01	1,0466 c	4,42 d
MG 1166	Ouro Verde Amarelo IAC 4397	1,0487 c	4,42 d

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, na vertical, pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott e Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 3 - Continua.

Acesso	Genótipo	Cafeína (%)	Produção (sc ha ⁻¹)
MG 0170	Maragogipe Vermelho PI 01	1,0639 c	10,97 d
MG 0803	F 840 x S 12 Kaffa UFV 398-01	1,0674 c	8,60 d
MG 1005	Geisha x S 288/23 UFV 328-43	1,0674 c	11,16 d
MG 0251	Catucaí Amarelo	1,0883 c	18,42 c
MG 1167	Sabiá médio 708	1,0931 c	7,67 d
MG 0617	DK 1/6 UFV 302-55	1,1077 d	20,00 c
MG 0119	Bourbon Italiano	1,1098 d	31,06 b
MG 0017	Bourbon Amarelo LCJ 20	1,1112 d	29,95 b
MG 0526	H 66 x Híbrido Timor UFV 372-01	1,1133 d	15,58 d
MG 1062	IAPAR 59	1,1161 d	3,49 d
MG 0241	Glauca	1,1195 d	12,28 d
MG 0237	Cera	1,1272 d	9,11 d
MG 0417	Híbrido Timor	1,1314 d	17,49 c
MG 0783	K 7 x S 12 Kaffa UFV 412-24	1,1383 d	6,28 d
MG 0720	Caturra Amarelo x CIFIC H 65/7 UFV 332-10	1,1446 d	17,21 c
MG 0512	F 840 x Híbrido Timor UFV 457-80	1,1550 d	17,90 c
MG 0557	Bourbon N197 x Híbrido Timor UFV 403-01	1,1598 d	17,67 c
MG 0181	UFV 3075 c. 319 ENX.1	1,1661 d	14,70 d
MG 1156	Catimor MS	1,1710 d	14,42 d
MG 0206	Guatemalenses	1,1800 d	8,93 d
MG 0145	Planta Desconhecida	1,1814 d	11,53 d
MG 0187	Caturra Vermelho	1,1960 d	17,11 c
MG 0110	Bourbon Amarelo	1,1995 d	33,48 b
MG 0570	EMOKA x Híbrido Timor UFV 453-43	1,2064 d	11,16 d
MG 0231	Erecta	1,2085 d	10,60 d
MG 0215	Caturra Vermelho UFV 534 C64	1,2092 d	7,44 d

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, na vertical, pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott e Knott, a 5% de probabilidade.

Tabela 3 - Continua.

Acesso	Genótipo	Cafeína (%)	Produção (sc ha ⁻¹)
MG 0248	Obatã Amarelo	1,2189 e	24,55 c
MG 1171	Canário	1,2203 e	9,30 d
MG 0100	Bourbon	1,2300 e	22,88 c
MG 0129	Bourbon IAC	1,2300 e	19,35 c
MG 0131	Sumatra	1,2356 e	21,95 c
MG 0162	Acaia Híbrido F3	1,2439 e	27,90 b
MG 0264	Catuai Vermelho	1,2439 e	18,04 c
MG 0602	K 7 IAC 1151-2 C 1003 UFV 165-02	1,2467 e	22,79 c
MG 0175	Caturra X H. T. IAC 2012	1,2481 e	21,58 c
MG 0158	Maragogipe	1,2488 e	21,95 c
MG 0577	Villa Lobos x H. Timor UFV 346-09	1,2502 e	13,02 d
MG 0015	Bourbon Alaranjado	1,2592 e	30,69 b
MG 0833	DK 1/6 x S 12 Kaffa UFV 340-45	1,2627 e	9,77 d
MG 1084	Cavimor UFV 357-17	1,2627 e	3,95 d
MG 0204	Nanico da Guatemala	1,2696 e	5,95 d
MG 0176	Amphillo X H. Natural MR 36-349	1,2724 e	23,62 c
MG 0544	KP 423 x Híbrido Timor UFV 454-43	1,2759 e	24,88 c
MG 0863	Mundo Novo x CIFC H 288/4 UFV 323-02	1,3239 f	11,16 d
MG 0309	Híbrido Timor UFV 427-65	1,3259 f	18,79 c
MG 0117	Bourbon Limoeiro	1,3489 f	31,81 b
MG 0141	Mundo IAC 379-19	1,3586 f	19,53 c
MG 0006	Bourbon Amarelo LCJ 10	1,3746 f	31,81 b
MG 0153	Acaia Cerrado Pl. diferente	1,3906 f	33,11 b
Média geral		1,12	16,42
\hat{r}_{gg}^2 (%)		97,35	80,00

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, na vertical, pertencem ao mesmo agrupamento pelo teste de Scott e Knott, a 5% de probabilidade.

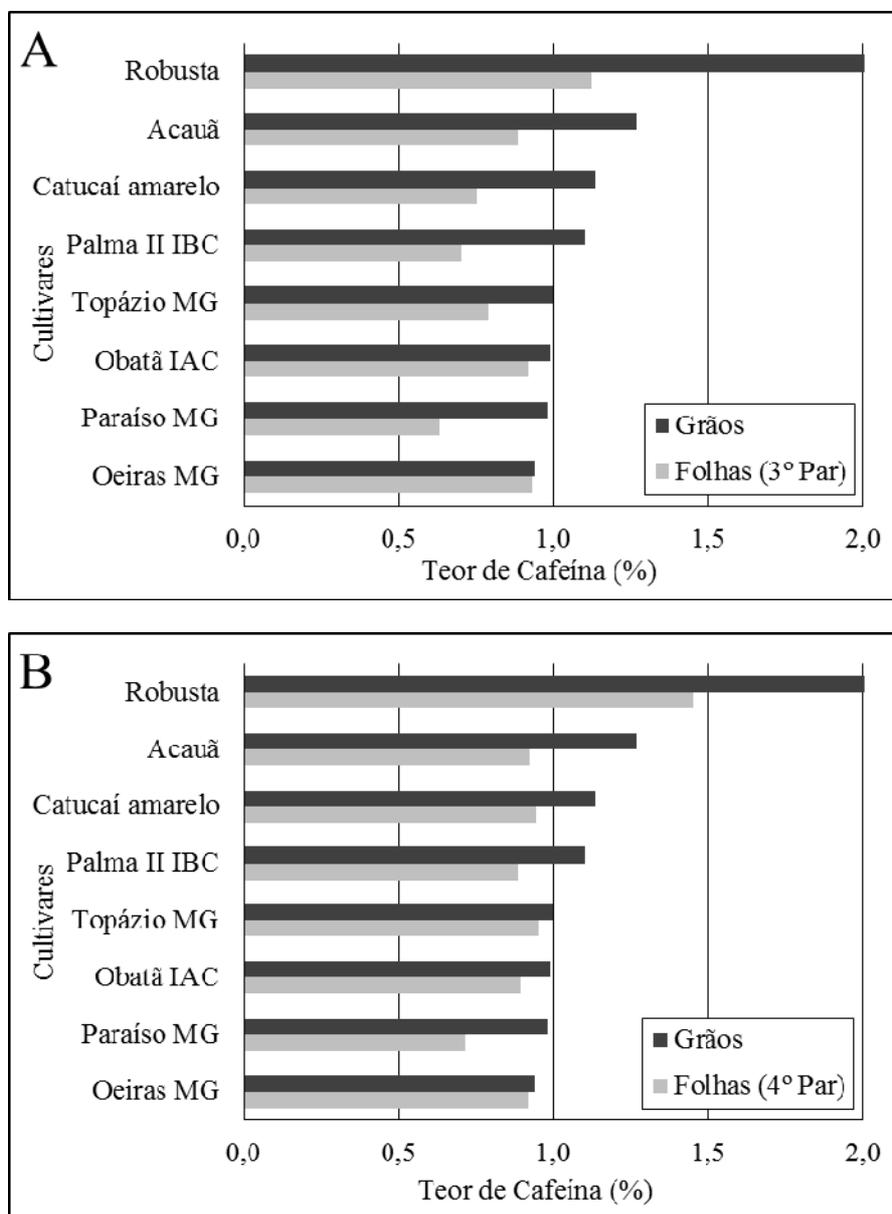


Figura 1 - Comparativo entre os teores de cafeína (%) presente nos grãos com o terceiro par de folhas (A) e quarto par de folhas (B) de mudas, das oito cultivares avaliadas, Lavras, Minas Gerais, 2009

**SELEÇÃO PRECOCE PARA PRODUÇÃO DE GRÃOS
EM CAFÉ ARÁBICA**

**Artigo redigido conforme norma da revista científica
Pesquisa Agropecuária Brasileira (Versão preliminar)**

Seleção precoce para produção de grãos em café arábica

Resumo - Este trabalho teve como objetivo viabilizar a utilização da seleção precoce por meio das relações de causa e efeito entre caracteres morfológicos, aos 12 meses após o plantio no campo, e a produção de grãos. Foram avaliados 269 acessos de *Coffea arabica* L. (cultivares, híbridos e alguns genótipos selvagens) oriundos do banco de germoplasma de café, instalado na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, em Patrocínio, MG. O delineamento utilizado foi o blocos casualizados com duas repetições, espaçamento de 3,5 x 0,8 metros, com parcelas de dez plantas. Os caracteres morfológicos foram avaliados em 2006, 12 meses após a implantação da cultura, com as plantas ainda na fase juvenil. Os dados de produção de grãos são referentes às safras 2008/2009 e 2009/2010. As maiores correlações foram observadas entre a produção de grãos e comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (0,99), vigor vegetativo (0,98), largura do quarto par de folhas (0,78) e número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (0,75). Por meio da análise de trilha, percebe-se que, o comprimento do primeiro ramo plagiotrópico aos 12 meses de idade é o principal responsável pela variação na produção de grãos, visto que apresenta o maior efeito direto no sentido favorável sobre a produção de grãos. A variável secundária vigor vegetativo é a que apresenta maior importância na explicação das variações encontradas na produção de grãos.

Termos para indexação: *Coffea arabica* L., melhoramento do cafeeiro, análise de trilha.

Early selection for grain yield in arabica coffee

The aim of this study was enable the use of early selection by the relationship cause and effect between morphological traits, evaluated at 12 months after planting in the field, and the grain yield. 269 accessions of *Coffea arabica* L. (cultivars, hybrids and several wild genotypes) were evaluated from the coffee germplasm bank, installed at the experimental farm of the Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, Patrocínio, MG. The trial was evaluated on randomized complete block design with two replicates, spaced 3.5 x 0.8 meters, with ten plants per plots. Morphological characters were evaluated in 2006, 12 months after implanting the crop, when the plants were still at the juvenile phase. Data for grain yield are from 2008/2009 and 2009/2010 seasons. High correlations were observed between grain yield and the length of the first plagiotrophical spread (0.99), vegetative vigor (0.98), width of the fourth pair of leaves (0.78) and number of nodes in the first plagiotrophical spread (0.75). Path analysis showed that the length of the first plagiotrophical spread, at 12 months of age, is mainly responsible for the variation in yield because it showed the greatest direct effect in a favorable direction on grain yield. The vegetative vigor is the secondary variable most important in explaining the variations found in grain yield.

Index terms: *Coffea arabica* L., coffee breeding, path analysis.

Introdução

A busca por cultivares cada vez mais produtivas tem sido o principal foco dos programas de melhoramento do cafeeiro no Brasil (Carvalho et al., 1988; Martinez et al., 2007; Carvalho et al., 2010). O emprego da seleção indireta, por meio de caracteres correlacionados à produção de grãos, é uma estratégia que vem sendo utilizada em alguns programas de melhoramento, pois permite maximizar os ganhos com a seleção. Essa ferramenta proporciona aos melhoristas uma melhor orientação na escolha das melhores variáveis a serem utilizadas no momento da seleção (Cruz et al., 2004).

Estimativas de correlações positivas entre produtividade e caracteres morfológicos do cafeeiro têm sido encontradas em diversos trabalhos (Fazuoli, 1977; Walyaro & Vossen, 1979; Silvarolla et al., 1997; Carvalho et al., 2010). Apesar de auxiliar no entendimento de um caráter complexo, a correlação não determina a importância dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres que a compõem. Assim, não é possível constatar se sua estimativa foi estabelecida por verdadeiras relações de causa e efeito, e a interpretação direta das suas magnitudes pode resultar em equívocos na estratégia de seleção, pois a alta correlação entre dois caracteres pode ser resultado do efeito sobre estes, de um terceiro caráter ou de um grupo de caracteres (Wright, 1921; Niles, 1922; Dunteman, 1984; Vencovsky & Barriga, 1992).

A análise de trilha consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos de caracteres sobre uma variável principal, cujas estimativas são obtidas por meio de equações de regressão, em que as variáveis são previamente padronizadas. Apesar de a correlação ser uma característica intrínseca a dois caracteres em dada condição experimental, sua decomposição é dependente do conjunto de caracteres estudados, que normalmente são avaliados pelo conhecimento prévio do pesquisador de suas importâncias e de possíveis inter-relações expressas em diagramas de trilha (Cruz et al., 2004). Esta técnica tem sido amplamente

utilizada no melhoramento de diversas culturas, entretanto, são poucos os trabalhos desta natureza na cultura do cafeeiro.

Ao analisar os efeitos diretos e indiretos de alguns caracteres morfológicos sobre a produtividade de grãos em café, Severino et al. (2002) constataram que o vigor vegetativo e a seca de ponteiros são bons critérios de avaliação do potencial produtivo. Já em estudos com capim-elefante, Daher et al. (2004) verificaram que caracteres morfológicos, como o número de perfilhos por metro linear e diâmetro de perfilhos a 10 cm do solo, foram capazes de explicar melhor o potencial de produção de matéria seca, atuando, respectivamente, de forma direta e inversamente proporcional sobre a variável principal, com variações em função das condições ambientais ocorridas durante o crescimento. Os autores constataram que a análise de trilha pode auxiliar o melhorista na escolha dos caracteres a serem utilizados na seleção para produtividade de grãos, almejando maiores ganhos com a seleção.

Para fins de melhoramento, a identificação de caracteres com maior efeito direto no sentido favorável à seleção é primordial para que a resposta correlacionada por meio da seleção indireta seja eficiente. E, ainda, em se tratando de plantas perenes, a existência de correlação entre caracteres na fase juvenil e na fase produtiva é desejável, já que torna viável a realização da seleção precoce (Walyaro & Vossen, 1979; Freitas et al., 2007).

Este trabalho foi realizado com o objetivo de viabilizar a utilização da seleção precoce por meio das relações de causa e efeito entre caracteres morfológicos, aos 12 meses após o plantio no campo, e a produção de grãos em cafeeiros de *Coffea arabica* L.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido em Patrocínio, MG, situada nas coordenadas 18°56'38"S e 46°59'34"O. O clima da região é classificado como tropical de altitude, Cwa (Köppen), com temperaturas médias anuais de 20,2 °C, precipitação pluvial média de 1.620 mm, com 65% a 70% desse total concentrados no período de dezembro a março, e altitude média de 972 m.

Foram avaliados 269 acessos de *Coffea arabica* L., representados por cultivares, híbridos e alguns genótipos selvagens introduzidos de outros países, oriundos do banco de germoplasma de café, instalado no ano de 2005, na fazenda experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, em Patrocínio, MG. O delineamento utilizado foi o blocos casualizados com duas repetições, espaçamento de 3,5 x 0,8 metros, com parcelas de dez plantas. Os caracteres morfológicos foram avaliados em 2006, 12 meses após a implantação da cultura, com as plantas ainda na fase juvenil. Os dados de produção de grãos são referentes às safras 2008/2009 e 2009/2010.

Os caracteres avaliados foram: a) vigor vegetativo [VIGOR], atribuindo notas arbitrárias de 1 a 10, em que 1 = depauperada e 10 = muito vigorosa; b) altura da planta [ALT], medida do colo da planta até a gema apical do caule, em centímetros; c) número de pares de ramos plagiotrópicos [NP(RP)], avaliado por meio da contagem de todos os pares de ramos laterais primários que apresentaram comprimento superior a cinco centímetros; d) comprimento do primeiro ramo plagiotrópico [COMP(1°RP)], avaliado por meio da medição do primeiro ramo plagiotrópico acima do colo da planta, em centímetros; e) número de nós do primeiro ramo plagiotrópico [NN(1°PF)], obtido pela contagem de todos os nós do ramo; f) comprimento do quarto par de folhas [COMP(4°PF)], em centímetros; g) largura do quarto par de folhas [LARG(4°PF)], em centímetros; h) produção de grãos (café beneficiado) [PROD]: avaliou-se a

produtividade de grãos em quilogramas de café cereja por parcela e, posteriormente, fez-se a conversão para sacas por hectare.

Os experimentos foram conduzidos de acordo com as recomendações de adubação para a cultura do cafeeiro (Guimarães et al., 1999). Foram adotadas as práticas de manejo usualmente empregadas na cultura.

Com a finalidade de atender às pressuposições da análise de variância, foram realizados os testes de homogeneidade e normalidade de variância do erro e, após verificação de que os dados atendem às pressuposições da análise de variância, foram obtidas as estimativas de correlações genotípicas (Mode & Robinson, 1959) e do coeficiente de determinação genotípico (Vencovsky & Barriga, 1992).

Foi avaliado o grau de multicolinearidade da matriz de correlação das médias $X'X$ (Montgomery & Peck, 1981), e para detectar as variáveis que contribuíram para o surgimento da multicolinearidade, efetuou-se a análise dos autovalores e autovetores (Besley et al., 1980). Para contornar os efeitos da multicolinearidade sem o descarte de variáveis foi utilizado o método de regressão em crista ((Hoerl & Kennard, 1970), em que se adicionou uma variável $k=0,15$ à diagonal da matriz de correlação $X'X$. Assim, foi possível obter um número de condição (NC) menor que 100, que caracteriza multicolinearidade fraca, não constituindo problema para a análise de trilha. De acordo com Montgomery & Peck (1981), valores de $NC < 100$ não constituem problema sério (multicolinearidade fraca). Se $100 < NC < 1000$, a multicolinearidade é de moderada a forte e, quando $NC > 1000$, existem fortes indícios de multicolinearidade severa. Posteriormente, foram realizados os desdobramentos das correlações genotípicas em efeitos diretos e indiretos por meio da análise de trilha (Wright, 1921).

Para análise dos dados, adotou-se um diagrama causal em cadeia (Figura 1). O critério adotado na elaboração do diagrama foi baseado na biologia

reprodutiva do cafeeiro, sendo estipulado como variáveis primárias àquelas diretamente relacionadas com a produção de grãos e o restante como variáveis secundárias. Foi considerado como variável principal: produção de grãos; variáveis primárias: número de pares de ramos plagiotrópicos, comprimento do primeiro ramo plagiotrópico e número de nós do primeiro ramo plagiotrópico e variáveis secundárias: vigor vegetativo, altura da planta, comprimento do quarto par de folhas e largura do quarto par de folhas.

A seta unidirecional indica efeito direto de cada variável explicativa, enquanto a seta bidirecional representa a interdependência de duas variáveis explicativas, cuja magnitude é quantificada pela correlação genotípica.

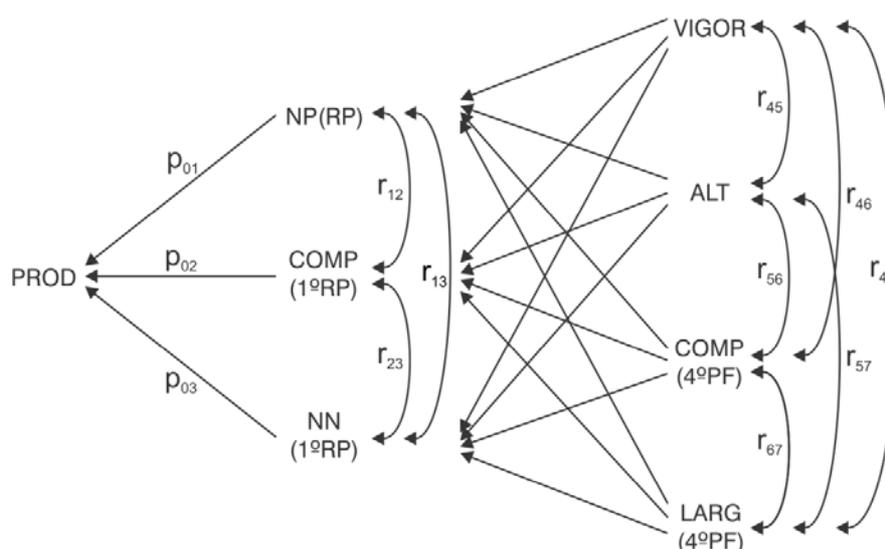


Figura 1. Diagrama causal em cadeia dos efeitos diretos e indiretos das variáveis secundárias VIGOR, ALT, COMP(4ºPF) e LARG(4ºPF) sobre as variáveis primárias NP(RP), COMP(1ºRP) e NN(1ºRP) e a variável principal PROD.

A estimação dos coeficientes de trilha é dada pelo modelo apresentado por Cruz et al. (2004):

$$y = p_{01}x_1 + p_{02}x_2 + p_{03}x_3 + p_\varepsilon u \quad (1)$$

em que:

y : variável principal padronizada;

x_i : variáveis primárias explicativas padronizadas;

u : razão do efeito de ambiente pelo desvio padrão dos efeitos ambientais;

p_{0i} : efeito da variável residual sobre a variável principal;

p_{0i} : razão do produto dos coeficientes de regressão linear entre duas variáveis padronizadas sobre o desvio padrão da variável principal padronizada.

Neste modelo é verificado que:

$$\begin{aligned} V(y) &= V(x_i) = V(u) = 1 \\ Cov(y, x_i) &= r_{0i} \\ Cov(y, x_j) &= r_{ij} \\ Cov(u, x_i) &= 0 \end{aligned}$$

Tendo em vista o modelo (1), verificam-se as seguintes relações:

$$\hat{p}_{01}^2 + \hat{p}_{02}^2 + \hat{p}_{03}^2 + 2\hat{p}_{01}\hat{p}_{02}r_{12} + 2\hat{p}_{01}\hat{p}_{03}r_{13} + 2\hat{p}_{02}\hat{p}_{03}r_{23} + \hat{p}_\varepsilon^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} C\hat{o}v(y, x_1) &= r_{01} = \hat{p}_{01} + \hat{p}_{02}r_{12} + \hat{p}_{03}r_{13} \\ C\hat{o}v(y, x_2) &= r_{02} = \hat{p}_{01}r_{12} + \hat{p}_{02} + \hat{p}_{03}r_{23} \\ C\hat{o}v(y, x_3) &= r_{03} = \hat{p}_{01}r_{13} + \hat{p}_{02}r_{23} + \hat{p}_{03} \end{aligned} \quad (3)$$

Em (2) pode ser estimado o coeficiente de determinação do modelo causal ($R^2_{0.123}$), que mede os efeitos das três variáveis primárias explicativas (X_1 , X_2 e X_3) sobre a variável principal, ou seja:

$$R_{0.123}^2 = \hat{p}_{01}^2 + \hat{p}_{02}^2 + \dots + 2\hat{p}_{02}\hat{p}_{03}r_{23}$$

Também em (2), estima-se o efeito da variável residual sobre a variável principal, dado por:

$$\hat{p}_\varepsilon = \sqrt{1 - R_{0.123}^2}$$

Em (3) é apresentada a decomposição das correlações r_{0i} em efeitos diretos de x_i sobre a variável principal, expresso por \hat{p}_{0i} , e os efeitos indiretos de x_i via x_j , expresso por $\hat{p}_{0i}r_{ij}$.

Para avaliação dos efeitos diretos e indiretos dos caracteres secundários sobre cada caráter primário foi adotado o modelo apropriado e os sistemas de equações derivado para cada variável explicativa. O estudo dos efeitos dos componentes secundários sobre a variável principal PROD foi realizado por meio dos desdobramentos da correlação entre a variável principal e as variáveis secundárias. Detalhes sobre estes desdobramentos são apresentados por Cruz et al. (2004).

Os dados obtidos referentes aos caracteres morfológicos e a produtividade de grãos foram submetidos à análise de variância com a significância dos efeitos verificada pelo teste F, a 5% de probabilidade. A acurácia seletiva (\hat{r}_{gg}), determinada por meio da expressão: $\hat{r}_{gg} = (1-1/F)^{1/2}$, em que F é o valor do teste F de Snedecor para o efeito de genótipo (Resende & Duarte, 2007), foi estimada para aferir a precisão experimental. As análises de variância foram realizadas no pacote estatístico SAS (Statistical Analysis System) (Sas, 2008). As correlações genotípicas e análise de trilha foram realizadas utilizando-se o software GENES (Cruz, 2006).

Resultados e Discussão

Todas as características estudadas apresentaram diferenças significativas entre genótipos ($p \leq 0,05$) (Tabela 1). As estimativas de acurácia foram de alta magnitude ($65 < \hat{r}_{gg} < 90$) para todas as variáveis em questão, indicando boa precisão experimental. O uso da acurácia, como medida de precisão experimental, sugerido por Resende & Duarte (2007), tem a vantagem de não depender da magnitude da média, o que proporciona maior segurança na utilização da expressão fenotípica como indicador da variação genotípica. Valores de acurácia acima de 70% indicam uma alta precisão experimental.

A média da análise conjunta para produção de grãos foi de 21,70 sc ha⁻¹. A herdabilidade observada para o caráter foi baixa ($h^2=45\%$). A baixa média registrada para produção já era esperada, devido à alta variabilidade genética presente entre os acessos, com variações de 2,70 até 63,80 sc ha⁻¹. Já os valores obtidos para herdabilidade são aceitáveis. Valores para este parâmetro acima de 70% são encontrados em experimentos com cafeeiros em gerações mais avançadas, ou mesmo, em ensaios de valor de cultivo e uso (Carvalho et al., 1988).

Com relação aos caracteres morfológicos, a média observada para vigor vegetativo pode ser considerada alta (7,86), o que evidencia, no geral, que as plantas sob avaliação apresentavam boas condições vegetativas. Quanto à herdabilidade, o caráter altura de planta foi o que apresentou maior valor (75%), o que mostra que, para essa característica, é possível obter maiores ganhos genéticos com a seleção (Tabela 1).

As estimativas de correlações genotípicas (r_g) entre as oito variáveis encontram-se na Tabela 2. As maiores correlações foram observadas entre a produção de grãos e comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (0,99), vigor vegetativo (0,98), largura do quarto par de folhas (0,78) e número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (0,75), o que indica que plantas de maior vigor aos

12 meses de idade e que apresentam o primeiro ramo plagiotrópico longo e com grande número de nós tendem a ser mais produtivas. O vigor vegetativo também apresentou alta correlação com número de pares de ramos plagiotrópicos (0,94), comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (0,90) e número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (0,84). Freitas et al. (2007), sem a avaliação direta da produção de grãos e baseando-se apenas na capacidade fotossintética, constataram que a seleção precoce no comprimento de ramos plagiotrópicos aos 12 meses de idade, pode ser utilizada para identificação de genótipos superiores.

Resultados semelhantes de estimativas de correlação foram encontrados por Severino et al. (2002) entre vigor vegetativo e produção de grãos (0,90), em dados acumulados durante os três primeiros anos de produção. Percebe-se que o comprimento do primeiro ramo plagiotrópico e o vigor vegetativo em plantas ainda em fase juvenil têm alta relação com a produção de grãos na fase adulta. Esses resultados sugerem que a seleção precoce pode ser utilizada na identificação de genótipos com alto potencial produtivo e, ainda, auxiliar o melhorista nas tomadas de decisão em etapas iniciais dos programas de melhoramento.

Analisando as correlações por meio do diagrama causal em cadeia, todas as três variáveis primárias NP(RP), COMP(1°RP) e NN(1°RP) apresentaram coeficientes de correlação acima de 0,65 com a variável PROD (Tabela 3). Já entre os componentes primários e secundários, depreende-se que as variáveis secundárias (VIGOR e ALT) apresentaram alta correlação genotípica com as variáveis primárias, sendo que a variável VIGOR obteve correlação acima de 0,83 com todas as variáveis primárias (Tabela 4). Para a variável ALT, foi observada alta correlação apenas com o caráter COMP(1°RP). Esse resultado é semelhante ao encontrado por Carvalho et al. (2010) que observaram, em plantas já em fase de produção, uma alta correlação entre altura da planta e comprimento dos ramos plagiotrópicos (0,92). É interessante ressaltar que, para

o caráter altura de planta, os programas de melhoramento têm preconizado plantas de porte médio, devido às práticas culturais atualmente utilizadas, como plantios adensados e colheita mecanizada (Androcioli Filho, 2002).

Algumas variáveis, apesar de terem alta associação com a variável principal, podem não ser a causa determinante das variações sobre o caráter de interesse. Nessas situações, a concentração de esforços na seleção desta variável poderá não resultar em ganhos satisfatórios na variável principal (Cruz et al., 2004). Diante do exposto, para um melhor entendimento da inter-relação entre os caracteres, realizou-se o desdobramento dos coeficientes de correlação (análise de trilha) com o objetivo de fornecer uma medida da influência de cada causa e seu efeito. Os desdobramentos foram realizados em conformidade com o diagrama causal em cadeia (Figura 1).

As magnitudes e os sinais dos efeitos diretos e indiretos das variáveis primárias NP(RP), COMP(1°RP) e NN(1°RP) sobre a variável principal PROD, encontram-se na Tabela 3. Ao verificar os efeitos diretos e indiretos por meio das vias de associação, é possível visualizar que apenas a variável COMP(1°RP) teve efeito direto de elevada magnitude (0,74). As variáveis NP(RP) e NN(1°RP) mostraram pequeno efeito direto com PROD, atuando de forma indireta, com valores expressivos, via COMP(1°RP). Isso mostra que, apesar de todas apresentarem alta correlação com a produção de grãos (Tabela 2), apenas a variável COMP(1°RP) possui efeito direto considerável sobre esta. Assim, no processo de seleção precoce, o comprimento do primeiro ramo plagiotrópico aos 12 meses de idade pode ser utilizado pelo melhorista na identificação de genótipos promissores.

Situações contrárias podem acontecer, como as observadas por Carvalho et al. (2010), em que foram observados baixos valores de correlações entre as variáveis número e comprimento de ramos plagiotrópicos com a produtividade de grãos. Nesse caso, seria interessante o emprego da análise de trilha para

verificar as relações de causa e efeito desses caracteres, já que, biologicamente, esses componentes estão muito relacionados com a produção de grãos (Cruz et al., 2004).

O coeficiente de determinação do modelo da análise de trilha, em questão, foi elevado ($R^2=0,88$), o que mostra que as variações da variável principal são totalmente explicadas por esse esquema causal (Tabela 3). É válido ressaltar que, em determinadas situações, valores maiores que o valor absoluto 1 podem ocorrer em consequência do modelo utilizado na estimação das variâncias e das covariâncias, que determinam a correlação (Cruz & Carneiro, 2004). Por meio da matriz de correlação entre as variáveis primárias e principal, registrou-se um diagnóstico de multicolinearidade fraca ($NC=23,12$), o que não denota problemas nas análises. Na presença de multicolinearidade, as variâncias associadas aos estimadores dos coeficientes de trilha podem atingir valores excessivamente altos, tornando-os pouco confiáveis. Além disso, as estimativas dos parâmetros podem assumir valores absurdos ou sem nenhuma coerência com o fenômeno biológico estudado (Cruz & Carneiro, 2004; Rodrigues et al., 2010).

Na Tabela 4 são apresentados os desdobramentos das correlações, expressas pelas estimativas dos efeitos diretos e indiretos das quatro variáveis secundárias sobre as três variáveis primárias, conforme o diagrama causal em cadeia mostrado na Figura 1. Por meio das vias de associação, em que é possível analisar os efeitos diretos e indiretos, verificou-se que o caráter VIGOR teve alta magnitude de efeitos diretos sobre as três variáveis primárias, com valores acima de 0,51, chegando a 0,90 sobre o caráter NP(RP). A variável secundária ALT demonstrou um efeito direto elevado com a variável COMP(1°RP). Já os caracteres COMP(4°PF) e LARG(4°PF) apresentaram baixa correlação com NP(RP) e NN(1°RP), porém, seus efeitos indiretos, via VIGOR, superaram a magnitude dos seus respectivos efeitos residuais (Tabela 4). A variável COMP(4°PF) foi a que apresentou o maior efeito direto negativo, atuando no

sentido desfavorável sobre a variável NN(1°RP) (-0,33). Os coeficientes de determinação (R^2) da análise de trilha, neste caso, foram maiores que 0,70, podendo-se inferir que o modelo causal explicou bem as variações encontradas para as três variáveis primárias. O número de condição (NC) encontrado foi 42,01, demonstrando multicolinearidade fraca entre as variáveis.

Nas análises do efeito total, apresentado na Tabela 5, pode-se concluir que, dentre os caracteres secundários, o VIGOR foi o que apresentou maior relação com PROD, com um efeito direto total de elevada magnitude (0,57). Verifica-se também que a influência deste caráter sobre os componentes primários foi diferenciada em relação a NP(RP) e COMP(1°RP). A variável LARG(4°PF) também apresentou um efeito indireto via VIGOR (0,37) considerável, o que ressalta a importância da variável VIGOR sobre a variável principal. Severino et al. (2002) também detectaram, além da alta correlação, um grande efeito direto positivo entre o vigor vegetativo e a produção de grãos. Esse fato explica porque o vigor vegetativo está entre as características mais utilizadas para estimação da capacidade produtiva de cafeeiros (Fazuoli, 1977; Silvarolla et al., 1997).

Por meio das variáveis secundárias, pode-se ressaltar que ganhos indiretos, via resposta correlacionada por seleção em VIGOR, serão efetivos. Este caráter tem como vantagem adicional ter efeito direto positivo sobre COMP(1°RP), que também é, dentre os componentes primários, o de maior efeito direto sobre a produção de grãos.

Comparando os resultados obtidos entre as estimativas de correlação genotípica e as estimativas do coeficiente de trilha, percebe-se que, após os desdobramentos da correlação em efeitos diretos e indiretos, é possível identificar quais são as variáveis que exercem maior influência sobre o caráter em questão. E ainda, considerando a utilização da seleção precoce, isso torna o

processo mais dinâmico e eficiente, concentrando esforços naquelas variáveis que proporcionarão maiores ganhos com a seleção indireta.

Conclusões

1 - O principal responsável pela variação na produção de grãos é o comprimento do primeiro ramo plagiotrópico, aos 12 meses de idade, visto que apresenta o maior efeito direto no sentido favorável sobre a produção de grãos.

2 - A variável secundária vigor vegetativo é a que apresenta maior importância na explicação das variações encontradas na produção de grãos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a EPAMIG e à UFLA pela disponibilização da infraestrutura e equipamentos, e as agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo auxílio financeiro.

Referências Bibliográficas

- ANDROCIOLO FILHO, A. **Café Adensado: Espaçamentos e cuidados no manejo da lavoura.** (Circular, 121), Londrina: IAPAR, 2002. 32p.
- BELSLEY, D. A.; KUH, E.; WELSCH, R. E. **Regression diagnostics: identifying influential data and sources of collinearity.** New York: Wiley, 1980. 292p.
- CARVALHO, A.; FAZUOLI, L. C.; MAZZAFERA, P. Produtividade de progênies derivadas de hibridação dos cultivares Laurina e Mundo Novo. **Bragantia**, v.47, n.2, p.213-222, 1988.
- CARVALHO, A. M. D.; MENDES, A. N. G.; CARVALHO, G. R.; BOTELHO, C. E.; GONÇALVES, F. M. A.; FERREIRA, A. D. Correlação entre crescimento e produtividade de cultivares de café em diferentes regiões de Minas Gerais, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.3, p.269-275, 2010.
- CRUZ, C. D. **Programa Genes: Estatística experimental e matrizes.** Viçosa: Editora UFV, 2006. 285p.
- CRUZ, C. D. & CARNEIRO, P. C. S. Multicolinearidade. In: CRUZ, C. D. & CARNEIRO, P. C. S. (Ed.). **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento.** Viçosa: UFV, 2004. p.293-347.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. Análise de Trilha. In: CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. (Ed.). **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento.** Viçosa: UFV, 2004. p.180-193.
- DAHER, R. F.; PEREIRA, A. V.; PEREIRA, M. G.; LÉDO, F. J. D. S.; AMARAL JUNIOR, A. T. D.; ROCA BADO, J. M. A.; FERREIRA, C. F.; TARDIN, F. D. Análise de trilha de caracteres forrageiros do capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.). **Ciência Rural**, v.34, n.5, p.1531-1535, 2004.
- DUNTEMAN, G. H. **Introduction to multivariate analysis.** Bervely Hills: Sage Publications, 1984. 237p.
- FAZUOLI, L. C. **Avaliação de progênies de café Mundo Novo (*Coffea arabica* L.).** 1977. 146p. Tese (Doutorado). ESALQ, Piracicaba-MG.

FREITAS, Z. M. T. S.; OLIVEIRA, F. J.; CARVALHO, S. P.; SANTOS, V. F.; SANTOS, J. P. D. O. Avaliação de caracteres quantitativos relacionados com o crescimento vegetativo entre cultivares de café arábica de porte baixo. **Bragantia**, v.66, n.2, p.267-275, 2007.

GUIMARÃES, P. T. G.; GARCIA, A. W. R.; ALVAREZ V., V. H.; PREZOTTI, L. C.; VIANA, A. S.; MIGUEL, A. E.; MALAVOLTA, E.; CORRÊA, J. B.; LOPES, A. S.; NOGUEIRA, F. D.; MONTEIRO, A. V. C.; OLIVEIRA, J. A. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p.289-302.

HOERL, A. E. & KENNARD, R. W. Ridge regression: applications to nonorthogonal problems. **Technometrics**, v.12, n.1, p.55-68, 1970.

MARTINEZ, H. E. P.; AUGUSTO, H. S.; CRUZ, C. D.; PEDROSA, A. W.; SAMPAIO, N. F. Crescimento vegetativo de cultivares de café (*Coffea arabica* L.) e sua correlação com a produção em espaçamentos adensados. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.29, n.4, p.481-489, 2007.

MODE, J. C. & ROBINSON, H. F. Pleiotropism and the genetic variance and covariance. **Biometrics**, v.15, n.4, p.518-537, 1959.

MONTGOMERY, D. C. & PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1981. 504p.

NILES, H. E. Correlation, causation and Wright's theory of "path coefficients". **Genetics**, v.7, n.3, p.258-273, 1922.

RESENDE, M. D. V. & DUARTE, J. B. Precisão e controle de qualidade em experimentos de avaliação de cultivares. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, n.3, p.182-194, 2007.

RODRIGUES, G. B.; MARIM, B. G.; SILVA, D. J. H. D.; MATTEDI, A. P.; ALMEIDA, V. D. S. Análise de trilha de componentes de produção primários e secundários em tomateiro do grupo Salada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.2, p.155-162, 2010.

SAS. **SAS/STAT® 9.2 User's Guide**. Version 9.2, Cary, NC: SAS Institute Inc., 2008. 584p.

SEVERINO, L. S.; SAKIYAMA, N. S.; PEREIRA, A. A.; MIRANDA, G. V.; ZAMBOLIM, L.; BARROS, U. V. Associações da produtividade com outras características agronômicas de café (*Coffea arabica* L. “Catimor”). **Acta Scientiarum Agronomy**, v.24, n.5, p.1467-1471, 2002.

SILVAROLLA, M. B.; GUERREIRO FILHO, O.; LIMA, M. M. A. D.; FAZUOLI, L. C. Avaliação de progênies derivadas do híbrido de timor com resistência ao agente da ferrugem. **Bragantia**, v.56, n.1, p.47-58, 1997.

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

WALYARO, D. J. & VOSSSEN, H. A. M. Early determination of yield potential in arabica coffee by applying index selection. **Euphytica**, v.28, n.2, p.465-472, 1979.

WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, v.20, n.7, p.557-585, 1921.

Tabela 1. Resumo da análise de variância dos oito caracteres agrônomico e morfológicos de *Coffea arabica* L. Patrocínio - MG, 2010.

FV	GL	Quadrado médio [#]							
		PROD ¹	VIGOR	ALT	NP(RP)	COMP (1°RP)	NN (1°RP)	COMP (4°PF)	LARG (4°PF)
Blocos	1	147,76	0,22	88,27	80,11	3,28	175,99	3,76	0,21
Genótipos	268	131,97**	1,63**	419,35**	33,68**	6,76**	200,10**	8,68**	3,43**
Resíduo	268	71,43	0,66	103,09	12,28	2,57	82,15	3,03	1,56
Média		21,71	7,86	72,97	11,32	47,73	13,96	12,17	5,67
\hat{r}_{gg}^2 (%)		67,74	76,97	86,84	79,71	78,73	76,77	80,67	73,83
h^2		45,88	59,25	75,42	61,99	58,94	65,08	54,52	55,66

** Significativo a 1% probabilidade pelo teste F. ¹Análise conjunta das safras 2008/2009 e 2009/2010.

[#]PROD: produção de grãos (sc ha⁻¹); VIGOR: vigor vegetativo (nota de 1-10); ALT: altura da planta (cm); NP(RP): número de pares de ramos plagiotrópicos (unid); COMP(1°RP): comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (cm); NN(1°PF): número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (unid); COMP(4°PF): comprimento do quarto par de folhas (cm); LARG(4°PF): largura do quarto par de folhas (cm).

Tabela 2. Estimativa dos coeficientes de correlação genotípica entre oito caracteres agrônomo e morfológicos de *Coffea arabica* L. Patrocínio - MG, 2010.

Variáveis [#]	PROD	VIGOR	ALT	NP(RP)	COMP (1°RP)	NN (1°RP)	COMP (4°PF)	LARG (4°PF)
PROD	1,00	0,98	0,73	0,69	0,99	0,75	0,63	0,78
VIGOR		1,00	0,54	0,94	0,90	0,84	0,49	0,65
ALT			1,00	0,44	0,86	0,39	0,46	0,38
NP(RP)				1,00	0,71	0,88	0,23	0,39
COMP(1°RP)					1,00	0,71	0,55	0,61
NN(1°RP)						1,00	0,11	0,34
COMP(4°PF)							1,00	0,88
LARG(4°PF)								1,00

[#]PROD: produção de grãos (sc ha⁻¹); VIGOR: vigor vegetativo (nota de 1-10); ALT: altura da planta (cm); NP(RP): número de pares de ramos plagiotrópicos (unid); COMP(1°RP): comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (cm); NN(1°PF): número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (unid); COMP(4°PF): comprimento do quarto par de folhas (cm); LARG(4°PF): largura do quarto par de folhas (cm).

Tabela 3. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos das três variáveis primárias sobre a variável principal produção de grãos. Patrocínio - MG, 2010.

Variáveis primárias [#]	Vias de associação	Coeficiente de trilha		Coeficiente de correlação (r_g)
		Efeito direto	Efeito indireto	
NP(RP)	Efeito direto sobre PROD	-0,02		
	Efeito indireto via COMP(1°RP)		0,53	
	Efeito indireto via NN(1°RP)		0,18	
	TOTAL			0,69
COMP(1°RP)	Efeito direto sobre PROD	0,74		
	Efeito indireto via NP(RP)		-0,01	
	Efeito indireto via NN(1°RP)		0,15	
	TOTAL			0,99
NN(1°RP)	Efeito direto sobre PROD	0,21		
	Efeito indireto via NP(RP)		-0,02	
	Efeito indireto via COMP(1°RP)		0,53	
	TOTAL			0,75
Determinação (R^2)	0,88			
Efeito residual	0,35			

[#]PROD: produção de grãos (sc ha⁻¹); NP(RP): número de pares de ramos plagiotrópicos (unid); COMP(1°RP): comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (cm); NN(1°RP): número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (unid); de folhas (cm). r_g = correlação genotípica.

Tabela 4. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos das quatro variáveis secundárias sobre três variáveis primárias. Patrocínio - MG, 2010.

Variáveis secundárias [#]	Vias de associação	Variáveis primárias [#]		
		NP(RP)	COMP(1°RP)	NN(1°RP)
VIGOR	Efeito direto	0,90	0,51	0,79
	Efeito indireto ALT	0,02	0,26	0,04
	Efeito indireto COMP(4°PF)	-0,07	0,01	-0,16
	Efeito indireto LARG(4°PF)	-0,05	0,05	0,05
	TOTAL(r_g)	0,94	0,90	0,84
ALT	Efeito direto	0,04	0,48	0,07
	Efeito indireto VIGOR	0,49	0,28	0,43
	Efeito indireto COMP(4°PF)	-0,07	0,01	-0,15
	Efeito indireto LARG(4°PF)	-0,03	0,03	0,03
	TOTAL(r_g)	0,44	0,86	0,39
COMP(4°PF)	Efeito direto	-0,14	0,01	-0,33
	Efeito indireto VIGOR	0,44	0,25	0,39
	Efeito indireto ALT	0,02	0,22	0,03
	Efeito indireto LARG(4°PF)	-0,06	0,07	0,07
	TOTAL(r_g)	0,23	0,55	0,11
LARG(4°PF)	Efeito direto	-0,07	0,07	0,07
	Efeito indireto VIGOR	0,59	0,33	0,52
	Efeito indireto ALT	0,02	0,18	0,03
	Efeito indireto COMP(4°PF)	-0,13	0,01	-0,29
	TOTAL(r_g)	0,39	0,61	0,34
Determinação (R ²)		0,80	0,92	0,71
Efeito Residual		0,43	0,28	0,41

[#] NP(RP): número de pares de ramos plagiotrópicos (unid); COMP(1°RP): comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (cm); NN(1°RP): número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (unid); VIGOR: vigor vegetativo (nota de 1-10); ALT: altura da planta (cm); COMP(4°PF): comprimento do quarto par de folhas (cm); LARG(4°PF): largura do quarto par de folhas (cm). r_g = correlação genotípica.

Tabela 5. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos das quatro variáveis secundárias sobre as variáveis secundárias e a variável principal produção de grãos. Patrocínio - MG, 2010.

Variáveis secundárias [#]	Vias de associação	Variáveis primárias [#]			Efeito Residual	Efeito Total PROD
		NP(RP)	COMP(1°RP)	NN(1°RP)		
VIGOR	Efeito direto	-0,02	0,38	0,16	0,04	0,57
	Efeito indireto ALT	0,00	0,19	0,01	-0,05	0,15
	Efeito indireto COMP(4°PF)	0,00	0,00	-0,03	0,02	-0,01
	Efeito indireto LARG(4°PF)	0,00	0,04	0,01	0,13	0,18
	TOTAL	-0,02	0,67	0,17	0,15	0,98
ALT	Efeito direto	0,00	0,36	0,02	-0,09	0,28
	Efeito indireto VIGOR	-0,01	0,21	0,09	0,02	0,31
	Efeito indireto COMP(4°PF)	0,00	0,00	-0,03	0,02	-0,01
	Efeito indireto LARG(4°PF)	0,00	0,02	0,01	0,08	0,11
	TOTAL	-0,01	0,64	0,08	0,02	0,73
COMP(4°PF)	Efeito direto	0,00	0,01	-0,07	0,03	-0,02
	Efeito indireto VIGOR	-0,01	0,19	0,08	0,02	0,28
	Efeito indireto ALT	0,00	0,16	0,01	-0,04	0,13
	Efeito indireto LARG(4°PF)	0,00	0,05	0,01	0,18	0,25
	TOTAL	0,00	0,41	0,02	0,20	0,63
LARG(4°PF)	Efeito direto	0,00	0,06	0,02	0,21	0,28
	Efeito indireto VIGOR	-0,01	0,25	0,11	0,03	0,37
	Efeito indireto ALT	0,00	0,14	0,01	-0,03	0,11
	Efeito indireto COMP(4°PF)	0,00	0,01	-0,06	0,03	-0,02
	TOTAL	-0,01	0,45	0,07	0,26	0,78

[#]PROD: produção de grãos (sc ha⁻¹); NP(RP): número de pares de ramos plagiotrópicos (unid); COMP(1°RP): comprimento do primeiro ramo plagiotrópico (cm); NN(1°PF): número de nós do primeiro ramo plagiotrópico (unid); VIGOR: vigor vegetativo (nota de 1-10); ALT: altura da planta (cm); COMP(4°PF): comprimento do quarto par de folhas (cm); LARG(4°PF): largura do quarto par de folhas (cm).