

VINÍCIUS LIMA TEIXEIRA

**SELEÇÃO DE GENÓTIPOS DE EUCALIPTO PARA PRODUÇÃO  
DE CARVÃO VEGETAL UTILIZANDO ANÁLISE MULTIVARIADA  
E REDES NEURAIS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

T266s  
2018  
Teixeira, Vinícius Lima, 1992-  
Seleção de genótipos de eucalipto para produção de carvão  
vegetal utilizando análise multivariada e redes neurais / Vinícius  
Lima Teixeira. – Viçosa, MG, 2018.  
xii, 82 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 69-78.

1. Eucalipto - Seleção. 2. Análise por agrupamento.  
3. Análise multivariada. 4. Redes neurais. 5. Carvão vegetal.  
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Florestal. Programa Pós-Graduação em Ciência Florestal.  
II. Título.

CDO adapt. CDD 22.ed. 634.916562

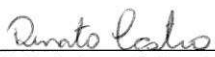
VINÍCIUS LIMA TEIXEIRA

**SELEÇÃO DE GENÓTIPOS DE EUCALIPTO PARA PRODUÇÃO  
DE CARVÃO VEGETAL UTILIZANDO ANÁLISE MULTIVARIADA  
E REDES NEURAIS**

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

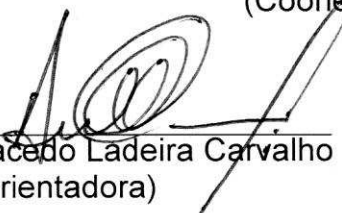
APROVADA: 20 de agosto de 2018.

  
Benedito Rocha Vital

  
Renato Vinícius Oliveira Castro

  
Angélica de Cassia Oliveira Carneiro  
(Coorientadora)

  
Hélio Garcia Leite  
(Coorientador)

  
Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho  
(Orientadora)

“Na verdade vos digo: se alguém disser a este monte: ‘Saí daqui, lança-te ao mar’, sem duvidar em seu coração, mas crendo que se cumprirá sua palavra, ele o obterá. Por isso vos digo: tudo o que pedirdes na oração, crede que já o recebestes, e vos será concedido”

Marcos 11: 23-24

## AGRADECIMENTOS

A Deus e a Mãe Nossa Senhora Aparecida, por me proteger e guiar durante todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, José da Costa Teixeira e Maria das Graças Lima Teixeira, pelo amor incondicional, compreensão, apoio e ensinamentos em todos os dias da minha vida.

À minha namorada Lorena, pelo amor, amizade e força ao longo desses anos.

Aos meus irmãos e toda minha família por todo incentivo e ajuda.

Aos professores Ana Márcia, Hélio, Cassinha e Benedito, pela orientação, confiança, amizade e paciência.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal pela formação.

A todos os professores, funcionários e amigos do laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) pelas contribuições no experimento e amizade.

À Fernanda, Stephanie, Illgner e Lucas da UFRN, pela ajuda na determinação da relação cerne/alburno.

Ao professor Rafael Tassinari, pelo apoio no desenvolvimento da metodologia de pré-seleção de genótipos.

Aos estagiários Isabela, Flávia, Karol, Érica, Daniel e Evanderson, pela grande ajuda ao longo do experimento.

Ao meu amigo Alexandre e ao professor Cosme, por toda contribuição com as análises estatísticas.

À Maíra e ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras – UFLA, pela realização das análises termogravimétrica e elementar.

À Gerda Florestal, pela disponibilização do material e financiamento do projeto, especialmente ao Francisco Gomes pela ajuda.

Ao PNUD pelo apoio financeiro ao projeto.

À CAPES, pela concessão da bolsa de pesquisa.

Aos amigos Rodrigo e Sassá, por todo companheirismo.

## BIOGRAFIA

Vinícius Lima Teixeira, filho de José da Costa Teixeira e Maria das Graças Lima Teixeira, nasceu em 05 de fevereiro de 1992, na cidade de Timóteo, Minas Gerais, onde cursou o ensino fundamental e médio.

No ano de 2010, ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, diplomando-se em julho de 2016.

Durante a graduação desenvolveu pesquisas como estagiário no Laboratório de Semioquímicos do Departamento de Entomologia, no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira e Laboratório de Patologia Florestal. Também foi estagiário do setor de reflorestamento da Empresa Archer Daniels Midland do Brasil, na cidade de Rondonópolis, estado de Mato Grosso, de fevereiro a julho de 2016.

Em agosto de 2016 ingressou no programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, em nível de Mestrado na Universidade Federal de Viçosa. E em agosto de 2018 submeteu-se à defesa de dissertação para obtenção do título de *Magister Scientiae*

## CONTEÚDO

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1. Seleção de genótipos de eucalipto para produção de carvão vegetal.....	4
3.2. Qualidade da madeira para produção de carvão vegetal .....	5
3.3. Índices de seleção .....	10
3.4. Estatística multivariada .....	11
3.4.1. Análises de agrupamento .....	11
3.4.2. Método de Tocher .....	16
3.5. Redes neurais artificiais.....	17
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1. Propriedades da madeira dos genótipos de eucalipto.....	27
4.1.1. Relação cerne/alburno .....	27
4.1.2. Densidade básica da madeira .....	27
4.1.3. Massa seca de madeira .....	28
4.2. Pré-seleção dos genótipos de eucalipto .....	28
4.3. Propriedades da madeira dos genótipos pré-selecionados.....	30
4.3.1. Poder calorífico superior (PCS).....	30
4.3.2. Composição química imediata .....	30
4.3.3. Composição química estrutural .....	31
4.3.4. Composição química elementar .....	31
4.3.5. Análise termogravimétrica (TGA e DTG).....	32
4.3.6. Análise morfológica de fibras e poros.....	32
4.4. Carbonização da madeira.....	33

4.5. Propriedades do carvão vegetal .....	34
4.5.1. Densidade relativa aparente .....	34
4.5.2. Poder calorífico superior (PCS).....	34
4.5.3. Composição química imediata .....	34
4.5.4. Friabilidade .....	34
4.6. Análises estatísticas referentes aos genótipos pré-selecionados .....	34
4.6.1. Análises de agrupamento.....	35
4.6.2. Método de otimização de Tocher .....	35
4.6.3. Método da ligação média entre grupos (UPGMA) .....	36
4.6.4. Redes neurais de Kohonen.....	36
4.6.5. Fluxograma da análise dos dados do experimento .....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1. Pré-seleção dos genótipos .....	38
5.2. Análise descritiva e grau de associação das variáveis da madeira e do carvão vegetal .....	43
5.3. Análises de agrupamento .....	54
5.3.1. Método de Tocher e método da ligação média entre grupos (UPGMA) .....	54
5.3.2. Redes neurais de Kohonen.....	57
5.3.3. Comparações entre grupos .....	61
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	67
7. CONCLUSÃO .....	68
8. REFERÊNCIAS.....	69



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Informações dos genótipos utilizados no estudo .....	25
Tabela 2. Informações sobre os valores fenotípicos e genotípicos dos parâmetros da madeira em função dos genótipos de eucalipto.....	39
Tabela 3. Ranking dos genótipos para cada variável utilizada na pré-seleção	40
Tabela 4. Classes de genótipos formadas a partir da classificação pela mediana .....	41
Tabela 5. Classificação dos genótipos obtida por meio do índice de seleção de Mulamba e Mock.....	41
Tabela 6. Genótipos pré-selecionados .....	42
Tabela 7. Valores médios de densidade básica, volume, massa seca e relação cerne/alburno do total de genótipos e daqueles que foram pré-selecionados .	43
Tabela 8. Análise descritiva das propriedades da madeira e carvão vegetal...	44
Tabela 9. Correlação entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal dos genótipos de eucalipto.....	45
Tabela 10. Agrupamento dos dezesseis genótipos de eucalipto pelo método de Tocher, utilizando a distância de Mahalanobis, obtida por meio das variáveis padronizadas da madeira e carvão vegetal.....	55
Tabela 11. Agrupamento dos dezesseis genótipos de eucalipto, obtido pela rede neural de Kohonen, utilizando a distância euclidiana como medida de dissimilaridade .....	58
Tabela 12. Valores médios das propriedades da madeira e carvão vegetal para os grupos formados por meio dos métodos de Tocher e UPGMA.....	62
Tabela 13. Valores médios das propriedades da madeira e carvão vegetal para os grupos formados por meio da rede neural de Kohonen .....	62

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura química dos monômeros precursores primários da lignina.	8
Figura 2. Dendrograma horizontal (VICINI; SOUZA, 2005).	14
Figura 3. Dendrograma vertical (VICINI; SOUZA, 2005).	15
Figura 4. Sistema de um neurônio biológico. Haykin (1994) citado por Benite (2003).	18
Figura 5. Representação de neurônios artificiais (HAYKIN, 2001).	19
Figura 6. Principais funções de ativação (HAYKIN, 2001).	19
Figura 7. Esquema de uma rede de neural genérica. Adaptado de Zeel et al. (2001) citado por Benite (2003).	20
Figura 8. Esquema de um SOM. Adaptado de Kind e Brunner (2014).	22
Figura 9. Precipitação e temperaturas médias mensais da região de Três Marias/MG. (CLIMATE-DATA, 2018).	26
Figura 10. Fluxograma dos procedimentos de pré-seleção e seleção dos genótipos	37
Figura 11. Dendrograma obtido pelo método UPGMA, utilizando a distância de Mahalanobis, obtida por meio das variáveis padronizadas da madeira e carvão vegetal.	56
Figura 12. Genótipos associados a cada neurônio.	57
Figura 13. Matriz de distância entre neurônios (U-matrix), com separação dos grupos mostrados pela linha pontilhada.	58
Figura 14. Peso das variáveis de entrada nos neurônios da rede.	60

## RESUMO

TEIXEIRA, Vinícius Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2018. **Seleção de genótipos de eucalipto para produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada e redes neurais.** Orientadora: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Hélio Garcia Leite.

A seleção de genótipos de *Eucalyptus* adequados para produção de carvão vegetal depende da avaliação das características da madeira e das correlações existentes entre elas. Entretanto, o grande número de variáveis torna a interpretação complexa, sendo necessário utilizar técnicas estatísticas capazes de analisar o conjunto das variáveis que influenciam simultaneamente cada elemento amostral. Associado a isso, o alto custo e tempo requeridos para determinar as propriedades da madeira e do carvão vegetal, torna inviável a caracterização de um grande número de genótipos em um curto espaço de tempo. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia de pré-seleção e indicar genótipos de eucalipto para a produção de carvão vegetal, utilizando estatística multivariada de agrupamento e redes neurais. Utilizaram-se 64 genótipos de *Eucalyptus* provenientes de um banco clonal, para os quais foram determinados a densidade básica, o volume e a massa seca de madeira por hectare, além da relação cerne/alburno. Estes parâmetros foram utilizados no procedimento de pré-seleção, que combinou a classificação pela mediana, rank individual de variáveis e índice de seleção de Mulamba e Mock. Após a pré-seleção, foi feita a determinação das propriedades da madeira e carvão vegetal dos genótipos pré-selecionados, as quais foram utilizadas como variáveis de entrada para análises de agrupamentos pelos métodos de Tocher, ligação média entre grupos (UPGMA) e rede neural de Kohonen. Observou-se que a metodologia de pré-classificação foi eficiente, permitindo a escolha de 16 genótipos com valores desejáveis para as quatro características utilizadas na pré-seleção. De modo geral, as propriedades da madeira e carvão vegetal dos genótipos pré-selecionados foram consideradas satisfatórias para o uso siderúrgico. Os três métodos de agrupamento foram eficazes para resolução do problema de classificação dos genótipos. A aplicação do método de otimização de Tocher foi mais prática, pois observou-se o número ótimo de grupos sem a

necessidade da intervenção do pesquisador, além da conformação dos grupos ter sido semelhante a verificada por meio do método UPGMA. Por meio da rede de Kohonen observaram-se grupos com conformações diferentes e mais heterogêneos, porém concluiu-se de maneira semelhante as demais técnicas quanto a indicação dos genótipos superiores. Uma desvantagem desse método é a maior necessidade de conhecimento em técnicas de inteligência computacional, porém há a vantagem de possibilitar a verificação dos pesos individuais de cada variável na formação dos grupos. Por meio do estudo dos valores médios das características da madeira e do carvão de cada grupo, concluiu-se que os genótipos de números 1954, 1453, 1923 e 4296 são os mais indicados para produção de carvão vegetal de acordo com as técnicas de análise utilizadas.

## ABSTRACT

TEIXEIRA, Vinícius Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2018. **Selection of eucalyptus genotypes for charcoal production using multivariate analysis and neural networks**. Advisor: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Co-advisors: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Hélio Garcia Leite.

The selection of suitable *Eucalyptus* genotypes for production of charcoal depends on evaluation of wood characteristics and the correlations between them. However, the large number of variables makes the interpretation more complex, being necessary use statistical techniques capable of analyzing the set of variables which influence simultaneously each sample element. Besides that, the high cost and time required to determine the properties of wood and charcoal, makes it unfeasible to characterize a large number of genotypes in a short time, with a limited budget. In view of the above, the objective of this work was develop a pre-selection methodology and indicate eucalyptus genotypes for charcoal production, using multivariate clustering statistics and neural networks. We used 64 genotypes of *Eucalyptus* from a clonal bank, for which the basic density, volume and wood dry mass per hectare were determined, as well as the heartwood/sapwood ratio. These parameters were used in the pre-selection procedure, which combined the classification by median, individual rank of variables and selection index of Mulamba and Mock. After pre-selection, the wood and charcoal properties of pre-selected genotypes were determined, which were used as input variables for cluster analysis by Tocher methods, unweighted pair group method with arithmetic mean (UPGMA) and Kohonen neural network. It was observed that pre-classification methodology was efficient, allowing the selection of 16 genotypes with desirable values for the four characteristics used in the pre-selection. In general, the wood and charcoal properties of pre-selected genotypes were considered satisfactory for steel use. The three methods of clustering were effective to solve the problem of classification of genotypes. The application of Tocher's optimization method was more practical, since the optimal number of groups was observed without intervention of researcher, and the conformation of groups was similar to verified using the UPGMA method. By means of Kohonen network, different and more heterogeneous groups were observed, but it was possible to conclude in a

similar way the other techniques regarding the indication of superior genotypes. A disadvantage of this method is the greater need for knowledge in computational intelligence techniques, but there is the advantage of allowing the verification of individual weights of each variable in formation of groups. By means of study of the average values the characteristics of wood and charcoal for each group, it is concluded that genotypes of numbers 1954, 1453, 1923 and 4296 are the most indicated for charcoal production according to analysis techniques used.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se verificado no Brasil uma desaceleração da expansão das áreas com cultivo de eucalipto, devido principalmente ao aumento dos custos de produção de madeira, ao baixo preço de venda e a crise do setor de siderurgia. Uma maneira de contornar esse cenário é o investimento em práticas de melhoramento florestal (CASTRO et al., 2016), visando a seleção de genótipos mais produtivos e com propriedades da madeira adequadas a uma determinada finalidade. Já existe um grande número de genótipos de eucalipto melhorados para produção de carvão vegetal de qualidade superior, mas é preciso incentivar pesquisas para o aprimoramento contínuo da espécie (CASTRO et al., 2013).

Os programas de melhoramento florestal sempre consideraram os valores fenotípicos de características dendrométricas, como o DAP, altura e volume. Porém, esse procedimento não garante a seleção de genótipos com características tecnológicas adequadas a determinado uso. Desta forma, a determinação das propriedades anatômicas, químicas, físicas e de crescimento, assim como a utilização dos valores genotípicos dessas variáveis, são importantes na seleção de clones superiores (BOTREL et al., 2010).

A variabilidade natural e a complexidade dos componentes estruturais do lenho das árvores influenciam nas suas propriedades físicas, químicas e anatômicas (BURGER; RICHTER, 1991). Por isso, é importante avaliar a interação entre essas características ao selecionar genótipos para uma determinada finalidade. Porém, quando se aumenta o número de variáveis a serem estudadas, a análise por meio da estatística univariada não é satisfatória, visto que, quando um fenômeno depende de muitas variáveis, não basta conhecer informações estatísticas isoladas, mas sim, a totalidade fornecida pelo conjunto das informações e suas relações (VICINI; SOUZA, 2005).

Sendo assim, a análise multivariada, que possui grande aplicação nos casos em que vários fatores exercem influência de maneira ponderada sobre o resultado (MINGOTI, 2005), é uma alternativa ao uso da estatística univariada. Métodos de análise multivariada foram utilizados por autores que buscam agrupar e identificar o potencial de uso de espécies florestais (LOBÃO et al.,

2011), avaliar a qualidade da madeira de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal e estudar correlações entre propriedades da madeira e propriedades do carvão (CASTRO et al., 2013).

Outro desafio das grandes empresas produtoras de carvão vegetal é selecionar dentre centenas de genótipos contidos em seus bancos clonais, aqueles mais adequados para produção de carvão vegetal de melhor qualidade para o uso siderúrgico. Visto que, uma indicação segura passa pela determinação das propriedades dendrométricas, físicas, químicas e anatômicas da madeira, além da caracterização do carvão produzido a partir desses materiais. Essas análises para todos os genótipos acarretaria em grandes dispêndios de tempo e recursos financeiros.

Portanto, uma metodologia de pré-seleção de genótipos com base na densidade básica, volume, massa seca de madeira e relação cerne/alburno, as quais são características de baixo custo, fácil mensuração e com comprovada influência na qualidade do carvão vegetal, é uma boa opção para reduzir a quantidade e indicar com segurança os genótipos de maior potencial para produção desse insumo. Posteriormente, é feita a caracterização completa da madeira e do carvão dos genótipos pré-selecionados e os resultados dessas análises são utilizados como variáveis para realização de métodos de agrupamentos, a fim de identificar os genótipos mais adequados.



## 2. OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo principal utilizar análises multivariadas de agrupamento e redes neurais artificiais para selecionar genótipos de eucalipto para a produção de carvão vegetal.

Os objetivos específicos foram:

- Desenvolver um método de pré-seleção de genótipos de eucalipto com base na densidade básica, relação cerne/alburno, volume e massa seca de madeira;
- Determinar as propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira;
- Determinar o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis;
- Determinar as propriedades físicas, mecânica e químicas do carvão vegetal;
- Determinar as correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal;
- Utilizar o método da ligação média entre grupos ou UPGMA, método de Tocher e redes neurais de Kohonen para agrupar os genótipos baseando-se nas propriedades da madeira e carvão vegetal, além de avaliar a eficiência e adequabilidade dos métodos ao objetivo proposto;
- Indicar os genótipos mais adequados a produção de carvão vegetal para uso siderúrgico.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. Seleção de genótipos de eucalipto para produção de carvão vegetal**

Segundo ASSIS et al. (1996) o melhoramento do eucalipto no Brasil iniciou-se com o pesquisador Dr. Edmundo Navarro de Andrade da ex-Companhia Paulista de Estradas de Ferro, em São Paulo, a partir de 1904. Ele introduziu diversas espécies e procedências de eucalipto no Horto de Jundiaí, buscando identificar as mais adaptadas às condições climáticas brasileiras, para fornecer combustível, madeira para dormentes e postes para ferrovias. Porém, o maior estímulo ao melhoramento de eucalipto no Brasil viria a partir da década de 1960, com a instituição dos incentivos fiscais. O grande volume de plantios iniciados, em diversas regiões do país e para distintas finalidades, impulsionou à adoção de tecnologias mais modernas, entre elas o melhoramento genético. A partir da década de 1980, houve o domínio da técnica de clonagem do eucalipto e as empresas passaram a utilizá-la nos programas de melhoramento, permitindo a perpetuação e multiplicação de boas combinações genéticas.

Uma das etapas de um programa de melhoramento florestal é a seleção de genótipos que apresentem características desejadas. Anteriormente, esses programas não consideravam em sua análise as propriedades da madeira. Eram avaliados apenas o crescimento, forma, adaptabilidade e resistência a pragas e doenças. Porém, atualmente, não se busca apenas a geração de florestas mais produtivas, em termos de volume, mas também incorporar índices de qualidade da madeira, que podem ser entendidos como um conjunto de características inerentes a madeira que indicam sua aptidão a determinado uso, ou conjunto de usos (RODRIGUES et al., 2008).

A partir dessa percepção, vários autores passaram a realizar trabalhos visando obter informações e explicar a influência da qualidade da madeira e do sistema produtivo sobre as características do carvão vegetal. Dentre eles pode-se destacar: Almeida (1983), Oliveira (1988), Vella et al. (1989), Trugilho et al. (2001), Oliveira et al. (2010), Santos et al. (2011a) e Pereira (2012). Variáveis da madeira, tais como idade, percentagem de cerne e alburno, teor de extrativos, teor de lignina total, densidade, poder calorífico superior, teor de cinzas, entre outros, afetam as propriedades do carvão vegetal e devem ser

consideradas na seleção de clones para esse fim (TRUGILHO et al., 2001; CASTRO et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2013).

Nesse sentido, diversos trabalhos, como os de Trugilho et al. (2001), Botrel et al. (2007), Botrel et al. (2010) e Oliveira et al (2010), empregaram métodos estatísticos univariados para determinar as correlações entre as características físicas, anatômicas e energéticas da madeira com as propriedades do carvão vegetal, identificando e indicando os melhores clones de eucalipto para produção de carvão vegetal, servindo de subsídio para os programas de melhoramento genético.

No entanto, uma desvantagem habitual na seleção de genótipos é que raramente o interesse se concentra apenas em uma variável. A medida que cresce o número de variáveis a serem interpretadas, a análise por meio de estatística univariada se torna mais complexa (CASTRO et al., 2013). Também deve-se considerar que as propriedades medidas se correlacionam umas com as outras, além disso, as variações nas propriedades da madeira, observadas em diferentes clones, ocorrem de forma diferenciada, sendo mais informativo uma análise conjunta das mesmas. Assim, a seleção de clones de *Eucalyptus* para geração de bioenergia requer técnicas estatísticas capazes de auxiliar na decisão sobre o melhor material, de modo que, o emprego de métodos multivariados tem grande potencial para ajudar na escolha dos melhores clones (COUTO et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2013).

Ultimamente, alguns autores vêm utilizando diferentes métodos estatísticos multivariados para classificar genótipos superiores por meio de características da madeira, avaliando suas propriedades físicas, químicas e anatômicas, estudando as correlações com as propriedades do carvão, identificando e selecionando os clones de maior potencial para uso energético (CAIXETA et al., 2003; CASTRO et al., 2013; COUTO et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2013).

### **3.2. Qualidade da madeira para produção de carvão vegetal**

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores, o setor de siderurgia e carvão vegetal detém 14% dos 7,84 milhões de hectares de árvores plantadas no Brasil no ano de 2016 (IBÁ, 2017). O plantio de madeira para fins energéticos

no país é historicamente relacionado a demanda de carvão vegetal (SANTOS et al., 2016). Em 2016 foram produzidas 5,5 milhões de toneladas de carvão vegetal (FAO, 2017), sendo que a produção brasileira é voltada para o suprimento do mercado interno, no qual o maior consumidor é o setor de ferro-gusa e aço, com 84,4% do total, seguido pelo setor de ferro-liga que consome 11,6% (AMS, 2016).

D'Avila Filho (2014) e Scherer (2014), fizeram uma projeção da produção de gusa a carvão vegetal para 2020, utilizando um modelo mercadológico que correlaciona o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) com as taxas de crescimento do setor siderúrgico (mercado interno e externo), unidades em implantação, disponibilidade do parque industrial, bem como uso e impacto da sucata na demanda de produção do aço. Os autores estimaram uma elevação da produção de gusa a carvão vegetal, de 7,8 milhões de toneladas em 2013 para 14,8 milhões no cenário mais otimista e 11 milhões de toneladas no cenário mais conservador. O que acarretaria, considerando um consumo específico de carvão vegetal por tonelada de gusa de  $740 \text{ kg t}^{-1}$ , em uma demanda de 11 milhões de toneladas desse insumo no cenário mais otimista e 8 milhões de toneladas no cenário mais conservador (CGEE, 2015).

Porém, a variabilidade natural das árvores, em termos de estrutura física, química e anatômica, principalmente as do gênero *Eucalyptus*, implantado em grandes maciços florestais para atender a demanda de produção de carvão vegetal para siderurgia, implica em variações na qualidade da madeira, refletindo sobre adequabilidade do carvão para esse fim (SANTOS et al., 2011a).

Sendo assim, diversos pesquisadores vêm buscando identificar e entender as propriedades da madeira que tem maior influência sobre a qualidade do carvão vegetal. A principal delas é a densidade básica, que não é importante somente para essa finalidade, mas para diversos usos, pois tem alta correlação com outras propriedades e possui alta herdabilidade (ARANTES et al., 2016).

Para o uso siderúrgico, o ideal é que se utilize madeiras com densidade acima dos  $500 \text{ kg m}^{-3}$ , pois quanto maior a densidade da madeira, maior será a produção em massa, a densidade e resistência mecânica do carvão vegetal,

elevando a capacidade de carga do alto-forno para produção de ferro-gusa (PEREIRA, 2012; CARNEIRO et al., 2016).

A composição química estrutural da madeira também é importante para seleção de genótipos superiores para produção de carvão vegetal. A sua constituição varia entre 40 e 50% de celulose, 20 e 30% de hemiceluloses, 20 a 35% de lignina e 0 a 10% de extrativos. A variação da composição química é maior entre diferentes espécies e, numa extensão mais limitada, dentro da mesma espécie, como resultado de fatores genéticos. Dentro de uma árvore, fatores de crescimento, idade e estresse também afetam a sua composição química (BARNETT; JERONIMIDIS, 2009).

A celulose é o principal componente da madeira, sendo o principal polissacarídeo estrutural da parede celular. É formada por uma longa cadeia polimérica de moléculas de  $\beta$ -D-glicopiranoses, ligadas entre si por ligações glicosídicas  $\beta(1-4)$ . As hemiceluloses são polissacarídeos não celulósicos e ramificados, que compreendem vários compostos de diferentes estruturas molecular e composição química. Elas são heteropolímeros, comumente classificadas de acordo com os principais tipos de açúcares presentes. As hemiceluloses mais importantes na parede celular são as xilanas e as glucomanas (BARNETT; JERONIMIDIS, 2009).

Segundo Yang et al. (2007) a degradação da celulose ocorre numa faixa de temperatura compreendida entre 315 e 400 °C, com a taxa máxima de perda de massa a 355 °C. Pereira (2012) constatou que a degradação da celulose ocorre entre 295 e 372 °C, cabendo ressaltar que na temperatura final da carbonização a 450 °C, a massa residual de celulose foi de 10,58%. Considerando que o teor médio de celulose dos clones estudados foi de 47,74%, ao final da carbonização apenas 5,05% da massa de celulose da madeira contribuiu para o rendimento em carvão vegetal. Stefanidis et al. (2014) verificaram que a celulose foi decomposta em uma faixa mais estreita de temperatura, entre 280 °C e 360 °C, com a maior taxa de decomposição sendo observada em 339 °C.

De acordo com Oliveira (2012) as hemiceluloses são mais suscetíveis às reações químicas de degradação e menos tolerantes à ação do calor, isso se deve a existência de hidroxilas livres conectadas à sua cadeia principal, devido à condição amorfa. Stefanidis et al. (2014) constataram que a decomposição

das hemiceluloses ocorre entre 200 e 320 °C, com dois picos distintos, um a 246 e outro a 295 °C.

Portanto a holocelulose, fração da madeira formada pela celulose e as hemiceluloses, contribui pouco para a formação de carvão, pois tem baixa estabilidade térmica, degradando-se a baixas temperaturas. Sendo mais importante para a queima direta da madeira (CASTRO, 2011).

Outro constituinte estrutural da madeira é a lignina, que é o composto mais importante para a produção de carvão, pois afeta o rendimento gravimétrico e qualidade do carvão vegetal. A lignina é uma macromolécula formada pela polimerização de três monômeros de fenilpropano, o álcool p-coumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico (Figura 1). Os anéis aromáticos destes álcoois são denominados respectivamente p-hidroxifenil, guaiacil e siringil no qual se baseia a designação dos diferentes tipos de ligninas. Por se tratar de uma estrutura aromática e de alta massa molar, ela é termicamente mais resistente que a holocelulose (BARNETT; JERONIMIDIS, 2009; SANTOS et al., 2016).

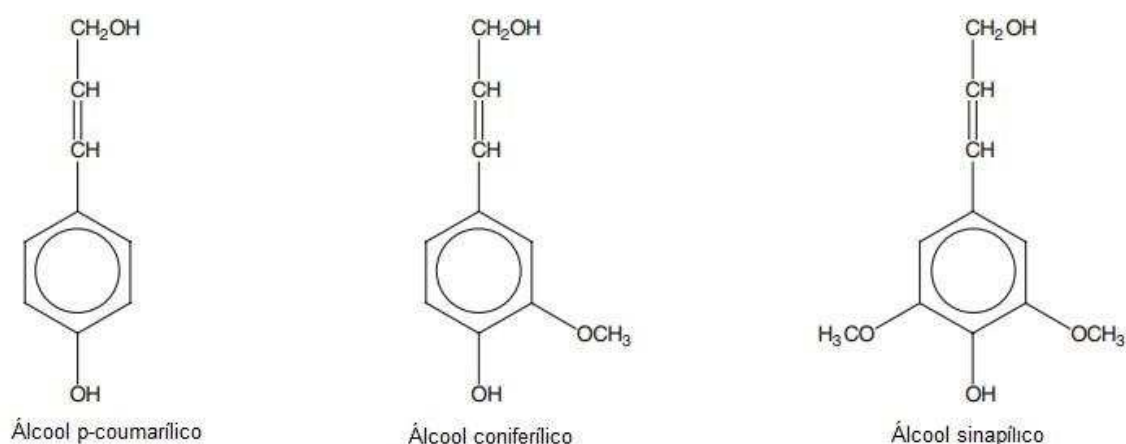


Figura 1. Estrutura química dos monômeros precursores primários da lignina. (Adaptado de Barnett e Jeronimidis (2009)).

Por ser um composto de grande diversidade estrutural, há um parâmetro frequentemente usado para quantificar as unidades monoméricas da lignina, trata-se da relação siringil/guaiacil (S/G), que demonstra a razão entre as unidades de siringil e guaiacil presentes na lignina (SANTOS et al., 2016). A estrutura da lignina siringil é menos condensada do que a da lignina guaiacil, que possui o carbono 5 do anel de fenilpropano livre para reação com outros anéis, enquanto na siringil, existe um grupo metoxílico ligado a esse carbono,

impedindo sua ligação a outras substâncias durante a polimerização. Desse modo, é esperado que a lignina do tipo guaiacil seja mais estável termicamente, visto que, sua estrutura é mais condensada e, portanto, mais difícil de se romper (CASTRO, 2011).

Além dos componentes já citados, a madeira contém também os extrativos e os minerais. Os extrativos são compostos de baixa e média massa molecular que podem ser removidos por extração com solventes orgânicos e água. A maioria dos extrativos são metabólitos secundários, compostos que desempenham funções de proteção da árvore contra agentes patogênicos e outros ataques bióticos, além de conferir maior durabilidade a madeira (BARNETT; JERONIMIDIS, 2009). Entre esses compostos estão incluídos: polifenóis, óleos, gorduras, gomas, resinas, ceras e amidos (SANTOS, 2010).

De acordo com Castro (2011), os extrativos contêm quantidade considerável de substâncias voláteis, tendo papel importante na combustão da madeira. Porém, para a produção de carvão vegetal, clones que possuam elevados teores de extrativos são contraindicados, pois podem proporcionar menor rendimento gravimétrico, devido a degradação desses compostos a baixas temperaturas.

Porém, segundo Frederico (2009), os extrativos de natureza fenólica, por serem ricos em carbono, contribuem para o maior poder calorífico da madeira, sendo que, caso não forem degradados durante a carbonização também podem colaborar para o poder calorífico do carvão e rendimento gravimétrico.

Os minerais são constituintes inorgânicos e não contribuem na combustão da madeira, sendo que elevados teores desses compostos na biomassa acarretam na formação de carvão com grande quantidade de cinzas, característica prejudicial para o uso siderúrgico (NEVES, 2012). O ideal é que o teor de inorgânicos da madeira seja inferior a 1%.

A determinação da estrutura anatômica é um importante subsídio para o trabalho de qualificação de madeiras adequadas a determinada finalidade (PAULA, 2005). A mensuração das dimensões das fibras e poros, assim como, a avaliação da relação entre esses parâmetros morfológicos e as possíveis utilizações da madeira, são importantes para seleção de genótipos para produção de carvão vegetal (PEREIRA, 2012).

Segundo Santos (2010), a espessura da parede das fibras influencia diretamente a densidade da madeira. Fração parede acima dos 60% está associada com elevada densidade básica, que é recomendada para geração de energia (PAULA, 2005; SANTOS, 2010).

Segundo Pereira et al. (2016) é recomendado que a quantidade de espaços vazios, equivalente ao lume das fibras e vasos, seja a menor possível.

De acordo com Pereira (2012), outra característica anatômica importante é a relação cerne/alburno, pois na produção de carvão vegetal, madeiras que apresentam maiores valores de relação cerne/alburno proporcionam o aumento na geração de finos. Isto ocorre porque uma maior área de cerne representa um maior caminho obstruído que os gases liberados durante a carbonização deverão percorrer, provocando o rompimento de células e elevando o teor de finos do carvão.

### **3.3. Índices de seleção**

A seleção é uma técnica importante para os programas de melhoramento, uma vez que, para se conseguir fenótipos superiores é necessário a seleção e recombinação de famílias e indivíduos. Desta maneira, selecionar indivíduos com base em poucas características não é a forma mais apropriada, por não levar a um resultado melhor considerando vários caracteres. Uma possibilidade é fazer uso dos índices de seleção, que permitem selecionar indivíduos respaldando-se em múltiplas características (MARTINS et al., 2006).

O primeiro índice de seleção foi proposto por Smith (1936) e Hazel (1943). Desde então, vários outros foram sugeridos. Estes índices permitem a formação de um aglomerado genotípico, sobre o qual é feita a seleção, sendo considerado como caráter adicional derivado de uma combinação das características sobre as quais o melhorista deseja obter genótipos superiores. Pode haver ou não correlações entre essas características (SANTOS et al., 2007). Em geral, um índice de seleção deve proporcionar classificação correta dos genótipos abrangendo diversos caracteres simultaneamente (CRUZ et al., 2004).



O índice com base em soma de postos ou ranks, foi proposto por Mulamba e Mock (1978) e consiste em classificar os genótipos em relação a cada caractere, em ordenamento favorável ao melhoramento. Após a classificação são somadas as ordens referentes a cada caractere do mesmo genótipo, assim é formada uma medida adicional, a qual é tomada como índice de seleção (CRUZ et al., 2012).

### **3.4. Estatística multivariada**

A análise multivariada compreende um conjunto de métodos estatísticos utilizados para interpretar um grupo de variáveis determinadas simultaneamente em cada elemento amostral. Normalmente essas variáveis são correlacionadas e quanto maior o número de variáveis, mais complexa é a análise por métodos de estatística univariada (MINGOTI, 2005). Dentre as principais técnicas destacam-se as análises de agrupamentos, que podem ser utilizadas para avaliação das propriedades da madeira, carvão vegetal e seleção de clones superiores.

#### **3.4.1. Análises de agrupamento**

As análises de agrupamento consistem em métodos, que buscam elaborar critérios para agrupar objetos (objetos devem ser entendidos como seres humanos, animais, plantas, municípios, etc.). São técnicas estatísticas multivariadas de caráter exploratório. Dada uma amostra de  $n$  objetos, cada um medindo segundo  $p$  variáveis, o objetivo é encontrar um sistema de classificação que agrupe os objetos em  $K$  grupos. Os objetos são mensurados por meio das variáveis de interesse, obtendo uma matriz de  $n$  objetos por  $p$  variáveis, a qual é manuseada a partir de algoritmos, visando a obtenção de grupos homogêneos. A similaridade entre os objetos é determinada por algoritmos específicos aos diferentes tipos de variáveis: discreta, binária, contínua, etc (FREI, 2006).

Normalmente é usada uma função de dissimilaridade, que recebe dois objetos e retorna a distância entre eles. Os grupos devem apresentar alta homogeneidade interna e alta separação (heterogeneidade externa). O que significa que os elementos de um determinado conjunto devem ser

mutuamente similares e que, preferencialmente, apresentem grande diferença dos elementos pertencentes a outro conjunto (LINDEN, 2009).

Desta maneira, a análise de agrupamento é o inverso da análise de fatores, pois reduz o número de objetos, e não o número de variáveis, concentrando-os em um número menor de grupos. Muitas técnicas são propostas, porém, ainda não há uma teoria generalizada e amplamente aceita. Devido a isso, deve-se utilizar vários métodos e comparar os resultados, para que a análise dos dados seja realizada pela técnica mais adequada (VICINI; SOUZA, 2005).

Entre as medidas de distância entre dois objetos  $i$  e  $j$ , a mais utilizada para análise de agrupamento é a distância euclidiana, que fornece a similaridade dada por (FREI, 2006):

$$d = \sqrt{\sum_{f=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}$$

Sendo:  $d$  = distância geométrica dos pontos de coordenadas  $(x_{1k}, \dots, x_{ik})$  e  $(x_{j1}, \dots, x_{jk})$ . Quando os dados estiverem padronizados, substitui-se  $x$  por  $x'$  nessa expressão.

Segundo Manly (2004), quando a distância euclidiana é estimada a partir das variáveis originais, apresenta a inconveniência de ser influenciada pela escala de medida, pelo número de variáveis e pela correlação existente entre as mesmas. Nesse caso, deve-se fazer a padronização das variáveis em estudo. A padronização evita que as unidades que as mensuram afetem a similaridade entre dois objetos. Dessa forma, as variáveis contribuem de forma mais igualitária (FREI, 2006). A função mais conhecida para padronizar as variáveis é a seguinte:

$$Z_{if} = \frac{X_{if} - \bar{X}_f}{S_f}$$

Em que  $Z_{if}$  = variável a ser padronizada,  $\bar{X}_f$  e  $S_f$  representam, respectivamente, a média e o desvio padrão dos valores da variável  $f$ .

A distância euclidiana é alvo de críticas por não levar em consideração as variâncias e covariâncias residuais existentes entre as características avaliadas, o que é possível de quantificar quando são avaliados genótipos em delineamentos experimentais. Por sua vez, a distância de Mahalanobis faz uso dessas informações, além de considerar a correlação entre os caracteres, sendo essa uma vantagem em relação a distância euclidiana (CRUZ et al., 2011).

Quando os dados são advindos de ensaios experimentais, pode-se obter a matriz de dispersão residual ( $\Psi$ ) e as médias das características. Utilizando essas informações o cálculo da distância de Mahalanobis é feito por meio da expressão (CRUZ et al., 2011):

$$D_{ii'}^2 = \delta' \Psi^{-1} \delta$$

Em que:

$D_{ii'}^2$  = distância de Mahalanobis entre os genótipos  $i$  e  $i'$ ;

$\Psi$  = matriz de variâncias e covariâncias residuais;

$\delta' = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_v]$ , sendo  $d_j = Y_{ij} - Y_{i'j}$

e

$Y_{ij}$  = média do  $i$ -ésimo genótipo em relação a  $j$ -ésima variável.

Os resultados são tradicionalmente apresentados por meio de um dendrograma, também chamado de gráfico em árvore, o qual representa uma síntese gráfica do trabalho. Embora aconteça uma pequena perda de informação, por ser uma síntese, o gráfico é de grande utilidade para classificação, comparação e discussão de agrupamentos (VICINI; SOUZA, 2005).

Segundo os mesmos autores, há duas formas de se representar um dendrograma: horizontal e verticalmente. No dendrograma horizontal, as linhas verticais, ou o eixo  $y$ , representam os grupos unidos por ordem decrescente de semelhança, a posição da reta, na escala ou o eixo  $x$ , indica as distâncias entre os grupos que foram formados. O dendrograma é lido de cima para baixo.

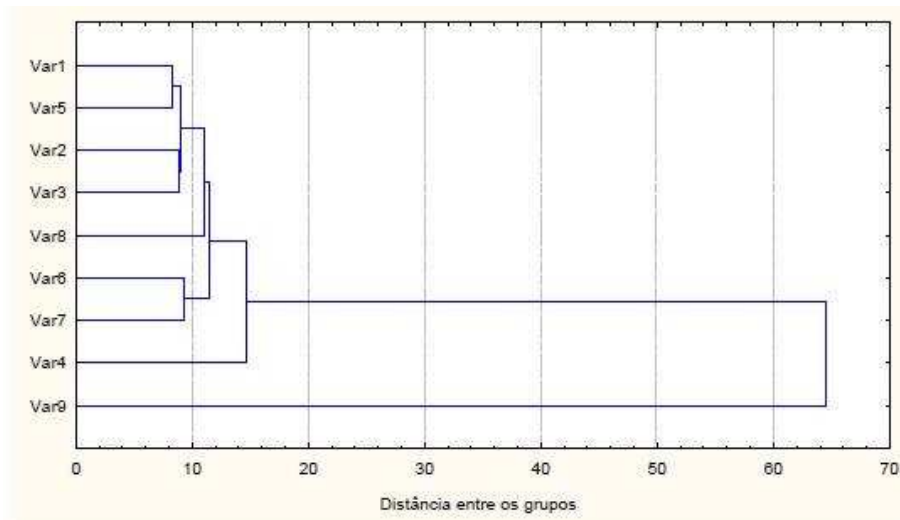


Figura 2. Dendrograma horizontal (VICINI; SOUZA, 2005).

Pode-se verificar na Figura 2, que as variáveis Var 1 e Var 5 são as que possuem a maior semelhança, por possuírem a menor distância euclidiana, formando o primeiro grupo. Logo após se encontram as variáveis Var 2, Var 3, Var 8, e assim sucessivamente. As variáveis são agrupadas por ordem decrescente de semelhança, assim, a Var 9 formou o último grupo do dendrograma, que se manteve distinto dos demais grupos, concluindo-se que essa variável é pouco semelhante as demais.

No dendrograma vertical, realiza-se a leitura da direita para esquerda, sendo que as linhas verticais, ou o eixo y, indicam as distâncias entre os grupos formados. A posição das retas no eixo x indica os grupos unidos por ordem decrescente de semelhança, conforme Figura 3. A interpretação da Figura 3 é a mesma que a da Figura 2, mudando apenas o eixo em que as variáveis são apresentadas.

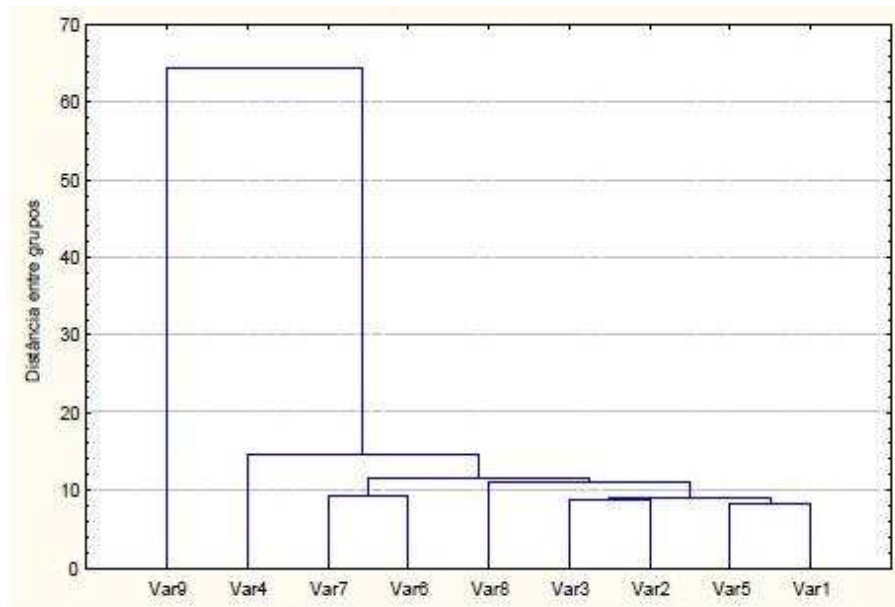


Figura 3. Dendrograma vertical (VICINI; SOUZA, 2005).

Os processos de agrupamento podem ser divididos em dois conjuntos: hierárquicos e não hierárquicos. O método hierárquico de cluster consiste em uma série de sucessivos agrupamentos ou sucessivas divisões de elementos, onde os elementos são agregados ou desagregados, sendo representados pelo diagrama bidimensional, denominado dendrograma ou diagrama em árvore (VICINI; SOUZA, 2005).

Esse método é subdividido em métodos aglomerativos e divisivos (DONI, 2004). Os aglomerativos atuam criando conjuntos a partir de elementos isolados, os divisivos iniciam a partir de um grande conjunto, que vão se repartindo, até chegar a elementos isolados (LINDEN, 2009).

Segundo Anderberg (2014), a maioria dos métodos aglomerativos se tratam de formulações alternativas de três grandes conceitos de agrupamento aglomerativo: Métodos de ligação (*single linkage, complete linkage, average linkage, median linkage*), métodos de centroide e métodos de soma de erros quadráticos ou variância (Método de Ward).

Os métodos não hierárquicos ou de particionamento tem a função de agrupar elementos em K grupos, onde K é quantidade de grupos previamente definida. Segundo Anderberg (1973) citado por Doni (2004), a maioria dos métodos de particionamento, tem como principal ideia, a escolha de uma partição inicial dos elementos, em seguida os membros dos grupos são alterados, de modo a obter a melhor partição.

O método por particionamento, quando comparado ao método hierárquico apresenta a solução de forma mais rápida, pois não é necessário calcular e armazenar, durante o processamento, a matriz de similaridade. Os métodos não hierárquicos mais conhecidos são o método *k-means* (k-médias) e o método *k-medoid* (k-medóides).

### 3.4.2. Método de Tocher

O método de Tocher é um método de agrupamento por otimização. Nesse método adota-se o critério que as médias das medidas de dissimilaridade dentro de cada grupo devem ser menores que as distâncias médias entre quaisquer grupos. Para realizar o procedimento, é necessário a formação da matriz de dissimilaridade, sobre a qual o par de indivíduos mais similares é identificado. Esses formarão o primeiro grupo e a partir desse ponto, é avaliada a possibilidade de inclusão de novos indivíduos, através do critério mencionado anteriormente (CRUZ; REGAZZI, 1994).

Segundo Caixeta et al. (2003) a distância média intragrupos é dada por:

$$d_g = \sum_{i,i'=1}^I \frac{d_{ii'}}{C_n^2}$$

Em que:

$d_g$  = distância média dentro do grupo  $I$ ;

$\sum_{i,i'=1}^I d_{ii'}$  = soma de todas as possíveis combinações dos  $n$  genótipos;

$C_n^2$  = número de combinações possíveis.

A distância média intergrupos é dada por:

$$d_{g,h} = \sum_{i,j=1}^I \frac{d_{ii'}}{n_g n_h}$$

Em que:

$d_{g,h}$  = distância média entre os grupos  $g$  e  $h$ ;

$\sum_{i,j=1}^I d_{ii'}$  = soma de todas as possíveis combinações dos  $n_g \times n_h$  genótipos

incluídos nos grupos  $g$  e  $h$ , respectivamente;

$n_g \times n_h$  = número total de combinações possíveis.

A distância média em um grupo sempre tem um acréscimo quando há a entrada de um novo indivíduo, sendo assim, a tomada de decisão sobre incluir ou não o indivíduo no grupo pode ser feito pela comparação entre o acréscimo no valor médio da distância dentro do grupo e um nível máximo permitido. Esse nível pode ser determinado arbitrariamente ou, como é mais frequente, adotar o valor máximo ( $\theta$ ) da medida de dissimilaridade encontrado no conjunto das menores distâncias envolvendo cada indivíduo. Sendo a distância entre o indivíduo  $k$  e o grupo formado pelos indivíduos  $ij$ , dada por (CRUZ et al., 2011):

$$d_{(ij)k} = d_{ik} + d_{jk}$$

A inclusão, ou não, do indivíduo  $k$  no grupo é realizada respeitando o critério de que o acréscimo médio ocasionado pela inclusão do indivíduo  $k$  em um grupo previamente formado seja menor que  $\theta$  (maior distância no conjunto de menores distâncias envolvendo cada genótipo):

Se  $\frac{d_{(grupo)k}}{n} \leq \theta$ , inclui-se o indivíduo  $k$  no grupo;

Se  $\frac{d_{(grupo)k}}{n} > \theta$ , o indivíduo  $k$  não é incluído no grupo;

Sendo  $n$  o número de indivíduos que constituem o grupo original (CRUZ et al., 2011).

### 3.5. Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais são modelos matemáticos baseados na estrutura do cérebro e funcionamento dos neurônios biológicos. Estes modelos possuem a habilidade de adquirir, armazenar e utilizar conhecimento experimental, visando reproduzir computacionalmente as habilidades humanas, tais como aprendizado, generalização, associação e abstração (GOLDSCHMIDT, 2010). Na Figura 4 é apresentado um exemplo simplificado de neurônio.

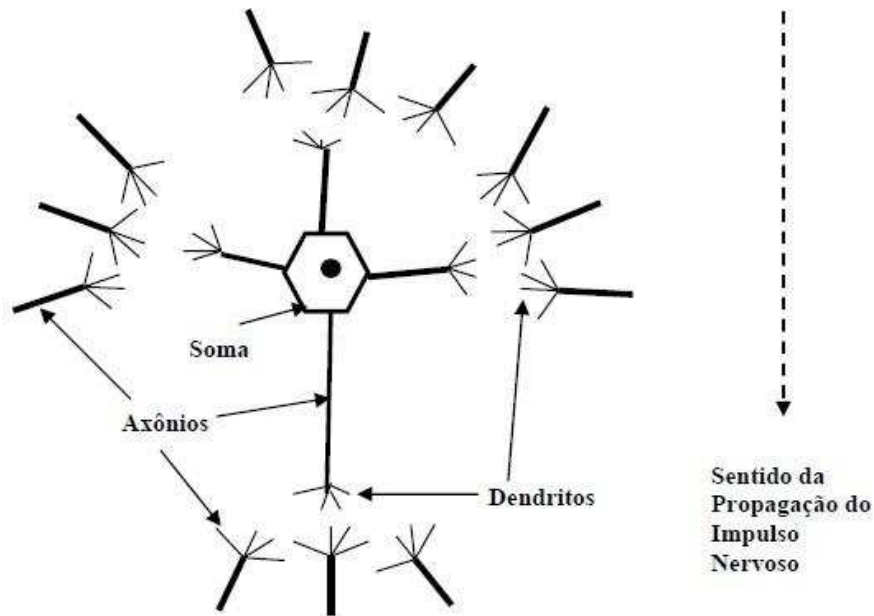


Figura 4. Sistema de um neurônio biológico. Haykin (1994) citado por Benite (2003).

Basicamente, o neurônio biológico tem seu funcionamento da seguinte maneira: Os dendritos recebem sinais de entrada vindo de outras células, depois o soma e os próprios dendritos processam a informação e a transmitem ao longo do axônio, por meio das sinapses, que são as ligações entre os dendritos de neurônios diferentes (BENITE, 2003).

É relativamente simples o modelo de um neurônio artificial. Ele possui  $m$  terminais de entrada que representam os dendritos, cujas ligações com o corpo celular artificial são realizadas através de elementos chamados de peso ( $w$ ). Para cada uma das entradas  $x_i$  do neurônio há um peso correspondente  $w_i$ . A transmissão do sinal de ativação é feita por meio de uma função de ativação para produzir a saída ( $y$ ) do neurônio (HAYKIN, 2001).



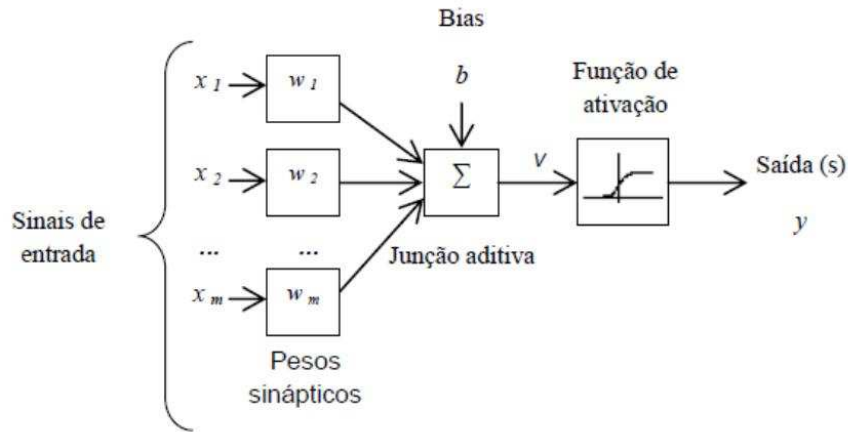


Figura 5. Representação de neurônios artificiais (HAYKIN, 2001).

Cada neurônio artificial representa uma unidade de processamento, a qual é composta por uma função de ativação. A função de ativação, ou função de transferência, é uma função matemática que, aplicada à combinação linear entre as variáveis de entrada e pesos que chegam a determinado neurônio, retorna um valor de saída. Essa função limita as entradas a uma amplitude finita, normalmente no intervalo fechado entre 0 e 1 (HAYKIN, 2001). Segundo este mesmo autor, várias funções matemáticas podem ser utilizadas como função de ativação. Entre as mais comuns estão: função limiar (a); função linear por partes (b) e a função sigmóide (c) (Figura 6).

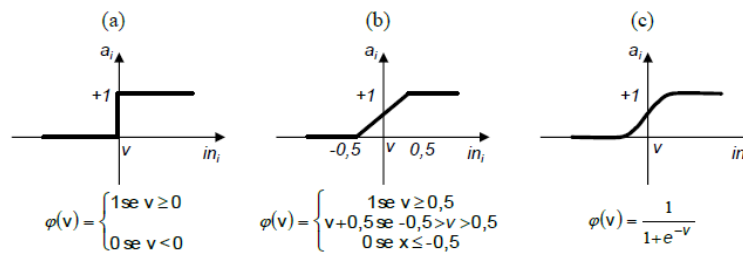


Figura 6. Principais funções de ativação (HAYKIN, 2001).

Em relação a conectividade da rede, ela pode apresentar estruturas parcialmente conectadas, quando nem todos os neurônios se conectam entre si, ou completamente conectadas, no caso onde todos os neurônios estão conectados. Também existem as redes neurais sem peso, que se utilizam de tabelas-verdade armazenadas nos neurônios da rede, sem que exista conexão ponderada ajustável entre eles. Em relação ao arranjo das camadas de neurônios, características que normalmente dão nome as tipologias

representativas, as mesmas podem ser redes de neurônio único, redes multicamadas e redes recorrentes (HAYKIN, 2001).

Na Figura 7 está apresentado o esquema de uma rede neural artificial genérica.

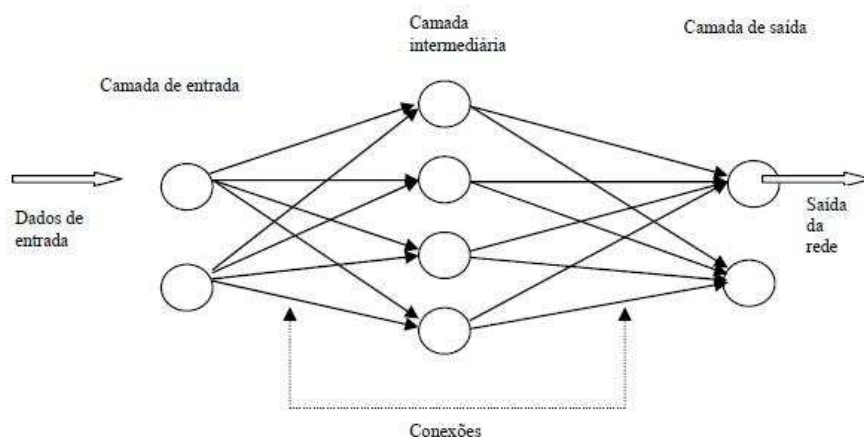


Figura 7. Esquema de uma rede de neural genérica. Adaptado de Zeel et al. (2001) citado por Benite (2003).

Uma das características mais importantes das RNA é a sua capacidade de aprender por meio da experiência. Elas utilizam um processo de repetidas apresentações dos dados para tentar aprender padrões e distinguir modelos de conhecimento de forma automática. Este processo recebe o nome de aprendizado e é implementado pelo uso de um algoritmo de aprendizado (GOLDSCHMIDT, 2010).

Uma RNA aprende a respeito de seu ambiente por meio do ajuste iterativo de seus pesos sinápticos e níveis de bias. O tipo de aprendizado é determinado pela forma pela qual a modificação dos parâmetros ocorre (HAYKIN, 2001). Os métodos de aprendizado podem ser divididos em aprendizado supervisionado e não supervisionado.

No aprendizado supervisionado, há a presença de um supervisor responsável por apresentar os sinais de entrada e saída a rede para ajustar os pesos sinápticos. As entradas são estimuladas por padrões específicos e o supervisor observa se a saída calculada pela rede é compatível com a resposta esperada, caso isso não ocorra o algoritmo de aprendizagem ajusta os pesos sinápticos de forma a minimizar o erro. O erro é calculado e esse processo é repetido continuamente até que se atinja uma resposta satisfatória, desta maneira o conhecimento é transferido gradualmente para a rede por meio do

treinamento. Os algoritmos mais conhecidos para essa abordagem são a Regra Delta e o Algoritmo *Backpropagation* (ALBANEZ, 2017).

Já no aprendizado não supervisionado não há um professor, de modo que não há uma saída desejada para cada entrada. Os padrões são apresentados a rede de forma contínua e a percepção de regularidades nos conjuntos de dados permite que o aprendizado seja possível. Este tipo de aprendizado modifica os pesos de maneira a produzir saídas que sejam consistentes, ou seja, a apresentação de um padrão de treinamento, assim como a apresentação de outro padrão que seja similar a um dos padrões de treinamento irá gerar a mesma resposta (GOLDSCHMIDT, 2010).

Esse processo extrai propriedades estatísticas do conjunto de dados de treinamento e agrupa os vetores similares em classes, sendo aplicável a problemas que visam a descoberta de características importantes nos dados de entrada, por exemplo as tarefas de agrupamento de dados (GOLDSCHMIDT, 2010).

Para realizar a análise não supervisionada pode-se usar a regra de aprendizagem competitiva. Podendo ser empregada, por exemplo, uma rede de duas camadas, onde uma é a camada de entrada e a outra é a camada competitiva. A camada de entrada recebe as variáveis e a camada competitiva trata-se de neurônios que competem entre si, de acordo com uma regra de aprendizado, pela oportunidade de responder as características presentes nos dados de entrada. Essa rede, em sua forma mais simples, opera de acordo com a estratégia: “O vencedor leva tudo”. Onde o neurônio com maior entrada total ganha a competição e se torna ligado, conseqüentemente, todos os outros neurônios se tornam desligados (HAYKIN, 2001).

As redes neurais de Kohonen ou mapas auto-organizáveis (*Self-Organizing Maps –SOM*) são modelos neurocomputacionais desenvolvidos pelo professor Teuvo Kohonen nos anos 80. Elas pertencem a classe dos modelos competitivos com aprendizado não supervisionado e são utilizadas para análises de agrupamento, sendo apropriadas para trabalhar com dados envolvendo comportamentos não lineares (PITELLI et al., 2009).

Segundo Pitelli et al. (2009) a rede de Kohonen possui duas camadas de neurônios artificiais: uma para receber os padrões de entrada e outra para gerar os padrões de saída. Os neurônios da camada de saída formam uma

grade (ou mapa) retangular bidimensional e todos são interconectados aos neurônios que formam a camada de entrada (Figura 8). A similaridade entre os vetores das variáveis de entrada e os vetores de peso é determinada pela distância euclidiana. Sempre que um padrão estimula uma vizinhança de um neurônio no mapa, o peso associado é reforçado.

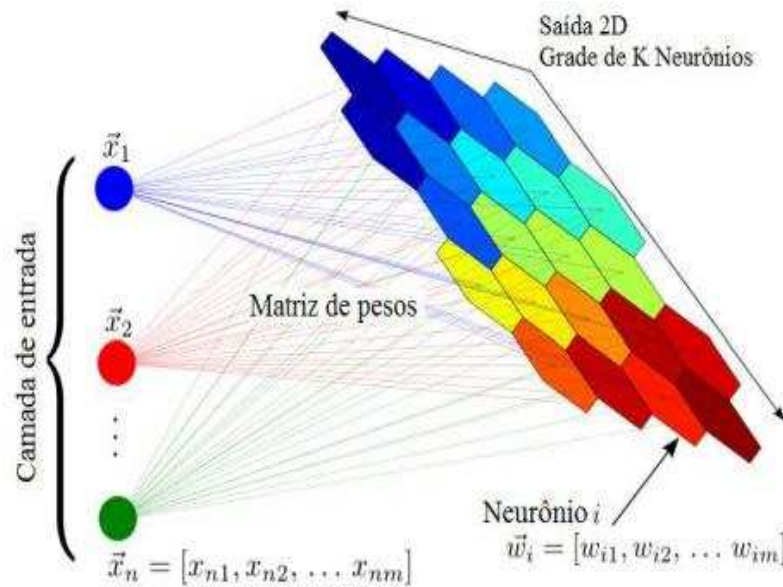


Figura 8. Esquema de um SOM. Adaptado de Kind e Brunner (2014).

Com o andamento da aprendizagem, o raio da vizinhança vai sendo reduzido e padrões específicos são armazenados, enquanto padrões externos a essa vizinhança buscam as demais. Desta forma, um neurônio aprende mais sobre os padrões a ele associados, ao passo que seu vizinho aprende menos sobre esses padrões. Com o término da aprendizagem, padrões de entrada similares ativarão as mesmas vizinhanças do mapa, armazenando nas vizinhanças do neurônio unidades com padrões similares. Quando uma unidade é fixada num neurônio, este é denominado neurônio vencedor (*winning neuron*) (PITELLI et al., 2009).

A ordem obtida no mapeamento o torna passível de utilização como base na qual os indicadores estatísticos individuais podem ser visualizados e facilmente compreendidos, assim como, o grau de *clustering* de cada elemento pode ser representado por escala de cinza ou colorida (BENITE, 2003).

O SOM, que é um dos principais modelos de redes neurais, tem sido amplamente utilizado para problemas de visualização e classificação não

supervisionada (COSTA et al., 2011). Desta forma, propõe-se sua utilização para agrupamento e classificação de diferentes genótipos de *Eucalyptus*.

#### **4. MATERIAL E MÉTODOS**

Neste trabalho foram utilizados 64 genótipos de *Eucalyptus* (Tabela 1), cultivados em espaçamento 3 x 3 m, com 7 anos de idade, os quais são provenientes de uma seleção prévia de campo da empresa Gerdau, localizada no município de Três Marias – MG, que em um banco clonal em linhas de 10 plantas, inicialmente com mais de 300 genótipos, escolheram os de maior incremento médio anual (IMA) e maior densidade básica, além daqueles resistentes a seca, doenças e ataque de insetos, selecionando 64 genótipos para este estudo.

Tabela 1. Informações dos genótipos utilizados no estudo

ID	GENÓTIPO	VOL	DB	C/A	MS	ID	GENÓTIPO	VOL	DB	C/A	MS
24	<i>E.resinifera</i> x <i>E.grandis</i>	196	570,24	0,59	112	2494	<i>E.grandis</i>	279	537,01	0,7	150
61	<i>E. urophylla</i> x <i>E.spp.</i>	375	568,06	0,72	213	2551	<i>E.urophylla</i>	400	591,58	1,48	236
62	<i>E. urophylla</i> x <i>E. spp.</i>	249	546,26	1,39	136	2673	<i>E.urophylla</i>	499	584,31	1,1	292
157	<i>E.urophylla</i>	270	544,11	0,57	147	2808	<i>E.grandis</i>	342	517,08	1,2	176
170	<i>E.urophylla</i>	353	586,49	1,49	209	2815	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	224	571,19	1,48	128
260	<i>E.camaldulensis</i>	240	569,00	0,83	136	2834	<i>E.pellita</i> x <i>E.grandis</i>	304	591,63	1,03	179
297	<i>E.camaldulensis</i>	487	577,76	0,86	281	3068	<i>E.camaldulensis</i>	327	602,15	0,47	197
680	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	358	590,11	0,7	211	3169	<i>E.urophylla</i>	317	574,40	0,78	182
683	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	418	581,67	0,89	243	3192	<i>E.urophylla</i>	356	561,44	1,04	200
685	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	252	587,00	0,88	148	3206	<i>E.urophylla</i>	407	552,17	0,96	226
765	<i>E.urophylla</i>	412	591,41	1,58	244	3218	<i>E.urophylla</i>	333	557,07	1,5	186
933	<i>E.camaldulensis</i>	170	603,57	0,5	103	3336	<i>E.grandis</i>	330	570,55	1,12	188
934	<i>E.camaldulensis</i>	246	553,85	0,7	137	3370	<i>E.grandis</i>	292	571,45	1,02	167
1177	<i>E.urophylla</i>	295	580,63	1,22	171	3375	<i>E.grandis</i>	348	530,35	0,78	185
1178	<i>E.grandis</i> x <i>Eucalyptus</i> spp.	331	596,14	1,01	197	3403	<i>E.urophylla</i>	323	540,63	0,63	175
1198	<i>E.urophylla</i>	276	541,64	0,89	150	3420	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	290	558,09	1,22	162
1230	<i>E.urophylla</i>	407	537,17	0,61	219	3421	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	510	554,92	0,69	283
1246	<i>E.urophylla</i>	376	543,83	1,31	205	3430	<i>E.urophylla</i>	325	589,72	1,09	192
1453	<i>E.grandis</i>	483	602,21	1,14	291	3466	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	363	533,24	0,86	193
1543	<i>E.grandis</i>	493	587,30	1,5	290	3616	<i>E. grandis</i> x <i>E.camaldulensis</i>	195	558,66	1,05	112
1633	<i>E.camaldulensis</i>	288	626,77	0,67	181	3633	<i>E.camaldulensis</i>	270	595,79	1,2	161
1774	<i>E.camaldulensis</i>	262	679,90	0,65	179	3645	<i>E.urophylla</i>	334	551,08	1,3	184
1781	<i>E.camaldulensis</i>	193	640,82	0,8	124	3908	<i>E.urophylla</i>	486	559,16	1,47	272
1792	<i>E.camaldulensis</i>	249	655,79	0,84	164	3942	<i>E.urophylla</i>	279	577,61	1,47	162
1841	<i>E.camaldulensis</i>	364	607,78	1,07	222	4007	<i>E.urophylla</i>	304	537,93	1,05	164
1883	<i>E.urophylla</i>	287	581,24	1,2	167	4254	<i>E.urophylla</i>	336	549,88	1,44	184
1886	<i>E.urophylla</i>	353	602,19	1,15	213	4296	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	398	610,87	0,94	243
1923	<i>E.urophylla</i>	511	604,46	1,45	309	4384	<i>E.grandis</i> x <i>E. urophylla</i> x <i>E. tereticornis</i>	317	566,15	0,53	180
1954	<i>E.urophylla</i>	383	620,73	1,1	238	4392	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	301	603,59	0,92	181
1980	<i>E.urophylla</i>	345	602,58	1,69	208	4393	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	284	574,50	1,21	164
2361	<i>E.urophylla</i>	386	562,17	1,59	217	4409	<i>E.urophylla</i> x <i>E. grandis</i>	403	581,92	1,16	235
2402	<i>E.urophylla</i>	290	641,83	0,91	186	4410	<i>E.urophylla</i>	366	566,04	1,11	207

ID= Identificação; VOL= Volume médio do genótipo por hectare ( $m^3 ha^{-1}$ ); DB= Densidade básica ( $kg m^{-3}$ ); CA= Relação cerne/alburno; MS= Massa seca média por hectare ( $t ha^{-1}$ ).

De acordo com Queiroz et al. citado por Curi et al. (2005), o clima da região é do tipo Cwa de Köppen, caracterizado por verões úmidos e invernos secos, com temperatura média anual entre 19,8 e 25,3°C e a precipitação média anual varia de 1.200 a 1.500 mm. O tipo de solo é o Latossolo Vermelho-Amarelo (RODRIGUES et al., 2005).

Agosto é o mês de menor pluviosidade, com média de 3 mm, já dezembro é o mês mais chuvoso, com média de 250 mm de precipitação. Com relação a temperatura, fevereiro é o mês mais quente, com temperatura média de 25,4 °C, já Junho é o mês mais frio, com média de 20,6 °C (Figura 9).

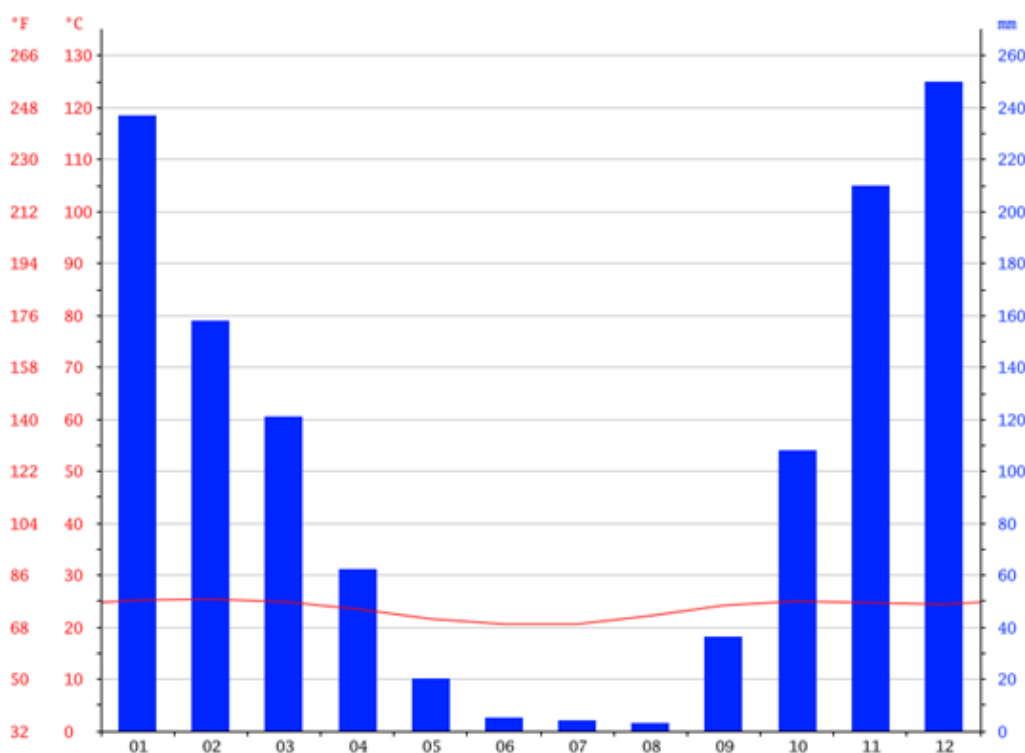


Figura 9. Precipitação e temperaturas médias mensais da região de Três Marias/MG. (CLIMATE-DATA, 2018).

Foram amostradas três árvores de diâmetro médio para cada genótipo. A seleção foi feita excluindo-se as árvores que apresentavam defeitos visuais e também aquelas que estavam nas bordas. As árvores foram cubadas para determinação do volume e de cada uma foram retirados seis discos de 10 cm de espessura, correspondentes a 0%, dap (Diâmetro a 1,3 m de altura), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (diâmetro mínimo de 6 cm).

Em seguida os discos foram enviados para os Laboratórios de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e de Propriedades da Madeira (LPM), da



Universidade Federal de Viçosa (UFV), para determinação das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira e do carvão vegetal. Exceto as análises de degradação térmica (TGA e DTG) e composição elementar da madeira que foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Biomateriais (LBM), da Universidade Federal de Lavras – UFLA.

#### **4.1. Propriedades da madeira dos genótipos de eucalipto**

##### **4.1.1. Relação cerne/alburno**

Para determinação da relação cerne alburno (C/A) foi seguida a metodologia descrita por Evangelista (2007). Inicialmente identificou-se em cada disco, com auxílio de uma lupa com aumento de dez vezes, a região limítrofe entre cerne e alburno, observando a alteração na cor e ocorrência de poros obstruídos por tilos no cerne. Em seguida foram traçadas duas retas perpendiculares de uma extremidade a outra dos discos, passando pelo centro da medula. Realizou-se com auxílio de régua com 0,1 mm de precisão, medições do diâmetro total e diâmetro do cerne em ambas as retas. A relação cerne alburno foi calculada pela seguinte fórmula:

$$(C|A) = \frac{Dc^2}{(D^2 - Dc^2)}$$

Sendo:

Dc: Diâmetro do cerne, em cm; e,

D: Diâmetro do disco sem casca, em cm.

Os valores médios da relação C/A para cada genótipo foram calculados a partir da média ponderada da relação C/A dos discos de madeira de cada árvore, utilizando o volume das toras entre dois discos consecutivos como fator de ponderação.

##### **4.1.2. Densidade básica da madeira**

Inicialmente, retiraram-se duas cunhas opostas passando pela medula. A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com o método de imersão em água, segundo a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003).

Os valores médios de densidade básica de cada clone foram calculados pela ponderação das densidades das cunhas retiradas ao longo do tronco, utilizando o volume das toras entre dois discos consecutivos como fator de ponderação, conforme descrito por Vital (1984).

#### 4.1.3. Massa seca de madeira

A massa seca de madeira (t) média por hectare foi obtida segundo a equação abaixo:

$$MSM = \frac{(DBM \times VOL)}{1000}$$

Sendo: MSM = Massa seca de madeira por hectare (t ha<sup>-1</sup>);

DBM = Densidade básica da madeira (kg m<sup>-3</sup>);

VOL = Volume médio por hectare (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>).

#### 4.2. Pré-seleção dos genótipos de eucalipto

Utilizando o software *SELEGEN - REML/BLUP*, calculou-se os valores genotípicos das variáveis densidade básica, relação cerne/alburno, volume e massa seca de madeira por hectare. Para tal, foi usado o modelo 83, representado pela equação a seguir:

$$y = Xu + Zg + e$$

Em que:  $y$  = é o vetor de dados;

$u$  = é o escalar referente à média geral (efeito fixo);

$g$  = é o vetor dos efeitos genotípicos (assumidos como aleatórios);

$e$  = é o vetor de erros ou resíduos (aleatórios).

As letras maiúsculas do modelo apresentado ( $X$  e  $Z$ ) representam as matrizes de incidência para os referidos efeitos. O modelo foi escolhido por ser adequado ao delineamento experimental inteiramente casualizado e ao teste clonal com genótipos não aparentados com uma planta por parcela.

De posse do valor genotípico, que é o valor fenotípico corrigido do efeito ambiental “ $e$ ”, os genótipos de eucalipto foram dispostos em ordem decrescente para densidade básica, volume e massa seca de madeira por

hectare, e em ordem crescente para a relação C/A, formando um ranking para cada característica.

Em seguida foram classificados em superiores ou inferiores de acordo com o padrão desejado para cada caractere. Por exemplo, para densidade básica, volume e massa seca é desejado que o genótipo apresente os maiores valores. Contudo para a relação cerne/alburno são mais apropriados aqueles genótipos com os menores valores, visto que essa variável influencia negativamente a secagem da madeira e a qualidade do carvão vegetal.

Sendo assim, calculou-se a mediana para cada variável, de forma que os genótipos que continham valores acima da mediana para densidade, volume e massa seca, foram denominados superiores (SUP), os genótipos que ficaram abaixo da mediana foram denominados inferiores (INF).

Para a relação cerne/alburno, considerou-se superiores os genótipos com valores abaixo da mediana e os que ficaram acima foram considerados inferiores.

Após a classificação dos genótipos em superior e inferior para cada característica, foram formados grupos ou classes de acordo com o critério de importância pré-estabelecido para cada variável. A densidade básica (DB) foi escolhida como a variável mais importante, devido a sua grande influência sobre a produtividade e qualidade do carvão vegetal destinado a siderurgia, seguida do volume (VOL) e massa seca (MS) por hectare, que representam a produtividade dos genótipos. A relação cerne/alburno (C/A) teve menor peso entre as variáveis de pré-seleção, pois apesar de maiores valores dessa característica serem relacionados a um carvão com maior geração de finos, não há um consenso sobre a sua influencia na qualidade do carvão vegetal.

Deste modo, a primeira classe de interesse correspondeu aos clones que foram superiores em todos os caracteres. A segunda classe, abrangeu os clones que foram superiores em DB, MS, VOL e inferiores em C/A, assim sucessivamente, formando treze classes distintas.

Paralelamente, utilizou-se o índice de Mulamba e Mock (1978), que hierarquiza os genótipos para cada característica, atribuindo valores absolutos mais elevados àqueles de melhor desempenho. Após a classificação, foram somadas as ordens de cada genótipo referente a cada característica, resultando em uma nova medida, que é tomada como índice de seleção. Essa

opção permite obter ganhos positivos nos quatro caracteres (CRUZ et al., 2012).

Vale salientar que para pré-selecionar os genótipos observou-se simultaneamente a sua posição no rank obtido pelo índice de Mulamba e Mock, assim como o seu ordenamento ou ranking para cada variável individualmente e sua classe. A fim de garantir que fossem escolhidos os genótipos que permitissem ganhos positivos para as quatro características, respeitando a ordem de importância de cada uma e que fossem superiores para o maior número de caracteres.

A fim de facilitar a análise simultânea dos três critérios utilizados na pré-seleção dos genótipos (índice de Mulamba e Mock, ranking de cada variável e classes formadas com base na mediana), foi gerada uma planilha de pré-seleção, a qual apresenta conjuntamente as classificações obtidas por meio dos três métodos, o que permitiu uma análise geral. Dessa forma, foram pré-selecionados os genótipos com maior aptidão para uso energético, os quais foram utilizados para a caracterização química e anatômica da madeira e produção de carvão vegetal em mufla para obtenção dos rendimentos em carvão, gases condensáveis e não condensáveis, além de suas propriedades físicas e químicas.

No apêndice (página 78), encontra-se um resumo da planilha de pré-seleção, na qual estão descritos os genótipos pré-selecionados, assim como as classificações propostas.

### **4.3. Propriedades da madeira dos genótipos pré-selecionados**

#### **4.3.1. Poder calorífico superior (PCS)**

O poder calorífico superior da madeira foi determinado de acordo com a norma EN 14918 (DIN, 2010), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática IKA300®.

#### **4.3.2. Composição química imediata**

Corresponde aos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, em base seca, foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986).

### **4.3.3. Composição química estrutural**

Para determinação da composição química estrutural da madeira foram empregadas as amostras de madeira moídas, que formaram uma amostra composta por árvore. Utilizou-se a fração que passou na peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco da madeira foi realizada conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI 1998).

Os teores de extrativos da madeira foram determinados de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI,1998), utilizando o método de determinação de extrativos totais, apenas substituindo o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno.

Os teores de lignina insolúvel foram determinados pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. A porcentagem de cinzas na madeira foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986). O teor de holoceluloses foi calculado subtraindo-se de 100% os teores de lignina total, extrativos e cinzas.

### **4.3.4. Composição química elementar**

Para a análise elementar, as amostras compostas foram moídas e classificadas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira 200 mesh e ficou retida na de 270 mesh. A quantificação dos teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N) e enxofre (S), em relação à massa seca da madeira, foi realizada em um analisador universal da marca Elementar, modelo Vario Micro Cube. O analisador utiliza, como gases de arraste e ignição, o hélio e o oxigênio, respectivamente. As amostras de 2 mg foram acondicionadas em cápsulas de estanho e completamente incineradas a 1.200 °C. Determinou-se o teor de oxigênio pelo somatório dos elementos determinados decrescido de 100% e subtraindo o teor de cinzas.

#### 4.3.5. Análise termogravimétrica (TGA e DTG)

Para análise termogravimétrica da madeira foi utilizado o aparelho DTG-60H, Shimadzu. As análises foram realizadas sob atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de 50 mL min<sup>-1</sup>, sendo utilizadas aproximadamente 2mg de serragem previamente selecionadas em peneiras sobrepostas de malha de 200 e 270 mesh, sendo utilizada a fração que ficou retida nesta última. As curvas termogravimétricas foram obtidas a partir de 50 °C até temperatura máxima de 450 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C min<sup>-1</sup>.

A curva termogravimétrica (TGA) foi obtida para avaliar a perda de massa em função da temperatura e a curva da derivada primeira da perda de massa (DTG) para identificar as temperaturas nas quais ocorrem as maiores perdas de massa.

A partir das curvas TGA, procedeu-se o cálculo da massa residual na temperatura de 450 °C, considerando como valor inicial a massa absolutamente seca da amostra na temperatura de 100 °C.

#### 4.3.6. Análise morfológica de fibras e poros

Foram retirados pequenos fragmentos ao longo do sentido radial na região do cerne e do alburno dos discos correspondentes ao dap das três árvores amostras de cada genótipo. Para individualização das fibras, as amostras foram acondicionadas com solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial, segundo o método preconizado por Dadswell (1972).

Posteriormente, foram montadas lâminas temporárias e feitas as medições da largura, comprimento e o diâmetro do lume de 30 fibras por árvore. Utilizou-se um microscópio ótico com câmera acoplada e sistema de aquisição de imagens e também o software *Axio-Vision*. A espessura da parede celular da fibra foi determinada matematicamente pela metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lume. A fração parede (FP) foi estimada conforme Foelkel et al. (1975):

$$FP = \left( \frac{2 \times EP}{DF} \right) \times 100$$

Sendo:

EP: Espessura de parede, em µm; e,

DF: Diâmetro de fibra, em  $\mu\text{m}$ .

Para medição do diâmetro e da frequência de poros foram utilizadas amostras do cerne e alburno de cada árvore, provenientes do plano transversal do disco relativo ao dap. Os cortes anatômicos foram feitos com espessura média de  $16\ \mu\text{m}$ , utilizando um micrótomo de deslize horizontal. Os cortes anatômicos foram desidratados em uma série alcoólica, corados com solução de safranina e fixados em lâminas semipermanentes. Com o auxílio do software *Axio-Vision 4.3*, foram efetuadas as medições do diâmetro de 30 poros para cada árvore e a frequência foi mensurada em 5 micrografias por lâmina.

#### **4.4. Carbonização da madeira**

Para carbonização foram retiradas amostras de cada disco ao longo da altura comercial de cada árvore, obtendo-se uma amostra composta que foi seca em estufa, a  $103\pm 2^\circ\text{C}$ , por 24 horas, até massa constante.

As carbonizações foram realizadas em um forno elétrico tipo mufla, utilizando-se aproximadamente 360 g de madeira, que foram inseridas em um recipiente metálico com dimensões nominais de 0,3 m de comprimento, 0,12 m de diâmetro e um volume de aproximadamente  $0,003\ \text{m}^3$ . O controle de aquecimento foi feito manualmente com incrementos de  $50\ ^\circ\text{C}$  a cada 30 minutos, o que corresponde a uma taxa de aquecimento média de  $1,67\ ^\circ\text{C}\ \text{min}^{-1}$ .

A temperatura inicial foi de  $100\ ^\circ\text{C}$  e a temperatura final de  $450\ ^\circ\text{C}$ , sendo estabilizada nesta última por um período de 60 minutos, portanto, o tempo de carbonização foi de 4,5 horas. Determinaram-se os rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, gases condensáveis e não condensáveis, sendo estes últimos obtidos por diferença com base na massa seca de madeira. Os gases condensáveis foram recuperados por meio de um condensador tubular adaptado à porta da mufla.

## **4.5. Propriedades do carvão vegetal**

### **4.5.1. Densidade relativa aparente**

A densidade relativa aparente foi determinada pelo método hidrostático, por meio da imersão em mercúrio, conforme descrito por Vital (1984).

### **4.5.2. Poder calorífico superior (PCS)**

A determinação do poder calorífico superior seguiu a mesma metodologia anteriormente citada para a madeira, descrita na norma EN 14918 (DIN, 2010) utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática.

### **4.5.3. Composição química imediata**

A composição química imediata seguiu a mesma metodologia anteriormente citada para a madeira, descrita pela norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986).

### **4.5.4. Friabilidade**

Para realização do teste de friabilidade utilizou-se 20 g de carvão vegetal, inseridos em um friabilômetro eletrônico (MA-791), com rotação de 31 rpm durante 17 minutos, conforme procedimento do CETEC (1982), com adaptações. Ao fim do teste, separou-se com uma peneira de 9,52 mm a massa que se desprende dos corpos de prova, e foi calculado a friabilidade segundo a fórmula:

$$Friabilidade (\%) = \left( \frac{Massa\ inicial - Massa\ final}{Massa\ inicial} \right) \times 100$$

## **4.6. Análises estatísticas referentes aos genótipos pré-selecionados**

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado, com dezesseis tratamentos (genótipos pré-selecionados), com três repetições (árvores), totalizando quarenta e oito unidades amostrais.

Inicialmente realizou-se uma análise descritiva dos dados, ou seja, um estudo exploratório das propriedades da madeira e do carvão vegetal calculando-se medidas de localização (média, mínimo e máximo) e medidas de



dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação). Para a análise de correlações entre as variáveis procedeu-se o cálculo do coeficiente de correlação linear de *Pearson*. Os procedimentos foram realizados empregando-se o software *GENES* (CRUZ, 2008).

#### **4.6.1. Análises de agrupamento**

Aplicou-se três técnicas de agrupamento para realizar a seleção dos genótipos, sendo elas, a ligação média entre grupos (UPGMA), método de otimização de Tocher e rede neural de Kohonen. Para tanto, procedeu-se o diagnóstico de dependência linear ou multicolinearidade na matriz de correlação residual, dependência essa que pode levar a formação de matrizes singulares ou mal condicionadas. Pois coeficientes de correlação elevados ocasionam a ocorrência da multicolinearidade, recomendando-se descartar as variáveis pertinentes, consideradas redundantes na análise. Para o descarte foram considerados os fatores de inflação da variância, a magnitude dos autovalores e o valor singular, de acordo com Cruz (1997).

As variáveis, também, foram padronizadas, sendo o maior valor considerado igual a um e o menor valor igual à zero, em seguida procedeu-se a computação da matriz de distância ou dissimilaridade entre os genótipos. Foi adotada como medida de dissimilaridade para os métodos de Tocher e UPGMA a distância generalizada de Mahalanobis, para a rede de Kohonen foi utilizada a distância euclidiana (CRUZ et al., 2011).

#### **4.6.2. Método de otimização de Tocher**

O método de Tocher formou um grupo inicial com o par de genótipos mais similares identificados na matriz de dissimilaridade. A partir deste, avaliou-se a possibilidade de inclusão de novos genótipos, adotando-se o critério de que a distância média intragrupo fosse menor que a distância média intergrupo (CRUZ et al., 2011). A análise foi desenvolvida no software *GENES* (CRUZ, 2008).

#### 4.6.3. Método da ligação média entre grupos (UPGMA)

Essa técnica utiliza as médias aritméticas (não ponderadas) das medidas de dissimilaridade, não caracterizando a dissimilaridade por valores extremos (mínimo e máximo) entre os genótipos analisados. A construção do dendrograma foi estabelecida pelos genótipos de maior similaridade. A distância entre um genótipo  $k$  e um grupo, formado pelos genótipos  $i$  e  $j$  é fornecida pela expressão abaixo conforme Cruz et al. (2011):

$$d_{(ij)k} = \text{média} (d_{ik}; d_{jk}) = \frac{d_{ik} + d_{jk}}{2}$$

Resumindo,  $d_{(ij)k}$  é dada pela média do conjunto das distâncias dos pares de genótipos ( $i$  e  $k$ ) e ( $j$  e  $k$ ).

A distância entre dois grupos é dada por:

$$\begin{aligned} d_{(ij)(klm)} &= \text{média} (d_{ik}; d_{il}; d_{im}; d_{jk}; d_{jl}; d_{jm}) \\ &= \frac{d_{ik} + d_{il} + d_{im} + d_{jk} + d_{jl} + d_{jm}}{6} \end{aligned}$$

Ou seja, a distância entre dois grupos, formados respectivamente pelos genótipos ( $i$  e  $j$ ) e ( $k$ ,  $l$  e  $m$ ), foi determinada pela média entre os elementos do conjunto, cujos elementos são distâncias entre pares de genótipos dos grupos.

A qualidade do resultado obtido pelo dendrograma foi avaliada pelo coeficiente de correlação cofenética, que é uma medida da distorção provocada pelo agrupamento. Quanto menor essa correlação, menor será a distorção entre a matriz de distâncias gerada pelo agrupamento e a original (SOKAL; ROHLF, 1962).

A determinação do número de grupos, ou definição do ponto de corte, foi realizada de modo a se obter o mesmo número de grupos formados pelo método de Tocher. A análise foi realizada utilizando o software *GENES* (CRUZ, 2008).

#### 4.6.4. Redes neurais de Kohonen

Para o treinamento da rede foi utilizado o algoritmo batch, sendo consideradas 2000 épocas. O número de neurônios da camada de saída foi determinado utilizando a fórmula heurística proposta por Vesanto et al. (2000):  $5\sqrt{n}$ , em que  $n$  é o número de amostras.

A topologia utilizada foi a hexagonal e a medida de dissimilaridade foi a distância euclidiana. As variáveis de entrada foram as mesmas utilizadas para os demais métodos, sendo aquelas restantes após a exclusão devido ao diagnóstico de multicolinearidade. A análise foi feita no software *GENES* que utilizou o ambiente computacional Matlab para processar a rede.

#### 4.6.5. Fluxograma da análise dos dados do experimento

Segue na Figura 10 um resumo das análises dos dados para pré-seleção e seleção dos genótipos de eucalipto.

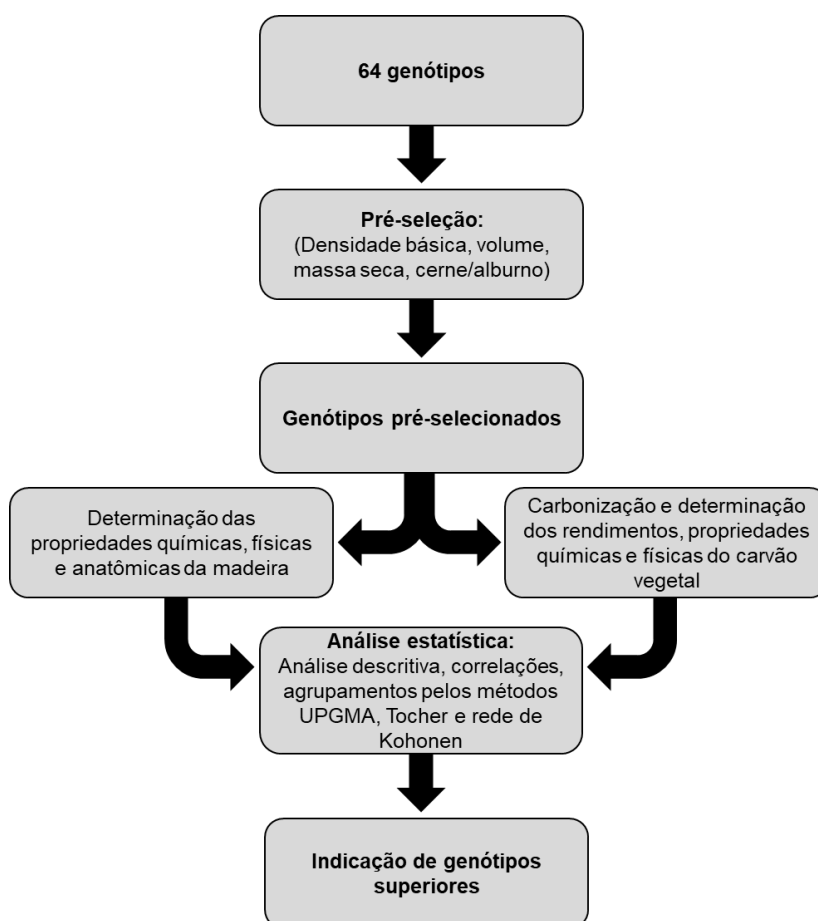


Figura 10. Fluxograma dos procedimentos de pré-seleção e seleção dos genótipos

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Pré-seleção dos genótipos**

Na Tabela 2 são apresentados os valores fenotípicos, assim como os valores genotípicos calculados para as propriedades da madeira dos 64 genótipos utilizados no procedimento de pré-seleção.

A estimativa do valor genotípico, que é o valor fenotípico descontado do efeito ambiental, mostrou uma acurácia média de 93% nas quatro características avaliadas. A alta acurácia significa grande relação entre os valores preditos e os reais, garantindo a segurança na pré-seleção de genótipos superiores (RESENDE; DUARTE, 2007).

Tabela 2. Informações sobre os valores fenotípicos e genotípicos dos parâmetros da madeira em função dos genótipos de eucalipto

GENÓTIPO	VOL		DB		C/A		MS		GENÓTIPO	VOL		DB		C/A		M/S	
	F	G	F	G	F	G	F	G		F	G	F	G	F	G	F	G
24	196	219	570,24	570,89	0,59	0,62	112	126	2494	279	289	537,01	540,35	0,7	0,72	150	158
61	375	368	568,06	568,88	0,72	0,74	213	210	2551	400	389	591,58	590,49	1,48	1,31	236	229
62	249	263	546,26	548,85	1,39	1,37	136	146	2673	499	471	584,31	583,82	1,1	1,10	292	275
157	270	281	544,11	546,88	0,57	0,60	147	155	2808	342	341	517,08	522,05	1,2	1,19	176	179
170	353	350	586,49	585,82	1,49	1,46	209	206	2815	224	243	571,19	571,76	1,48	1,45	128	140
260	240	256	569,00	569,75	0,83	0,84	136	146	2834	304	309	591,63	590,54	1,03	1,03	179	182
297	487	461	577,76	577,80	0,86	0,87	281	265	3068	327	329	602,15	600,20	0,47	0,50	197	197
680	358	354	590,11	589,15	0,7	1,38	211	208	3169	317	320	574,40	574,71	0,78	0,80	182	184
683	418	399	581,67	581,26	0,89	0,90	243	231	3192	356	352	561,44	562,80	1,04	1,04	200	199
685	252	266	587,00	586,29	0,88	0,89	148	156	3206	407	395	552,17	554,29	0,96	0,96	226	220
765	412	399	591,41	590,34	1,58	1,55	244	235	3218	333	334	557,07	558,79	1,5	1,47	186	187
933	170	198	603,57	601,51	0,5	0,54	103	118	3336	330	331	570,55	571,17	1,12	1,11	188	189
934	246	261	553,85	555,83	0,7	0,73	137	147	3370	292	299	571,45	572,00	1,02	1,02	167	172
1177	295	302	580,63	580,43	1,22	1,21	171	175	3375	348	346	530,35	534,23	0,78	0,79	185	186
1178	331	332	596,14	594,68	1,01	1,02	197	197	3403	323	325	540,63	543,69	0,63	0,65	175	178
1198	276	290	541,64	545,92	0,89	0,90	150	160	3420	290	298	558,09	559,73	1,22	1,21	162	167
1230	407	395	537,17	540,50	0,61	0,64	219	215	3421	510	481	554,92	556,81	0,69	0,72	283	267
1246	376	369	543,83	546,62	1,31	1,29	205	203	3430	325	327	589,72	588,79	1,09	1,09	192	192
1453	483	458	602,21	600,26	1,14	1,13	291	274	3466	363	359	533,24	536,89	0,86	0,87	193	193
1543	493	466	587,30	586,56	1,5	1,47	290	273	3616	195	219	558,66	560,25	1,05	1,05	112	126
1633	288	299	626,77	621,08	0,67	0,70	181	184	3633	270	281	595,79	594,36	1,2	1,19	161	167
1774	262	275	679,90	671,64	0,65	0,68	179	182	3645	334	335	551,08	553,28	1,3	1,28	184	186
1781	193	217	640,82	635,73	0,8	0,82	124	136	3908	486	460	559,16	560,71	1,47	1,45	272	258
1792	249	264	655,79	649,49	0,84	0,86	164	169	3942	279	289	577,61	577,66	1,47	1,44	162	167
1841	364	359	607,78	605,38	1,07	1,07	222	217	4007	304	310	537,93	541,20	1,05	1,05	164	169
1883	287	295	581,24	580,99	1,2	1,19	167	172	4254	336	335	549,88	552,18	1,44	1,41	184	186
1886	353	350	602,19	600,24	1,15	1,15	213	209	4296	398	387	610,87	608,21	0,94	0,95	243	234
1923	511	482	604,46	602,32	1,45	1,42	309	289	4384	317	320	566,15	567,13	0,53	0,56	180	182
1954	383	375	620,73	617,27	1,1	1,09	238	230	4392	301	309	603,59	600,62	0,92	0,93	181	184
1980	345	343	602,58	600,60	1,69	1,64	208	206	4393	284	293	574,50	574,80	1,21	1,20	164	169
2361	386	378	562,17	563,47	1,59	1,56	217	213	4409	403	387	581,92	581,48	1,16	1,15	235	225
2402	290	297	641,83	636,66	0,91	0,92	186	188	4410	366	361	566,04	567,02	1,11	1,11	207	205
<b>Acurácia</b>		0,90		0,95		0,96		0,90	<b>Acurácia</b>		0,90		0,95		0,96		0,90

VOL: Volume médio por hectare ( $m^3 ha^{-1}$ ), DB: Densidade básica ( $kg m^{-3}$ ), C/A: Relação cerne/alburno, MS: Massa seca média por hectare ( $t ha^{-1}$ ), F: Valor fenotípico, G: Valor genotípico.

Na Tabela 3 é apresentado o ranqueamento ou ordenamento dos genótipos de acordo com seu valor genotípico para cada variável.

Tabela 3. Ranking dos genótipos para cada variável utilizada na pré-seleção

POSIÇÃO	VOL	DB	C/A	MS	POSIÇÃO	VOL	DB	C/A	MS
GENÓTIPOS					GENÓTIPOS				
1	1923	1774	3068	1923	33	3336	4393	4007	3375
2	3421	1792	933	2673	34	3068	3169	1841	4254
3	2673	2402	4384	1453	35	3430	3370	3430	3645
4	1543	1781	157	1543	36	3403	2815	1954	4392
5	297	1633	24	3421	37	3169	3336	2673	3169
6	3908	1954	1230	297	38	4384	24	4410	1633
7	1453	4296	3403	3908	39	4007	260	3336	4384
8	765	1841	1774	765	40	2834	61	1453	1774
9	683	1923	1633	4296	41	4392	4384	1886	2834
10	3206	933	3421	683	42	1177	4410	4409	2808
11	1230	4392	2494	1954	43	1633	2361	1883	3403
12	2551	1980	934	2551	44	3370	3192	2808	1177
13	4296	1453	61	4409	45	3420	3908	3633	3370
14	4409	1886	3375	3206	46	2402	3616	4393	1883
15	2361	3068	3169	1841	47	1883	3420	3420	4007
16	1954	1178	1781	1230	48	4393	3218	1177	1792
17	1246	3633	260	2361	49	1198	3421	3645	4393
18	61	2834	1792	61	50	2494	934	1246	3420
19	4410	2551	297	1886	51	3942	3206	2551	3942
20	1841	765	3466	680	52	3633	3645	62	3633
21	3466	680	685	170	53	157	4254	680	1198
22	680	3430	1198	1980	54	1774	62	4254	2494
23	3192	1543	683	4410	55	685	157	1923	685
24	170	685	2402	1246	56	1792	1246	3942	157
25	1886	170	4392	3192	57	62	1198	3908	934
26	3375	2673	4296	1178	58	934	3403	2815	260
27	1980	4409	3206	3068	59	260	4007	170	62
28	2808	683	1178	3466	60	2815	1230	3218	2815
29	4254	1883	3370	3430	61	24	2494	1543	1781
30	3645	1177	2834	3336	62	3616	3466	765	24
31	3218	297	3192	2402	63	1781	3375	2361	3616
32	1178	3942	3616	3218	64	933	2808	1980	933

VOL: Volume médio por hectare, DB: Densidade básica, C/A: Relação cerne/alburno, MS: Massa seca média por hectare.

Após o ranqueamento foi efetuado o cálculo da mediana, que é uma medida que divide ao meio um conjunto de dados ordenados, resultando no mesmo número de valores acima e abaixo desse valor (DANCEY; REIDY, 2013).

O cálculo da mediana permitiu estabelecer a classificação de superior ou inferior para cada genótipo e em seguida eles foram organizados em 13 classes (Tabela 4).

Tabela 4. Classes de genótipos formadas a partir da classificação pela mediana

Classes	Caractere			
	Densidade básica	Volume	Massa seca	Relação Cerne/alburno
1	Superior	Superior	Superior	Superior
2	Superior	Superior	Superior	Inferior
3	Superior	Inferior	Superior	Superior
4	Inferior	Superior	Superior	Superior
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	Inferior	Inferior	Inferior	Inferior

Observa-se que os genótipos classificados nas primeiras quatro classes foram mais interessantes para a pré-seleção, uma vez que foram superiores em todos ou pelo menos três caracteres simultaneamente.

Na Tabela 5 é apresentada a classificação proposta pelo índice de Mulamba e Mock (1978), que considera a soma dos ranks correspondentes a cada variável do mesmo genótipo.

Tabela 5. Classificação dos genótipos obtida por meio do índice de seleção de Mulamba e Mock

RANK	GENÓTIPO	RANK	GENÓTIPO	RANK	GENÓTIPO	RANK	GENÓTIPO
1	4296	17	765	33	170	49	3645
2	297	18	1886	34	2834	50	157
3	1453	19	1178	35	3466	51	4254
4	1923	20	3206	36	3375	52	3218
5	3421	21	1774	37	2361	53	260
6	2673	22	2402	38	3336	54	2494
7	1954	23	4392	39	933	55	4393
8	683	24	3908	40	1781	56	934
9	1841	25	680	41	3403	57	2808
10	3068	26	3430	42	1246	58	4007
11	61	27	4384	43	3370	59	1198
12	1543	28	4410	44	685	60	3420
13	1230	29	3169	45	1177	61	3942
14	2551	30	3192	46	1883	62	3616
15	1633	31	1792	47	24	63	2815
16	4409	32	1980	48	3633	64	62

Esse índice permitiu ordenar os genótipos considerando os ganhos positivos em todas as variáveis simultaneamente. No entanto, ressalta-se que esse procedimento pode levar a imprecisões no resultado, uma vez que é influenciado por valores extremos. Por exemplo, um genótipo que é o primeiro no ranking C/A pode estar à frente de outros genótipos que possuem bons valores de DB e VOL, características adotadas como de maior peso no procedimento de pré-seleção dos genótipos.

Logo, além do índice de Mulamba e Mock, também foi interessante observar a posição dos genótipos no ranking individual de cada variável (Tabela 3), bem como a classe a que pertencem (Tabela 4), de modo a realizar uma escolha mais segura de quais genótipos deveriam ser pré-selecionados e seguir para a caracterização completa das propriedades da madeira e do carvão vegetal.

Um resumo da planilha de pré-seleção pode ser observado no apêndice (página 78). Essa planilha permite a visualização conjunta das classificações propostas pelos três critérios (índice de Mulamba e Mock, ranking de cada variável e classes formadas com base na mediana), sendo uma importante ferramenta na pré-seleção dos genótipos.

Foram pré-selecionados dezesseis genótipos, os quais são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Genótipos pré-selecionados

<b>Identificação</b>	<b>Genótipo</b>
0061	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus</i> spp.
0297	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
0683	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>
1178	<i>Eucalyptus grandis</i> x <i>Eucalyptus</i> spp.
1453	<i>Eucalyptus grandis</i>
1841	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
1886	<i>Eucalyptus urophylla</i>
1923	<i>Eucalyptus urophylla</i>
1954	<i>Eucalyptus urophylla</i>
2402	<i>Eucalyptus urophylla</i>
2551	<i>Eucalyptus urophylla</i>
2673	<i>Eucalyptus urophylla</i>
3068	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>
3421	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>
4296	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>
4409	<i>Eucalyptus urophylla</i> x <i>Eucalyptus grandis</i>

Na Tabela 7 são apresentadas as médias gerais da densidade básica, volume, massa seca e relação cerne/alburno para todos os genótipos, antes da pré-seleção e para o conjunto de genótipos que foram pré-selecionados.



Tabela 7. Valores médios de densidade básica, volume, massa seca e relação cerne/alburno do total de genótipos e daqueles que foram pré-selecionados

	Densidade básica (kg m <sup>-3</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Massa seca (t ha <sup>-1</sup> )	Cerne/alburno
<b>Média 64</b>	578	335	194	1,04
<b>CV (%)</b>	5,42	24,07	24,32	30,18
<b>Média 16</b>	596	408	242	1,00
<b>CV (%)</b>	3,53	17,28	15,73	24,48

Média 64: Médias gerais para os 64 genótipos antes da pré-seleção; Média 16: Médias gerais para os 16 genótipos pré-selecionados; CV (%): coeficiente de variação.

Como observado na Tabela 7, os valores médios da densidade básica, volume e massa seca por hectare dos genótipos pré-selecionados foram maiores e a relação C/A menor, quando comparados com os valores verificados para o conjunto de 64 genótipos, anteriormente a pré-seleção. Esse fato indica que o método de pré-seleção foi eficiente, proporcionando a escolha de genótipos com ganhos nas quatro características simultaneamente. Isso é interessante, visto que, para a produção de carvão vegetal é desejável que a madeira de eucalipto apresente maiores valores de densidade básica e volume, concomitante a uma menor relação cerne/alburno.

## 5.2. Análise descritiva e grau de associação das variáveis da madeira e do carvão vegetal

Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados os resultados das análises descritivas e correlações entre as propriedades da madeira e carvão vegetal, respectivamente.

Tabela 8. Análise descritiva das propriedades da madeira e carvão vegetal

<b>Parâmetro</b>	<b>Média</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Coefficiente de variação (%)</b>
<b>Propriedades da madeira</b>					
Densidade básica (kg m <sup>-3</sup> )	596	641,83	554,92	21,00	3,53
Volume (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	408	511,39	289,64	70,54	17,28
Relação cerne/alburno	1,00	1,45	0,47	0,24	24,48
Massa seca (t ha <sup>-1</sup> )	242	309,11	186,25	38,13	15,73
Teor de voláteis (%)	86,01	87,48	84,38	0,73	0,85
Teor de cinzas (%)	0,14	0,23	0,07	0,04	31,79
Teor de carbono fixo (%)	13,86	15,52	12,29	0,75	5,42
Teor de extrativos (%)	5,92	8,65	2,31	1,75	29,62
Teor de lignina (%)	29,92	32,19	27,73	1,31	4,39
Teor de holocelulose (%)	64,02	67,11	61,22	1,79	2,80
Poder calorífico superior (kcal kg <sup>-1</sup> )	4664	4707	4620	23,18	0,50
Teor de nitrogênio (%)	0,72	0,82	0,59	0,05	7,23
Teor de carbono (%)	50,21	50,61	49,69	0,28	0,55
Teor de hidrogênio (%)	6,30	6,36	6,21	0,04	0,68
Teor de enxofre (%)	0,001	0,002	0,000	0,0003	18,84
Teor de oxigênio (%)	42,77	43,32	42,36	0,29	0,68
Massa residual 450 °C (%)	23,41	25,31	21,02	1,35	5,77
Comprimento de fibras (mm)	1,01	1,08	0,93	0,05	4,52
Diâmetro do lume das fibras (µm)	7,01	8,35	5,61	0,66	9,45
Fração parede fibras (%)	63,08	68,16	58,30	2,20	3,48
Diâmetro de lume dos poros (µm)	132,74	158,64	106,83	13,65	10,29
Frequência de poros (poros mm <sup>-2</sup> )	8,15	10,51	6,47	1,17	14,31
<b>Propriedades do carvão</b>					
Poder calorífico superior (kcal kg <sup>-1</sup> )	7074	7329	6830	127,89	1,81
Densidade aparente (kg m <sup>-3</sup> )	396	486	342	37,96	9,58
Friabilidade (%)	6,94	8,75	3,82	1,28	18,51
Rendimento gravimétrico carvão vegetal (%)	34,86	35,78	33,86	0,59	1,70
Rendimento gravimétrico gases condensáveis (%)	48,30	49,14	46,62	0,76	1,57
Rendimento gravimétrico gases não condensáveis (%)	16,84	17,79	16,31	0,45	2,65
Teor de voláteis (%)	28,15	30,02	25,95	1,09	3,87
Teor de cinzas (%)	0,36	0,58	0,20	0,11	31,93
Teor de carbono fixo (%)	71,49	73,68	69,78	1,03	1,44

Tabela 9. Correlação entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal dos genótipos de eucalipto

	Db	Vol	C/A	Ms	Tvma	Cfma	Ext	Lig	Holo	PCS mad	N	C	H	O	Mr	Cpfib	Dlfib	Fpfib	Dlpr	Fqpr	PCS cv	DA	Friab	Rgcv	Rggc	Rgnc	Tvcv	Cfcv	
<b>Db</b>	1																												
<b>Vol</b>	-0,55	1																											
<b>C/A</b>	0,26	0,25	1																										
<b>Ms</b>	-0,38	<b>0,98*</b>	0,36	1																									
<b>Tvma</b>	-0,23	0,18	0,06	0,15	1																								
<b>Cfma</b>	0,23	-0,17	-0,05	-0,14	<b>-1,00*</b>	1																							
<b>Ext</b>	<b>0,57*</b>	-0,15	0,37	-0,02	-0,36	0,36	1																						
<b>Lig</b>	-0,19	0,37	0,02	0,35	-0,26	0,26	-0,34	1																					
<b>Holo</b>	-0,42	-0,13	-0,37	-0,23	<b>0,53*</b>	<b>-0,53*</b>	<b>-0,73*</b>	-0,40	1																				
<b>PCS mad</b>	0,44	-0,01	0,17	0,09	-0,23	0,23	0,21	0,38	-0,49	1																			
<b>N</b>	-0,11	-0,02	<b>-0,53*</b>	-0,07	-0,21	0,20	-0,35	0,43	0,03	-0,15	1																		
<b>C</b>	0,08	-0,16	-0,28	-0,16	<b>-0,64*</b>	<b>0,64*</b>	-0,04	0,43	-0,27	<b>0,58*</b>	0,29	1																	
<b>H</b>	0,17	0,24	0,17	0,28	0,11	-0,11	0,11	0,25	-0,29	-0,05	0,15	-0,31	1																
<b>O</b>	-0,08	0,12	0,34	0,13	<b>0,64*</b>	<b>-0,64*</b>	0,09	<b>-0,53*</b>	0,30	<b>-0,53*</b>	-0,48	<b>-0,97*</b>	0,11	1															
<b>Mr</b>	0,12	-0,35	-0,39	-0,36	-0,48	0,48	0,17	-0,07	-0,11	0,27	-0,10	<b>0,63*</b>	<b>-0,54*</b>	<b>-0,50*</b>	1														
<b>Cpfib</b>	-0,38	0,30	0,23	0,25	0,15	-0,17	-0,34	0,21	0,17	-0,19	0,04	-0,27	-0,16	0,27	-0,13	1													
<b>Dlfib</b>	<b>-0,51*</b>	<b>0,62*</b>	0,35	<b>0,59*</b>	0,17	-0,16	-0,20	0,11	0,11	-0,05	-0,08	0,03	-0,07	-0,01	-0,32	0,11	1												
<b>Fpfib</b>	0,46	<b>-0,64*</b>	-0,47	<b>-0,62*</b>	-0,24	0,22	0,14	-0,29	0,07	-0,12	0,18	-0,05	0,13	0,00	0,25	-0,14	<b>-0,85*</b>	1											
<b>Dlpr</b>	0,08	0,27	0,30	0,31	-0,33	0,33	0,38	0,22	<b>-0,53*</b>	0,23	0,12	0,18	0,04	-0,21	0,04	0,12	0,02	-0,25	1										
<b>Fqpr</b>	0,07	-0,44	-0,26	-0,46	0,22	-0,23	-0,32	-0,33	<b>0,55*</b>	-0,21	-0,14	-0,15	-0,19	0,20	0,08	-0,03	-0,12	0,36	<b>-0,95*</b>	1									
<b>PCS cv</b>	-0,07	-0,16	0,09	-0,18	-0,17	0,19	-0,36	0,18	0,23	-0,17	0,31	0,15	-0,12	-0,18	-0,31	-0,08	0,17	-0,16	-0,13	0,15	1								
<b>DA</b>	<b>0,56*</b>	-0,37	-0,28	-0,30	0,10	-0,10	0,09	-0,25	0,09	0,28	-0,08	0,04	0,12	-0,05	0,35	-0,36	<b>-0,53*</b>	<b>0,54*</b>	-0,10	0,16	-0,43	1							
<b>Friab</b>	-0,03	0,13	-0,03	0,15	-0,33	0,37	0,29	-0,15	-0,15	-0,24	-0,11	0,14	0,05	-0,11	0,41	-0,14	-0,15	0,07	0,30	-0,30	-0,13	0,01	1						
<b>Rgcv</b>	0,33	-0,05	0,31	0,04	<b>-0,53*</b>	<b>0,51*</b>	<b>0,55*</b>	0,19	<b>-0,68*</b>	<b>0,59*</b>	-0,20	0,46	-0,27	-0,37	<b>0,54*</b>	0,14	-0,01	-0,12	0,39	-0,27	-0,30	0,02	0,02	1					
<b>Rggc</b>	-0,12	-0,17	-0,23	-0,22	<b>0,51*</b>	<b>-0,50*</b>	-0,49	-0,26	<b>0,66*</b>	-0,43	0,09	-0,37	0,29	0,30	-0,36	0,06	-0,24	0,36	-0,40	0,35	0,18	0,12	0,06	<b>-0,81*</b>	1				
<b>Rgnc</b>	-0,23	0,35	-0,02	0,33	-0,16	0,17	0,09	0,19	-0,22	-0,05	0,11	0,02	-0,13	-0,01	-0,11	-0,29	0,42	-0,45	0,16	-0,24	0,10	-0,24	-0,13	0,04	<b>-0,62*</b>	1			
<b>Tvcv</b>	-0,15	0,21	0,08	0,19	-0,14	0,11	0,32	-0,05	-0,29	-0,19	0,09	-0,29	0,14	0,24	-0,31	0,32	0,07	0,14	0,03	-0,05	-0,17	-0,42	-0,27	0,18	-0,17	0,05	1		
<b>Cfcv</b>	0,19	-0,24	-0,04	-0,22	0,13	-0,10	-0,29	0,01	0,29	0,23	-0,14	0,29	-0,15	-0,23	0,31	-0,33	-0,07	-0,13	-0,05	0,08	0,18	0,42	0,24	-0,15	0,17	-0,08	<b>-1,0*</b>	1	

Correlações significativas a 5%\* pelo teste *t*.

Em que: (Db) densidade básica da madeira; (Vol) volume de madeira; (C/A) relação cerne/alburno da madeira; (Ms) massa seca de madeira; (Tvma) teor de voláteis da madeira; (Cfma) teor de carbono fixo da madeira; (Ext) teor de extrativos da madeira; (Lig) teor de lignina da madeira; (Holo) teor de holocelulose da madeira; (PCSmad) poder calorífico superior da madeira; (N) teor de nitrogênio da madeira; (C) teor de carbono da madeira; (H) teor de hidrogênio da madeira; (O) teor de oxigênio da madeira; (Mr) massa residual a 450 °C na análise termogravimétrica da madeira; (Cpfib) comprimento médio das fibras da madeira; (Dlfib) diâmetro médio do lume das fibras da madeira; (Fpfib) fração parede média das fibras da madeira; (Dlpr) diâmetro médio do lume dos poros da madeira; (Fqpr) frequência média de poros da madeira; (PCS cv) poder calorífico superior do carvão vegetal; (DA) densidade aparente do carvão vegetal; (Friab) friabilidade do carvão vegetal, (Rgcv) rendimento gravimétrico em carvão vegetal; (Rggc) rendimento gravimétrico em gases condensáveis; (Rgnc) rendimento gravimétrico em gases não condensáveis; (Tvcv) teor de voláteis do carvão vegetal; (Cfcv) teor de carbono fixo do carvão vegetal.

A densidade básica média dos genótipos foi de 596 kg m<sup>-3</sup>, sendo o maior valor verificado para o clone 2402 (*Eucalyptus urophylla*) e o menor para o clone 3421 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*). Trugilho et al. (2001) e Santos et al. (2011a) ao avaliarem o potencial energético de clones de eucalipto aos 7 anos de idade, encontraram valores entre 550 e 590 kg m<sup>-3</sup>, menores que a média verificada nesse trabalho. Os autores recomendam que sejam utilizadas para a produção de carvão vegetal para uso siderúrgico, madeiras com valores de densidade básica superiores a 500 kg m<sup>-3</sup>, sendo assim, todos os genótipos do presente estudo podem ser considerados de bom potencial para essa finalidade, de acordo com essa propriedade.

Para Pereira et al. (2016) a densidade básica é um dos principais parâmetros a ser avaliado quando se deseja selecionar genótipos de eucalipto para a produção de carvão vegetal, pois madeiras com densidade elevada proporcionam maior produtividade do forno para um determinado volume de madeira enforada.

Foram observadas correlações positivas e significativas da densidade básica com o teor de extrativos da madeira e densidade aparente do carvão vegetal. Segundo Trugilho et al. (1996) a densidade básica é afetada por alguns tipos de extrativos, principalmente os de elevada massa molecular. Protásio et al. (2012), também observaram a mesma tendência, indicando ganhos em densidade básica da madeira com o aumento dos valores de teor de extrativos.

Segundo Pereira et al. (2016), visando o uso siderúrgico, ao se utilizar clones com maior densidade básica será produzido carvão vegetal de maior densidade aparente e maior será quantidade de carbono por volume de carvão, reduzindo o consumo desse insumo nos altos-fornos.

Uma correlação negativa foi observada entre a densidade básica da madeira e o diâmetro do lume das fibras, que por sua vez também se correlacionou negativamente com a fração parede. Maior valor de diâmetro de lume implica em uma menor fração parede e conseqüentemente, maior quantidade de espaços vazios e menor quantidade de massa seca de madeira em um mesmo volume, acarretando em redução na densidade básica da madeira.

Observou-se também correlações significativas do volume com o diâmetro do lume e a fração parede das fibras, sendo essas positiva e negativa respectivamente. Quando o aumento no volume é acompanhado de aumento nos diâmetros do lume e redução dos valores de fração parede das fibras, não é interessante para a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico, uma vez que essas relações acarretam em menor densidade básica da madeira.

Não há uma regra geral no que diz respeito a correlação entre o volume e a densidade básica da madeira. Segundo Barnett e Jeronimidis (2009) altas taxas de crescimento podem promover a produção de madeira de baixa densidade, mas também é possível selecionar genótipos com elevadas taxas de crescimento e alta densidade. Neste estudo apesar de ter se verificado correlações negativas da densidade básica com o volume e a massa seca de madeira, elas não foram significativas ao nível de 5%, resultados semelhantes aos obtidos por Vital e Della Lucia (1980). Esses autores também observaram elevada correlação positiva do volume com a massa seca de madeira, inferindo que, de modo geral, como o aumento de volume é maior que a redução da densidade, árvores de maior volume produzem maior quantidade de massa seca, o que também pode ser observado no presente estudo.

Foi verificado um valor médio de massa seca de madeira de 242 t ha<sup>-1</sup> para os genótipos avaliados. O genótipo que proporcionou o melhor resultado foi o 1923 (*Eucalyptus urophylla*). Isto ocorre porque o volume médio deste genótipo é o maior entre os que foram pré-selecionados, além da sua elevada densidade básica. O menor valor para essa propriedade foi verificado no clone 2402 (*Eucalyptus urophylla*), que apesar de ser o genótipo de maior densidade básica, é também o de menor volume.

A determinação da massa seca é importante, porque maior quantidade de massa seca de madeira associada a um bom rendimento gravimétrico em carvão vegetal, irá proporcionar maior quantidade de carvão produzido, o que evidencia a necessidade de se considerar também a produtividade volumétrica, além da densidade básica na pré-seleção de genótipos. De acordo com Ferreira et al. (2017), quanto maior a produtividade de matéria seca, maior o potencial do material considerando o seu uso para energia.

A composição química imediata da madeira dos genótipos pré-selecionados, foram em média, 86,01, 0,14 e 13,86% para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, respectivamente.

Observou-se que os teores de voláteis e carbono fixo da madeira correlacionaram-se com os rendimentos gravimétricos em gases condensáveis e em carvão vegetal. Sendo que, um maior teor de componentes voláteis na madeira implica em um maior rendimento gravimétrico em gases condensáveis e conseqüentemente menor rendimento em carvão vegetal. Enquanto um maior teor de carbono fixo da madeira contribui para um maior rendimento em carvão vegetal e menor quantidade de gases condensáveis. De acordo com Leite et al. (2015), como o teor de carbono fixo é obtido por diferença, a sua relação com o teor de voláteis é inversa.

Também foi observada relação inversamente proporcional entre os teores de voláteis e carbono fixo da madeira com os teores de holoceluloses, carbono e oxigênio da madeira. Maiores teores de oxigênio são encontrados na constituição química das holoceluloses, as quais são degradadas a baixas temperaturas (CASTRO, 2011; STEFANIDIS et al., 2014). Desta forma, o teor de voláteis é diretamente proporcional ao teor de holoceluloses e oxigênio, e inversamente ao teor de carbono elementar. Por sua vez, o carbono está mais concentrado na lignina, que contém 63%, contra 42% desse elemento nas holoceluloses (STEFANIDIS et al., 2014). Por ser mais estável termicamente o teor de carbono elementar afeta positivamente o teor de carbono fixo da madeira.

Ao selecionar genótipos visando a carbonização, são mais interessantes aqueles com menores teores de voláteis e cinzas e maior teor de carbono fixo, pois os compostos voláteis têm como característica promover uma queima muito rápida dos combustíveis (SANTOS et al., 2011b), já maiores quantidades de cinzas são indesejáveis uma vez que não participam da combustão, reduzem o poder calorífico e podem causar desgastes no alto-forno, além de comprometer a qualidade do ferro-gusa com formação de trincas e fissuras (SANTOS et al., 2016).

Maior quantidade de carbono fixo é recomendada devido a maior estabilidade térmica conferida a madeira (SANTOS et al., 2011b). Segundo

Juizo et al. (2017) maior teor de carbono fixo da madeira está diretamente relacionado a um bom rendimento em carvão vegetal.

Foram observados valores médios de 64% para o teor de holoceluloses, 30% para lignina total e 6% para extrativos totais. Sendo que, o maior coeficiente de variação foi verificado para o teor de extrativos, com 30%. Isso ocorre porque a concentração desses compostos na madeira varia, entre outros fatores, em função da espécie, tratos silviculturais, idade e processo de cernificação (SOARES et al., 2015).

O teor de holocelulose se correlacionou positivamente com fração parede das fibras e rendimento gravimétrico em gases condensáveis. Entretanto, com as variáveis diâmetro do lume dos poros, teor de extrativos da madeira e rendimento gravimétrico em carvão vegetal, foi verificada correlação negativa.

Observando as curvas de TGA/DTG mostradas no apêndice (páginas 79 e 80), constata-se que para a madeira dos genótipos estudados a degradação da celulose ocorreu na faixa de temperatura entre 300 e 400 °C, corroborando com Stefanidis et al. (2014) que observaram a decomposição da celulose entre 280 e 360 °C. Os autores também observaram a degradação das hemiceluloses na faixa de 200 a 320 °C. Desta forma, por degradarem-se a temperaturas inferiores a temperatura final de carbonização, esses componentes contribuem pouco para o rendimento em carvão vegetal, afetando a formação dos gases condensáveis e não condensáveis.

A correlação positiva da holocelulose com a fração parede é explicada pelo fato que a celulose e as hemiceluloses são os principais constituintes da madeira, sendo os polissacarídeos formadores da parede celular (BARNETT; JERONIMIDIS, 2009). O que explica também a relação inversa do teor de holocelulose com o diâmetro do lume das fibras.

A lignina é o composto mais importante para produção de carvão, pois contribui para o rendimento gravimétrico, devido ao fato de ter uma estrutura aromática e de elevada massa molar que lhe confere maior estabilidade térmica em relação as holoceluloses (BARNETT; JERONIMIDIS, 2009; SANTOS et al., 2016). Segundo Yang et al. (2007), sua decomposição acontece lentamente entre 100 e 900 °C. Uma outra vantagem é que maiores percentuais de lignina na madeira implicam na obtenção de um carvão com

maior teor de carbono fixo, pois a lignina da madeira de folhosas possui cerca de 60% de carbono elementar (VELOSO et al., 1993; SANTOS et al., 2016).

Os extrativos são compostos de diferentes naturezas químicas, entre os quais se encontram os polifenóis, óleos, gorduras, gomas, resinas, ceras e amidos (SANTOS, 2010). Verificou-se uma correlação positiva entre o teor de extrativos da madeira e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Resultado semelhante foi obtido por Santos et al. (2011a), que atribuíram este fato a composição química de alguns extrativos, a qual promove maior estabilidade térmica a esses compostos, contribuindo para o maior rendimento gravimétrico.

Segundo Frederico (2009) os extrativos de natureza fenólica, por serem ricos em carbono, contribuem para o maior poder calorífico da madeira, sendo que, se não forem degradados durante a carbonização também podem aumentar o poder calorífico do carvão e o rendimento gravimétrico.

Segundo Santos et al. (2016) e Soares et al. (2015) a energia liberada durante a combustão da madeira é em grande parte devido a degradação de ligações entre átomos de H e C, o que explica a correlação positiva entre o teor de carbono e o poder calorífico superior da madeira.

Também foi constatada correlação positiva do PCS da madeira com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Isso provavelmente é reflexo do efeito do teor de carbono da madeira sobre a geração de energia e sua resistência a degradação térmica. Pois o aumento da quantidade de carbono elementar influenciou positivamente os valores de PCS e o teor de carbono fixo da madeira, esse último, que por sua vez teve uma correlação positiva com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal.

Os teores médios de carbono, oxigênio e hidrogênio foram iguais a 50,21, 42,77 e 6,30%, respectivamente. Já o percentual de enxofre foi de 0,001% enquanto o de nitrogênio foi de 0,72%. A análise da composição química elementar evidenciou uma grande homogeneidade entre os genótipos, sendo que o maior coeficiente de variação foi verificado para o teor de enxofre, com 18,84%. Porém, foram constatados apenas traços mínimos, em média 0,001% de enxofre em alguns genótipos.

A massa residual, que consiste na porcentagem de massa restante após a degradação térmica da madeira até 450 °C, é um parâmetro importante, pois



ao se relacionar essa variável a uma maior resistência a degradação da madeira quando submetida a temperaturas elevadas, é possível inferir sobre o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (SANTOS et al., 2012).

Observou-se correlação positiva dessa propriedade com o teor de carbono elementar da madeira e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, o que evidencia que madeiras com maior teor de carbono são mais resistentes a degradação térmica, resultando em maior massa residual e promovendo maior rendimento em carvão vegetal, corroborando com o que foi constatado por Santos et al. (2012).

Foram observadas correlações negativas entre os teores de hidrogênio e oxigênio da madeira com a massa residual, isso se deve a degradação da celulose e hemiceluloses em temperaturas inferiores a 450 °C.

A mensuração das dimensões das fibras e poros, assim como a avaliação da relação entre esses parâmetros morfológicos e as possíveis utilizações da madeira, são importantes para a seleção de genótipos para produção de carvão vegetal (PEREIRA et al., 2016).

Foram observadas correlações negativas entre o diâmetro do lume e a fração parede das fibras e densidade aparente do carvão vegetal. Como já demonstrado anteriormente, ao explicar a relação dessa propriedade com a densidade básica, maiores diâmetros do lume das fibras equivalem a uma maior quantidade de espaços vazios na madeira e conseqüentemente menor quantidade de parede celular, ou seja, menor fração parede. Dessa forma, também há menos massa de madeira enforada, implicando em menor quantidade de massa de carvão produzida, além de baixa densidade aparente.

Segundo Costa et al. (2017) a fração parede das fibras afeta sua densidade. No presente estudo não foi verificada correlação entre a fração parede e a densidade básica da madeira. Porém, de acordo com Paula (2005) madeiras com fração parede acima dos 60%, são recomendadas para produção de carvão. Sendo assim, somente o clone 1923 (*Eucalyptus urophylla*) ficou abaixo dessa recomendação, com 58,30%.

As correlações entre a fração parede, o volume e a massa seca de madeira foram negativas. Para os genótipos com os maiores valores de volume de madeira, também foram observados os maiores diâmetros de lume de fibras, o que explica a correlação negativa entre o volume e a fração parede

das fibras. Além disso, o cálculo da massa seca de madeira teve grande influência do volume, isso pode ser constatado pela elevada correlação observada entre essas propriedades. Dessa forma, a correlação negativa do volume com a fração parede influenciou para que a correlação entre a fração parede das fibras e a massa seca de madeira, também, fosse negativa.

O diâmetro do lume e a frequência de poros tiveram uma elevada correlação negativa. Essa relação também foi verificada por Pereira et al. (2016), que observaram ainda a correlação significativa e negativa da densidade básica com o diâmetro e positiva com a frequência de poros, indicando que madeiras com elevadas frequências de poros de menor diâmetro apresentaram os maiores valores de densidade. Porém, neste estudo não foram constatadas correlações entre essas propriedades e a densidade básica da madeira.

Também foi verificado que o diâmetro do lume e a frequência de poros correlacionaram-se negativa e positivamente com o teor de holocelulose da madeira, respectivamente.

Observaram-se valores médios entre 6830 e 7329 kcal kg<sup>-1</sup> do poder calorífico superior do carvão vegetal, com coeficiente de variação de 1,81%. Esses resultados estão de acordo com os encontrados na literatura para o carvão vegetal oriundo da madeira de eucalipto (SOARES et al., 2015; TRUGILHO et al., 2015). Segundo Santos et al. (2011a) o poder calorífico do carvão vegetal para uso siderúrgico deve ser o maior possível, porque haverá menor consumo de insumo redutor, considerando uma mesma produtividade.

A madeira contém maior quantidade de ligações químicas do tipo C-C, H-O e C-O, que possuem energias de ligação de 348, 463 e 360 kJ mol<sup>-1</sup>, respectivamente, enquanto a de uma ligação C=C é de 518 kJ mol<sup>-1</sup>. Durante a carbonização a celulose e as hemiceluloses, que são compostos que contém carbonos saturados (C-C), são degradadas. As estruturas que contém carbonos insaturados (C=C), como os anéis aromáticos da lignina que são mais resistentes a degradação térmica, são preservadas. O teor de oxigênio elementar é reduzido em cerca de 70% após a pirólise (SOARES et al., 2015). Além disso, ocorre a concentração do carbono, o que ocasiona aumento poder calorífico do carvão vegetal em relação a madeira.

De acordo com Protásio et al. (2014) é importante determinar a densidade aparente do carvão, uma vez que carvões com maiores densidades terão maior resistência mecânica e maior estoque de carbono fixo do carvão vegetal por unidade de volume.

Segundo Carneiro et al. (2016) a densidade aparente do carvão está diretamente relacionada com a densidade da madeira de origem, o que foi comprovado nesse trabalho pela correlação positiva observada entre essas variáveis.

Também foram observadas as correlações da densidade aparente com a fração parede e com o diâmetro do lume das fibras, que foram positiva e negativa, respectivamente. Menores valores de diâmetro de lume e maiores percentuais de fração parede das fibras, são associados a madeiras de maior densidade básica, que originam carvões de maior densidade aparente. Pereira et al. (2016) verificaram correlações da densidade aparente com a fração parede e o diâmetro de lume das fibras semelhantes as observadas nesse estudo.

A tendência do carvão vegetal em formar finos quando submetido a um esforço mecânico é representada pela friabilidade. Nota-se que, nesse estudo a friabilidade do carvão variou entre 3,82 e 8,75%. De acordo com a classificação proposta por Mendes et al. (1982), para as amostras de carvão que forem observados percentuais de perdas no formato de finos (abaixo de 20 mm), inferiores a 10%, essas devem ser consideradas como muito pouco friáveis. Observa-se que todos os genótipos se enquadraram nessa classe, demonstrando uma boa resistência mecânica dos carvões.

Segundo Pereira et al. (2013) a friabilidade do carvão vegetal é afetada pela relação C/A da madeira. Porém, no presente estudo não foi verificada correlação significativa entre a relação C/A e a friabilidade do carvão vegetal.

Carneiro et al. (2016) ressaltam que o rendimento gravimétrico em carvão depende tanto das variáveis inerentes à própria madeira quanto das condições da carbonização.

Foram verificadas correlações negativas entre o rendimento gravimétrico em carvão e o rendimento em gases condensáveis, assim como entre os rendimentos em gases não condensáveis e gases condensáveis. Estas relações já estão bem estabelecidas na literatura e podem ser explicadas pelo

fato de uma maior degradação térmica da madeira promover uma maior desvolatilização e menor rendimento gravimétrico (CARNEIRO et al., 2016; SOLAR et al., 2016; JESUS et al., 2017).

Segundo Solar et al. (2016) o teor de carbono fixo do carvão vegetal é influenciado pela taxa de aquecimento e temperatura do forno durante a carbonização. Além disso, há influência da matéria prima, principalmente do teor de lignina, que devido a alta estabilidade térmica e elevado teor de carbono contribui para o aumento do teor de carbono fixo no carvão vegetal.

Foi verificada uma correlação negativa entre o teor de carbono fixo e teor de voláteis do carvão vegetal. Maiores teores de materiais voláteis estão associados a menores rendimentos em carbono fixo e maiores rendimentos gravimétricos (CARNEIRO et al., 2016; SOLAR et al., 2016). Assim, é necessário ter um equilíbrio entre a taxa de aquecimento e temperatura final da carbonização, a fim de obter valores satisfatórios de rendimento gravimétrico e carbono fixo.

Altos teores de cinzas no carvão reduzem o seu poder calorífico superior, além disso, causam desgaste no alto-forno e afetam a qualidade do ferro-gusa com formação de trincas e fissuras (PEREIRA et al., 2012).

O teor de cinzas observado no carvão, independente do genótipo, ficou abaixo de 1,0%, valor sugerido por Santos et al. (2011a) como sendo recomendável para o uso siderúrgico.

### **5.3. Análises de agrupamento**

#### **5.3.1. Método de Tocher e método da ligação média entre grupos (UPGMA)**

Após o diagnóstico de multicolinearidade, constatou-se que dentre as trinta e uma variáveis estudadas, entre propriedades da madeira e do carvão vegetal, o teor de oxigênio, a massa seca, o rendimento gravimétrico em gases condensáveis, o teor de holocelulose, o teor de carbono fixo do carvão vegetal, o teor de carbono fixo da madeira e a fração parede das fibras, constituíam colinearidade severa de acordo com Montgomery e Peck (1981) citados por Cruz (1997), ou seja, havia dependência na matriz de correlações residuais, podendo comprometer a aplicação das técnicas de agrupamento. Decidiu-se

então pelo descarte dessas variáveis e realizou-se um novo diagnóstico, visto que as vinte e quatro características restantes apresentaram colinearidade fraca.

Também foram excluídos os teores de cinzas da madeira e do carvão, com valores abaixo de 1,0%, que de acordo com Santos et al. (2011) é satisfatório para o uso siderúrgico. Além do teor de enxofre da madeira, para o qual foi observado apenas em alguns genótipos o valor médio de 0,001%, sendo que, segundo Obernberger et al. (2006) os problemas com emissões de óxidos de enxofre podem ocorrer quando o percentual de S no combustível se encontra acima de 0,2% em massa de combustível (massa seca). De forma que essas variáveis não são critérios de seleção prioritários.

Assim, após o descarte restaram vinte e uma variáveis, as quais foram utilizadas nas análises de agrupamento.

Na Tabela 10 estão apresentados os genótipos que constituem os grupos formados por meio do método de Tocher.

Tabela 10. Agrupamento dos dezesseis genótipos de eucalipto pelo método de Tocher, utilizando a distância de Mahalanobis, obtida por meio das variáveis padronizadas da madeira e carvão vegetal

Grupos	Método de otimização de Tocher						
	Genótipos						
1	1453	1954	1886	4409	1923	2551	1841
2	297	2673	683				
3	61	1178					
4	2402	3068					
5	4296						
6	3421						

Por meio do método de Tocher (Tabela 10) foi observado a formação de grupos de genótipos homogêneos intragrupo e com maior heterogeneidade entre os grupos, além disso, os indivíduos foram agrupados mantendo o critério de que as distâncias intragrupos fossem menores do que as intergrupos.

A Figura 11 contém o dendrograma construído por meio do método UPGMA.

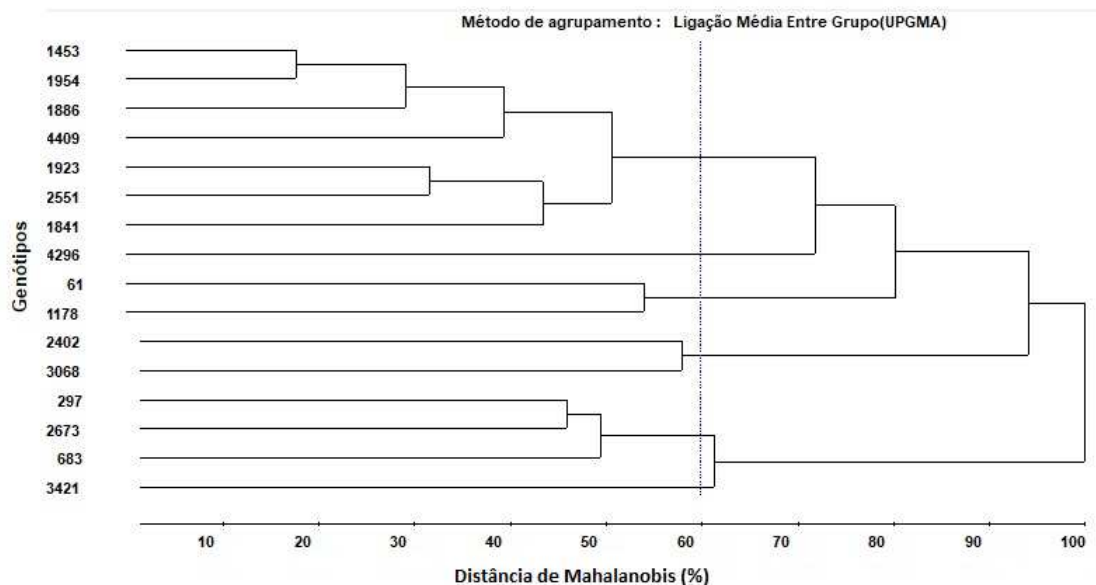


Figura 11. Dendrograma obtido pelo método UPGMA, utilizando a distância de Mahalanobis, obtida por meio das variáveis padronizadas da madeira e carvão vegetal.

Ao analisar o dendrograma, observa-se que a linha de corte feita a 60% do total da distância de Mahalanobis, determinou a formação de seis grupos distintos. O primeiro constituído pelos genótipos 1453, 1954, 1886, 4409, 1923, 2551 e 1841, o segundo pelos genótipos 297, 2673 e 683, o terceiro pelos genótipos 61 e 1178, o quarto pelos genótipos 3068 e 2402, o quinto e o sexto grupo apenas pelos genótipos 4296 e 3421, respectivamente.

O coeficiente de correlação cofenética ( $r$ ) foi igual a 0,60, indicando ajuste razoável entre a representação gráfica das distâncias e sua matriz original, permitindo fazer inferências por meio da avaliação visual do dendrograma.

Verifica-se que os grupos formados pelos dois métodos foram semelhantes, apesar dos diferentes critérios de agrupamento utilizados por essas técnicas. De acordo com Bertan et al. (2006) e Cargnelutti Filho et al. (2008) esse fato proporciona ao pesquisador fazer inferências mais seguras sobre as distâncias entre os genótipos avaliados.

Segundo Bertan et al. (2006) uma vantagem do método UPGMA em relação ao de Tocher, é permitir a visualização dos genótipos mais similares em função da apresentação das distâncias no dendrograma, principalmente no que se refere as menores distâncias, que no método de Tocher se encontram

em um grupo constituído por vários genótipos, não sendo possível observar a diferença de similaridade intragrupo.

### 5.3.2. Redes neurais de Kohonen

Na Figura 12 pode-se observar o mapa de rótulos, que mostra qual genótipo está associado a cada neurônio (hexágono). Nesse mapa é possível inferir que os genótipos que se agruparam nos mesmos neurônios são os mais similares entre si, uma vez que cada neurônio aprende mais sobre os mesmos padrões das variáveis de entrada (Propriedades da madeira e do carvão vegetal).

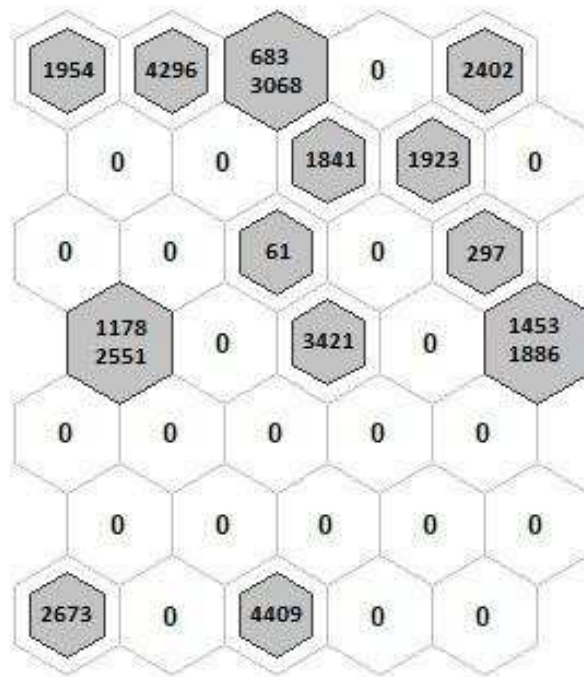


Figura 12. Genótipos associados a cada neurônio.

Na Figura 13 é apresentada a *U-matrix*, que representa a matriz indicativa das distâncias entre os neurônios adjacentes.

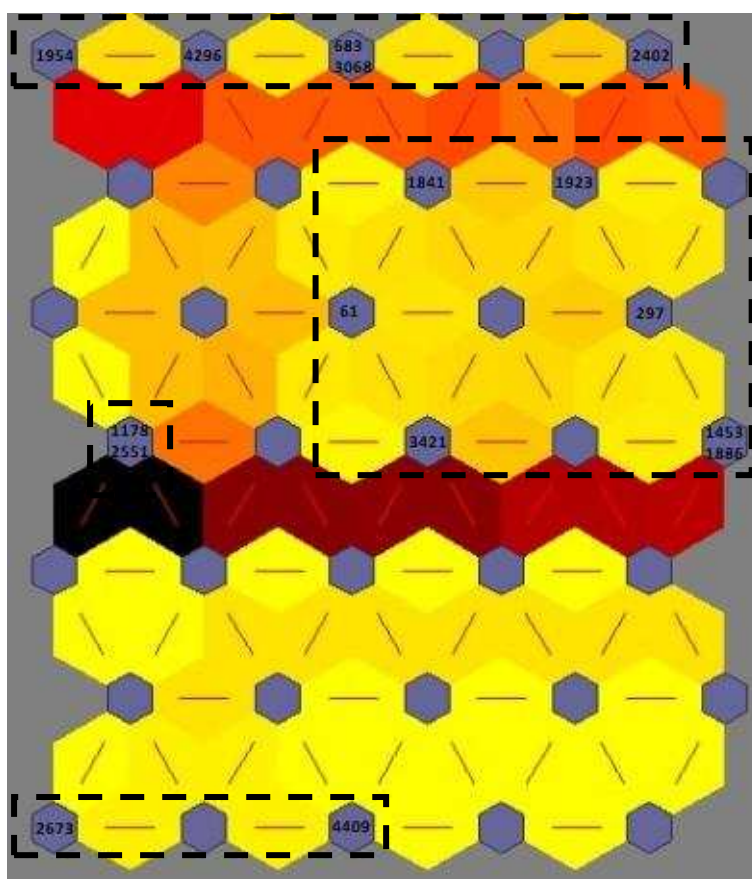


Figura 13. Matriz de distância entre neurônios (*U-matrix*), com separação dos grupos mostrados pela linha pontilhada.

A *U-matrix* é interpretada a partir de uma escala de cores que vai do amarelo ao preto, onde as cores mais claras (amarelo claro) representam as menores distâncias e as cores mais escuras (preto) representam os maiores valores de distância entre os neurônios. Observa-se a separação de quatro regiões distintas no mapa, caracterizando a formação de quatro grupos, os quais são representados na Tabela 11.

Tabela 11. Agrupamento dos dezesseis genótipos de eucalipto, obtido pela rede neural de Kohonen, utilizando a distância euclidiana como medida de dissimilaridade

Grupos	Rede neural de Kohonen						
	Genótipos						
1	2673	4409					
2	1178	2551					
3	3421	1453	1886	61	297	1841	1923
4	1954	4296	683	3068	2402		

Observa-se que o agrupamento gerado a partir da rede de Kohonen teve conformação distinta da apresentada pelos métodos de Tocher e UPGMA, os



quais agruparam os genótipos de eucalipto em seis grupos. Essa diferença pode ser atribuída as distintas medidas de dissimilaridade e critérios de agrupamentos utilizados.

Nos métodos de Tocher e UPGMA adotou-se a distância de Mahalanobis, que diferentemente da distância euclidiana, adotada na rede de Kohonen, considera as variâncias e covariâncias residuais, além das correlações que existem entre as variáveis mensuradas (CRUZ et al., 2011). Esse fato, associado aos diferentes critérios matemáticos abordados em cada técnica para agrupar os genótipos, proporcionaram a diferença na conformação dos grupos gerados pela rede de Kohonen e os demais métodos.

Na Figura 14 está representado o mapa dos pesos e associação de cada variável de entrada (propriedades da madeira e carvão) com os neurônios da camada de saída, onde as cores mais claras representam os maiores pesos. De acordo com Santos (2014), neste mapa é possível observar a influência que cada variável exerce sobre os neurônios da rede, além disso, neurônios com cores similares representam respostas similares, ou seja, por meio da análise do padrão de cores (pesos) pode-se fazer inferências sobre a correlação entre as variáveis.

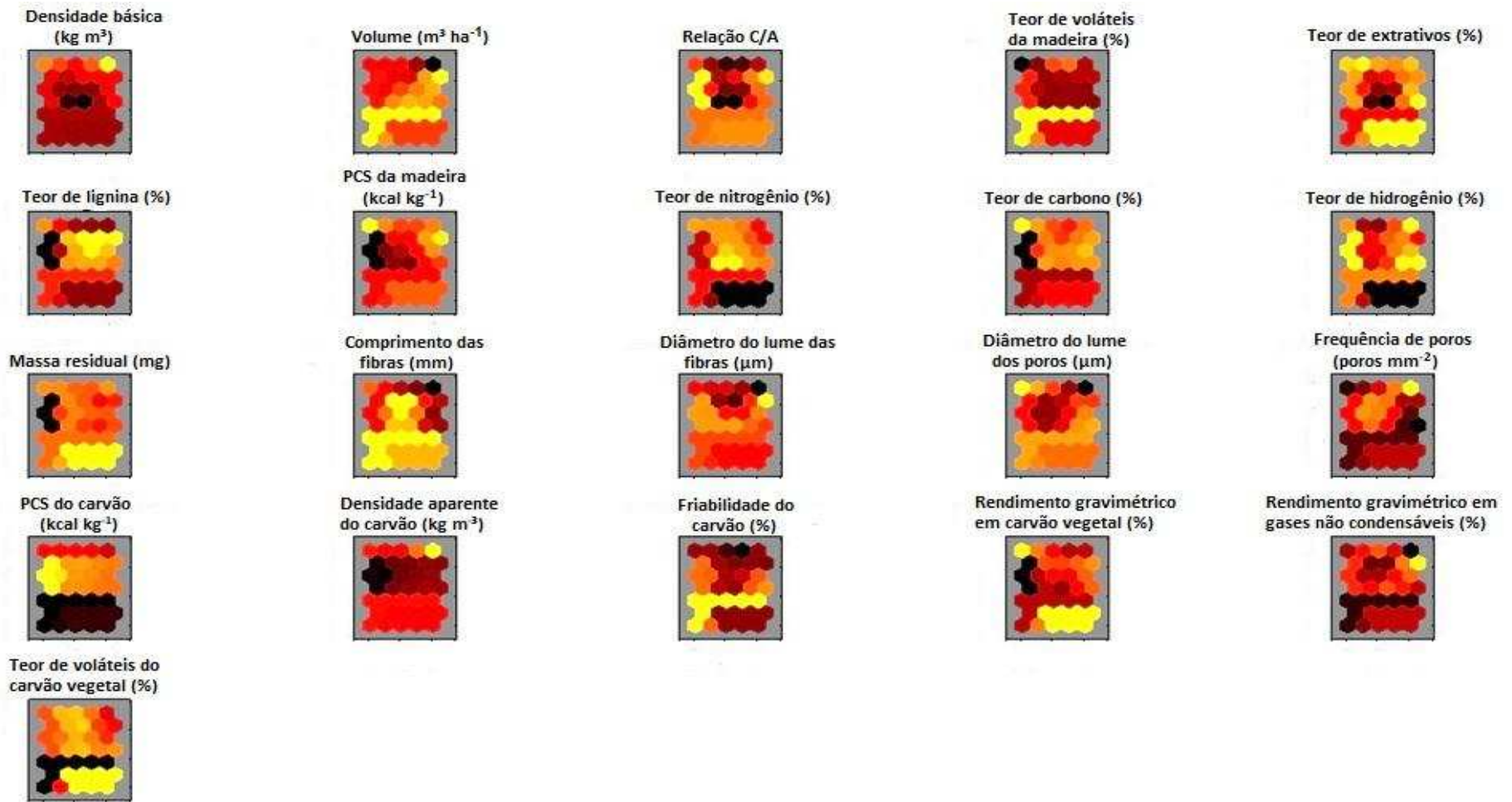


Figura 14. Peso das variáveis de entrada nos neurônios da rede.

Onde: cores mais claras representam maiores valores ou maior influência de uma variável naquele determinado neurônio.

Comparando as Figura 13 e Figura 14 pode-se estabelecer a influência das variáveis em cada grupo. Por exemplo, para densidade básica as cores mais claras, ou seja, os maiores valores para essa característica (Figura 14), foram verificados nos neurônios referentes ao grupo 4, situado na linha superior do mapa de neurônios, que pode ser melhor visualizado na *U-matrix* (Figura 13). Por meio dessa análise de intensidade das cores pode-se inferir que esse grupo, composto pelos genótipos 1954, 4296, 683, 3068 e 2402, é o que apresenta a maior densidade básica média.

Ao avaliar o padrão de cores, constata-se que as variáveis densidade básica e densidade aparente do carvão tiveram padrões mais próximos, evidenciando a correlação entre essas características. Verificou-se também a correlação entre a massa residual e o rendimento gravimétrico em carvão vegetal; teor de carbono da madeira e poder calorífico superior da madeira; entre outras.

Esse fato vem reforçar as associações verificadas por meio da análise de correlação linear de *Pearson* (Tabela 9), que mostrou correlações significativas entre essas variáveis.

A possibilidade de verificação dos pesos das variáveis na formação dos grupos e a visualização das correlações existentes entre elas é uma vantagem da rede de Kohonen em relação aos outros dois métodos utilizados.

Esse tipo de avaliação pode ser uma ferramenta muito útil em estudos onde o pesquisador queira avaliar simultaneamente a correlação e o peso das variáveis nos grupos de maneira individual.

### **5.3.3. Comparações entre grupos**

Nas Tabelas 12 e 13 são apresentados os valores médios das propriedades da madeira e carvão vegetal para cada grupo formado por meio das análises de agrupamento pelos métodos de Tocher, UPGMA e redes de Kohonen, respectivamente.

Tabela 12. Valores médios das propriedades da madeira e carvão vegetal para os grupos formados por meio dos métodos de Tocher e UPGMA

Grupo	Propriedades da madeira														Propriedades do carvão						
	Db	Vol	C/A	Tvma	Ext	Lig	PCS	N	C	H	Mr	Cpfi	Dlfi	DIpr	Fqpr	PCS	DA	Friab	Rgcv	Rgnc	Tvcv
1	602	414	1,20	85,91	6,80	30,03	4664	0,70	50,12	6,31	22,96	1,02	7,09	136,89	7,85	7088	390	6,85	35,13	16,86	28,45
2	581	468	0,95	86,80	5,25	30,40	4673	0,71	50,17	6,31	22,78	1,01	7,25	132,99	7,67	6980	390	6,88	34,48	16,79	27,98
3	582	353	0,87	85,90	3,52	29,91	4661	0,73	50,52	6,23	24,67	1,04	7,18	120,35	9,47	7241	380	6,95	34,81	16,44	27,19
4	622	309	0,69	86,11	6,67	28,43	4660	0,72	50,18	6,30	24,51	0,94	6,13	117,11	9,59	6998	470	7,05	34,57	16,87	27,35
5	611	398	0,94	84,38	8,65	29,48	4681	0,74	50,52	6,24	24,96	1,02	6,55	158,64	6,60	7020	380	8,15	35,64	17,07	29,36
6	555	510	0,69	85,93	2,31	31,22	4628	0,82	50,11	6,32	22,10	1,05	7,59	133,07	7,78	7124	390	6,24	33,98	17,38	28,80

Tabela 13. Valores médios das propriedades da madeira e carvão vegetal para os grupos formados por meio da rede neural de Kohonen

Grupo	Propriedades da madeira														Propriedades do carvão						
	Db	Vol	C/A	Tv	Ext	Lig	PCS	N	C	H	Mr	Cpfi	Dlfi	DIpr	Fqpr	PCS	DA	Friab	Rgcv	Rgnc	Tv
1	583	451	1,13	86,70	6,21	29,20	4660	0,64	49,99	6,28	24,25	1,06	7,04	138,20	7,71	6838	380	7,68	35,14	16,59	27,92
2	594	365	1,17	86,33	4,83	28,67	4648	0,69	50,09	6,27	22,52	1,01	7,23	131,45	8,51	7288	380	7,06	34,21	16,72	27,02
3	588	440	1,01	85,78	5,62	30,90	4661	0,74	50,27	6,31	23,21	1,02	7,18	131,80	8,04	7121	380	7,08	34,91	16,97	28,42
4	611	363	0,86	85,92	6,66	29,35	4675	0,74	50,27	6,30	23,69	0,99	6,67	132,39	8,35	7016	420	6,40	34,94	16,82	28,31

Em que: (Db) densidade básica ( $\text{kg m}^{-3}$ ); (Vol) volume médio de madeira por hectare ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ); (C/A) relação cerne/alburno; (Tv) teor de voláteis (%); (Ext) teor de extrativos (%); (Lig) teor de lignina (%); (PCS) poder calorífico superior ( $\text{kcal kg}^{-1}$ ); (N) teor de nitrogênio (%); (C) teor de carbono (%); (H) teor de hidrogênio (%); (Mr) massa residual a 450 °C na análise termogravimétrica (mg); (Cpfi) comprimento médio das fibras (mm); (Dlfi) diâmetro médio do lume das fibras ( $\mu\text{m}$ ); (DIpr) diâmetro médio do lume dos poros ( $\mu\text{m}$ ); (Fqpr) frequência média de poros ( $\text{poros mm}^{-2}$ ); (DA) densidade aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ ); (Friab) friabilidade (%), (Rgcv) rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); (Rgnc) rendimento gravimétrico em gases não condensáveis (%).

Os grupos 3 (genótipos 61 e 1178) e 4 (genótipos 2402 e 3068), formados por meio dos métodos de Tocher e UPGMA (Tabela 12), apesar de terem exibido rendimentos gravimétricos em carvão vegetal intermediários e em especial, o grupo 4 ter os maiores valores para densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão, quando comparados aos demais, também apresentaram as menores produtividades volumétricas de madeira, sendo portanto, menos indicados para produção de carvão vegetal.

Trugilho et al. (2001) recomendam a inserção de fatores de crescimento, como a produtividade volumétrica dos genótipos de eucalipto nos estudos de avaliação de qualidade da madeira. Pois, é necessário que os genótipos tenham propriedades da madeira adequadas a produção de carvão vegetal, associadas a uma maior produtividade, a fim de viabilizar a produção em larga escala.

No grupo 2, composto pelos genótipos 297, 2673 e 683, e no grupo 6 composto pelo genótipo 3421, foram observados elevados valores de volume e teores de lignina quando comparados aos demais, porém, também observaram-se as menores médias para a densidade básica da madeira e rendimento gravimétrico em carvão vegetal, além dos maiores valores médios de diâmetro do lume das fibras, não sendo, portanto, os mais indicados para produção de carvão.

É recomendável que se utilize madeiras com menor diâmetro do lume das fibras, uma vez que essa característica influencia negativamente a densidade aparente do carvão vegetal, conforme observado neste estudo e também por Pereira et al. (2016).

Apesar de ser observado maior valor friabilidade quando comparado aos demais, no grupo 5, formado pelo genótipo 4296, observaram-se resultados satisfatórios para grande parte das propriedades, como densidade básica, teor de extrativos, massa residual e rendimento gravimétrico em carvão vegetal, além de baixo diâmetro do lume das fibras. Por isso, este grupo é recomendado para produção de carvão vegetal.

Segundo Pereira et al. (2013) visando a produção de carvão de melhor qualidade, deve-se ter preferência pelos genótipos de menor friabilidade, ou seja, menor geração de finos. Maiores valores de densidade aparente do carvão também são requeridos, uma vez que eleva a capacidade de carga dos

altos-fornos, aumentando a produtividade de ferro-gusa nas indústrias siderúrgicas (CARNEIRO et al., 2016). De acordo com Santos (2008), é recomendável que para o uso siderúrgico, a densidade aparente do carvão seja superior a  $400 \text{ kg m}^{-3}$ .

Pela análise do agrupamento gerado pelos métodos de Tocher e UPGMA, o mais indicado para produção de carvão vegetal é o grupo 1, formado pelos genótipos 1453, 1954, 1886, 4409, 1923, 2551 e 1841. Neste grupo foram observados elevados valores para densidade básica da madeira, volume, teor de extrativos, teor de lignina, densidade aparente e rendimento gravimétrico em carvão vegetal, além disso, teve baixa friabilidade.

Vale destacar que os genótipos 1954 (*Eucalyptus urophylla*), 1453 (*Eucalyptus grandis*) e 1923 (*Eucalyptus urophylla*), se destacam no grupo 1, por apresentarem alta densidade básica e elevados rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, concomitante com valores de densidade aparente acima de  $400 \text{ kg m}^{-3}$ . Ressalta-se que para o genótipo 1954 foi observada menor produtividade volumétrica, porém com menor valor médio de friabilidade em relação ao 1453.

Pela análise do agrupamento gerado por meio da rede de Kohonen (Tabela 11), pode-se observar nos grupos 1 e 3, os maiores valores de produtividade volumétrica, porém com menor densidade básica. Já para os grupos 2 e 4 foram verificados menores valores de volume, mas com densidade básica mais elevada.

O grupo 2, composto pelos genótipos 1178 e 2551, foi o menos indicado para produção de carvão vegetal, visto que foram observados os menores valores médios de teor de lignina, massa residual, densidade aparente, e rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Além disso, teve maior valor médio de diâmetro do lume das fibras. Para densidade básica da madeira os valores foram próximos aos verificados para os grupos 1 e 3, porém o volume de madeira foi menor.

Para o grupo 1, constituído pelos genótipos 2673 e 4409, foram constatados valores satisfatórios para o volume médio de madeira e rendimento gravimétrico em carvão vegetal, porém foram observados menores valores de densidade básica da madeira e densidade aparente do carvão, além

de madeiras com maiores diâmetros de lume das fibras, em relação ao grupo 4.

No grupo 3, constituído pelos genótipos 61, 297, 1453, 1841, 1886, 1923 e 3421, foram observados elevados valores de rendimento gravimétrico em carvão, teor de lignina, produtividade volumétrica e baixa relação C/A, sendo os genótipos deste grupo, juntamente com os do grupo 4, mais recomendados para produção de carvão vegetal

O grupo 4, formado pelos genótipos 683, 1954, 2402, 3068 e 4296, foi o que mais se destacou para produção de carvão vegetal, considerando o agrupamento pela rede de Kohonen. Neste grupo foram observados elevados valores de densidade básica da madeira, teor de extrativos, rendimento gravimétrico e densidade aparente do carvão vegetal, associados aos menores valores de friabilidade, diâmetro de lume das fibras e relação cerne/alburno.

Os genótipos 1954, 4296, 1923 e 1954, assim como observado nos agrupamentos por meio de Tocher e UPGMA, também estiveram presentes nos grupos de maior interesse por meio da rede de Kohonen, comprovando o bom potencial para produção de carvão vegetal.

Os grupos formados por meio dos métodos de Tocher e UPGMA foram mais homogêneos em relação aos valores das variáveis, tornando mais fácil a interpretação dos resultados e indicação dos genótipos superiores.

Para esses métodos foi utilizada a distância de Mahalanobis como medida de dissimilaridade, ela tem a vantagem em relação a distância de euclidiana, que foi a medida adotada para realização do agrupamento pela rede de Kohonen, de levar em consideração a correlação existente entre os caracteres em estudo (CRUZ et al., 2011), e conjuntamente com o critério de agrupamento da rede de Kohonen, no qual cada neurônio aprende mais sobre determinado padrão de entrada, ou variável, podem ser as causas do agrupamento pelos métodos de Tocher e UPGMA terem sido mais coerentes em termos de discriminação dos genótipos e mais homogêneos no que diz respeito ao conjunto de variáveis intragrupo.

Portanto, cabe ao pesquisador atentar para as vantagens e desvantagens de cada técnica, de acordo com o propósito do estudo. O método de Tocher por ser uma técnica de otimização e fornecer o número ótimo de grupos sem a necessidade de intervenção do pesquisador e sem o

uso de técnicas computacionais avançadas, se mostrou mais prático e proporcionou o mesmo resultado que o método UPGMA, que por sua vez possui a vantagem de possibilitar a visualização das distâncias entre genótipos, permitindo identificar pares de genótipos mais similares dentro do grupo. Porém, necessita da interferência do pesquisador para decidir a formação dos grupos no dendrograma, sendo que ainda não há critérios bem definidos para esse procedimento.

O método de agrupamento por meio da rede de Kohonen requer maior conhecimento em técnicas de inteligência computacional e a determinação do número de grupos gerados pela rede passa por uma análise visual do mapa de distância, ou seja, depende também da interpretação do pesquisador. Apesar da diferente conformação dos grupos, foi possível chegar a decisão semelhante quanto a indicação dos genótipos superiores e tem a vantagem de permitir a verificação dos pesos individuais das variáveis na formação dos grupos.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de pré-seleção desenvolvido mostrou-se eficaz, pois apesar das diferenças quantitativas entre os genótipos pré-selecionados, verificadas posteriormente por meio das análises de agrupamento, também pode-se constatar que, de maneira geral, todos esses genótipos possuem o conjunto de características da madeira e do carvão vegetal favoráveis a produção de carvão de boa qualidade para o uso siderúrgico. O que pode ser comprovado por meio da análise descritiva, que demonstrou elevados valores médios de densidade básica da madeira, rendimento gravimétrico e densidade aparente do carvão vegetal, além de baixos valores de friabilidade e teor de cinzas.

A massa residual, por apresentar correlação positiva com o teor de carbono elementar da madeira e com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, mostra-se um importante indicador da qualidade de genótipos de eucalipto para produção de carvão, desta forma, sugere-se para estudos futuros, adicionar essa propriedade como variável de pré-seleção. Desta forma, poderá ser feita uma escolha mais segura, além de existir a possibilidade de economia financeira, uma vez que por meio da massa residual pode-se inferir sobre o rendimento gravimétrico, não sendo necessário, portanto, realizar carbonizações da madeira.

No que concerne as particularidades das ferramentas aqui apresentadas, para pré-seleção e seleção de genótipos, cabe ao pesquisador, de acordo com seus objetivos, fazer uma análise crítica sobre os resultados, de modo que utilize as vantagens de cada método como auxílio na decisão final, que é a indicação de genótipos, seja para produção de carvão vegetal, ou outra finalidade. Devemos nos atentar que as árvores são organismos complexos, sendo os resultados de campo uma interação de fatores genéticos e ambientais, portanto, o conhecimento prévio do pesquisador sobre o seu banco de dados também é de fundamental importância na interpretação das análises estatísticas, principalmente em métodos não lineares como a rede de Kohonen.

## 7. CONCLUSÃO

- O método proposto para pré-classificação dos genótipos é adequado, pois permite a escolha daqueles com valores desejáveis para as quatro características da madeira (densidade básica, volume, massa seca e relação cerne/alburno) simultaneamente;
- De maneira geral, as características da madeira e carvão dos genótipos pré-selecionados são satisfatórias para a produção de carvão vegetal para o uso siderúrgico e foram observadas correlações significativas, demonstrando a necessidade de uma análise conjunta dessas propriedades, a fim de selecionar os melhores genótipos para essa finalidade;
- Dentre os três métodos de agrupamento avaliados, o método de otimização de Tocher é mais prático, por não requerer o emprego de técnicas computacionais avançadas e indicar o número ótimo de grupos sem necessitar de intervenção do pesquisador. Permitindo alcançar o mesmo resultado das demais técnicas estudadas;
- A conformação obtida por meio da rede neural artificial de Kohonen foi diferente, além dos grupos terem sido mais heterogêneos em relação as demais técnicas utilizadas. Esse método apresenta como desvantagem a maior necessidade de conhecimento em técnicas de inteligência computacional por parte do pesquisador, porém possui a vantagem de possibilitar a verificação dos pesos individuais de cada variável em estudo na formação dos grupos;
- Os genótipos 1954 (*Eucalyptus urophylla*), 1453 (*Eucalyptus grandis*), 1923 (*Eucalyptus urophylla*) e 4296 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), são os mais indicados para produção de carvão vegetal por meio das técnicas estatísticas utilizadas.

## 8. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 8112:** Carvão vegetal: análise imediata. Rio de Janeiro, 1986. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11941:** Madeira: determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: 2003. 6p.

ALBANEZ, D. D. O. **Redes neurais artificiais aplicadas à segmentação de imagens**. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2017.

ALMEIDA, J. M. **Efeito da temperatura sobre rendimento e propriedades dos produtos da carbonização de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden**. 1983. 40 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1983.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA - AMS. **Anuário estatístico 2015: ano base 2016**. Belo Horizonte, 2016. 23p.

ANDERBERG, M. R. **Cluster analysis for applications: probability and mathematical statistics: a series of monographs and textbooks**. Academic press, 2014.

ARANTES, M. D. C.; TRUGILHO, P. F.; FILHO, M. T.; LIMA, J. T.; VIDAURRE, G. B. DENSITOMETRIA DE RAIOS X NA MADEIRA E CARVÃO DE CLONE DE *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden X *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake1. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, n.1, p. 155-162, 2016.

ASSIS, T. F. D.; ABAD, J. I. M.; AGUIAR, A. M. Melhoramento genético do eucalipto. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 18, p. 32-51, 1996.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particles materials**. Philladelphia, 1982.

BARNETT, J.; JERONIMIDIS, G. **Wood quality and its biological basis**. London: Blackwell, 2009. 240p.

BENITE, M. **Aplicação de modelos de redes neurais na elaboração e análise de cenários macroeconômicos**. 2003. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

BERTAN, I.; CARVALHO, F. I. F. D.; OLIVEIRA, A. C. D.; VIEIRA, E. A.; HARTWIG, I.; SILVA, J. A. G. D.; SHIMIDT, D. A. M.; VALÉRIO, I. P.; BUSATO, C. C.; RIBEIRO, G. Comparação de métodos de agrupamento na representação da distância morfológica entre genótipos de trigo. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 12, n. 3, p. 279-286, 2006.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; DA SILVA ROSADO, S. C.; DA SILVA, J. R. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237- 245, 2010.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. D. S.; SILVA, J. R. M. D. Melhoramento genético das propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 31, n.3, p. 391-398, 2007.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991.

CAIXETA, R. P.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. D. S.; LIMA, J. T. Propriedades e classificação da madeira aplicadas à seleção de genótipos de *Eucalyptus*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, p. 43-51, 2003

CARGNELUTTI FILHO, A.; RIBEIRO, N. D.; REIS, R. C. P. D.; SOUZA, J. R. D.; JOST, E. Comparação de métodos de agrupamento para o estudo da divergência genética em cultivares de feijão. **Ciência Rural**, v. 38, n. 8, 2008.

CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; FREDERICO, P. G. U.; FIALHO, L. D. F.; FIGUEIRÓ, C. G.; DA SILVA, C. M. S. Efeito do material genético e do sítio na qualidade do carvão vegetal de madeira de curta rotação. **FLORESTA**, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 473-480, 2016.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus sp.* na madeira e carvão vegetal**. 2011. 97 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. D. C. O.; DE LIMA, J. E.; DOS SANTOS, R. C.; PEREIRA, B. L. C.; ALVES, I. C. N. Análise multivariada para seleção de clones de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, p. 627-635, 2013.

CASTRO, C. A. D. O.; RESENDE, R. T.; BHERING, L. L.; CRUZ, C. D. Breve histórico do melhoramento genético do eucalipto no Brasil sob a ótica dos avanços biométricos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, n. 9, p. 1585-1593, 2016.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Modernização da Produção de Carvão Vegetal no Brasil: Subsídios Para Revisão do Plano Siderurgia**. Brasília, 2015.

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, p. 59-72, 1982.  
CLIMATE-DATA.ORG. **Três Marias/MG**. Disponível em: < <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/tres-marias-43453/> >. Acesso em: 27/10 2018.

COSTA, A. C. S.; LEAL, C. S.; SANTOS, L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Propriedades da madeira de cerne e alborno de *Eucalyptus camaldulensis*. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 8, n. 1, 2017.

COSTA, J. A. F.; GONÇALVES, M. L.; NETTO, M. L. D. A. Visualização e análise de agrupamentos usando redes auto-organizáveis, segmentação de imagens e índices de validação. **Learning and Nonlinear Models (L&NLM)-Journal of the Brazilian Neural Network Society**, v. 9, n. 2, p. 91-103, 2011.

COUTO, A. M.; PROTÁSIO, T. D. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; SÁ, V. A. D. Multivariate analysis applied to evaluation of *Eucalyptus* clones for bioenergy production. **Cerne**, v. 19, p. 525-533, 2013.

CRUZ, C. D. **Programa Genes: aplicativo computacional em genética e estatística**. Viçosa: UFV 1997. 420 p.

CRUZ, C. D. **Programa Genes: Diversidade Genética**. Viçosa: Editora UFV, 2008. 278 p.

CRUZ, C. D.; FERREIRA, F. M.; PESSONI, L. A. **Biometria aplicada ao estudo da diversidade genética**. Visconde do Rio Branco: Suprema, 2011. 620 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa UFV, 1994. 390 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2004. 480p p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos Biométricos Aplicados ao Melhoramento Genético**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2012. 514 p.

CURI, E. V. D. B.; FONTES, M. A. L.; BOTEZELLI, L. Distribuição de espécies arbóreo-arbustivas ao longo de um gradiente de solos e topografia em um trecho de floresta ripária do Rio São Francisco em Três Marias, MG, Brasil. **Revista Brasil. Bot**, v. 28, n. 2, p. 329-345, 2005.

DADSWELL, H. E. The anatomy of eucalypt woods. **Div. Appl. Chem. Tech. Paper**. CSIRO, Australia, n. 66, p. 1-28, 1972.

DANCEY, C. P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. Penso Editora, 2013.

D'AVILA FILHO, B. M. **Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa, cenário em 2020**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília: 63 p. 2014.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG - DIN. **EN 14918**: Determination of calorific value. Berlin: 2010. 63 p.

DONI, M. V. **Análise de cluster: métodos hierárquicos e de particionamento**. 2004. 93 f. Monografia (Bacharel em Sistemas de informação) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2004.

EVANGELISTA, W. V. **Caracterização da madeira de clones de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. e *Eucalyptus urophylla* ST Blake, oriunda de consórcio agrossilvipastoril**. 2007. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)- Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **Statistics**. Disponível em: < <http://faostat.fao.org/> >. Acesso em: 21/06 2018.

FERREIRA, M. C.; SANTOS, R. C. D.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. D. C. O.; SILVA, G. G. C. D.; CASTRO, A. F. N. M.; COSTA, S. E. D. L.; PIMENTA, A. S. Biomass and energy production at short rotation *Eucalyptus* clonal plantations deployed in rio grande do norte. **Revista Árvore**, v. 41, n. 5, 2017.

FOELKEL, C.; BARRICHELO, L.; MILANEZ, A. Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus paniculata*, *Eucalyptus citriodora*, *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus tereticornis* para produção de celulose sulfato. **IPEF**, n.10, p. 17-37, 1975.

FREDERICO, P. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal**. 2009. 86 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

FREI, F. **Introdução à análise de agrupamentos: teoria e prática**. São Paulo: Unesp, 2006.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWING, C. H. (Eds). **Lignins**, p. 241-266, 1971.

GOLDSCHMIDT, R. R. **Uma Introdução à Inteligência Computacional: fundamentos, ferramentas e aplicações**. 1 ed. Rio de Janeiro: IST-Rio, 2010. 143 p.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O papel**, v. 47, n.8, p. 36-38, 1986.

HAYKIN, S. S. **Redes neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

HAZEL, L. N. The genetic basis for constructing selection indexes. **Genetics**, v. 28, n. 6, p. 476-490, 1943.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES - IBÁ. **Relatório Anual 2017: ano base 2016**. 2017. 80p.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **FLORESTA**, v. 47, n. 1, p. 11-16, 2017.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M.; DA SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies eucalipto para produção de carvão vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 12, n. 3, p. 386-390, 2017.

KIND, M. C.; BRUNNER, R. J. SOM z: photometric redshift PDFs with self-organizing maps and random atlas. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 438, n. 4, p. 3409-3421, 2014.

LEITE, E. R. D. S.; PROTÁSIO, T. D. P.; ROSADO, S. C. D. S.; TRUGILHO, P. F.; DE MELO, I. C. N. Qualidade do carvão vegetal produzido a partir da madeira do cafeeiro, para uso bioenergético. **Coffee Science**, v. 10, p. 251-261, 2015.

LINDEN, R. Técnicas de agrupamento. **Revista de Sistemas de Informação da FSMA**, v. 1, n. 4, p. 18-36, 2009.

LOBÃO, M. S.; CASTRO, V. R. D.; RANGEL, A.; SARTO, C.; TOMAZELLO, M. F.; SILVA JR, F. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 92, p. 469-477, 2011.

MANLY, B. F. **Multivariate statistical methods: a primer**. CRC Press, 2004.

MARTINS, I. S.; MARTIN, R. D. C. C.; PINHO, D. D. S. Alternativas de índices de seleção em uma população de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Cerne**, v. 12, n. 3, 2006.

MENDES, M.; GOMES, P.; OLIVEIRA, J. D. Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal. **Produção e utilização do carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, 1982. p. 75-89.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MULAMBA, N.; MOCK, J. Improvement of yield potential of the ETO blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits [Mexico]. **Egyptian journal of genetics and cytology**, v. 7, p. 40-51, 1978.

NEVES, T. A. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados no sul de Minas Gerais**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; DA CUNHA, A. B.; DE CARVALHO, A. F.; WEISE, S. M. K. Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. **FLORESTA**, v. 45, n. 1, p. 57-64, 2014.

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T.; BÄRNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 11, p. 973-982, 2006.

OLIVEIRA, A. C. **Sistema forno-fornalha para produção de carvão vegetal**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, E. **Correlações entre parâmetros de qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis* (W. Hill ex Maiden)**. 1988. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1988.

OLIVEIRA, J. D.; FILHO, A. V.; MENDES, M.; GOMES, P. Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte: CETEC, p. 59-72, 1982.

PAULA, J. E. D. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado, visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, v. 11, n. 1, 2005.

PEREIRA, B. L. C. **Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; OLIVEIRA, A. C.; SANTOS, L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; MAGALHÃES, M. A. D. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, 2016.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. D. C. O.; SANTOS, L. C.; VITAL, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. **International Journal of Forestry Research**, v. 2012, 2012.

PEREIRA, B. L. C.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; SANTOS, L. C. Correlações entre a relação cerne/alburno da madeira de eucalipto, rendimento e propriedades do carvão vegetal. **Scientia Forestalis**, v. 41, n. 98, p. 217-225, 2013.



PITELLI, R.; FERRAUDO, A.; PITELLI, A.; PITELLI, R.; VELINI, E. D. Utilização de análise multivariada e redes neurais artificiais na determinação do comportamento de colonização de populações de macrófitas aquáticas no reservatório de Santana. **Planta Daninha**, v. 27, n.3, p. 429-439, 2009.

PROTÁSIO, T. D. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A. D.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, v. 41, p. 15-28, 2013.

PROTÁSIO, T. D. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; DE SOUZA BRITES, L. M. R. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

PROTÁSIO, T. D. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.

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

RODRIGUES, É. D. A. C.; ROSADO, S. C. D. S.; TRUGILHO, P. F.; SANTOS, A. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para as propriedades físicas da madeira avaliadas em árvores no campo. **Cerne**, v. 14, p. 147-152, 2008.

RODRIGUES, E. F. D. G.; BARROS, N. F. D.; RODRIGUES, A. C. D. G.; SANTOS, G. D. A. Nitrogênio, carbono e atividade da biomassa microbiana do solo em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 29, p. 893-901, 2005.

ROWELL, R. M.; PETTERSEN, R.; HAN, J. S.; ROWELL, J. S.; TSHABALALA, M. A. Cell Wall Chemistry. In: ROWELL, R. M. (Ed.). **Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites**. CRC Press, 2005. p. 121-138.

SANTOS, F. S.; AMARAL, A. T. D.; FREITAS, S. D. P.; RANGEL, R. M.; PEREIRA, M. G. Predição de ganhos genéticos por índices de seleção na população de milho-pipoca UNB-2U sob seleção recorrente. **Bragantia**, v. 66, n. 3, 2007.

SANTOS, J. S. **Estratificação de florestas de eucalipto com base na forma do fuste das árvores**. 2014. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2014.

SANTOS, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: FORUM NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL, 2008, Belo Horizonte: UFMG. **Anais**. Belo Horizonte: UFMG, 2008. p.

SANTOS, R. C. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M. D.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90 p. 221-230, 2011a.

SANTOS, R. C. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CASTRO, R. V. O.; PIMENTA, A. S.; CASTRO, A. F. N. M.; MARINHO, I. V.; BOAS, M. A. V. Potencial de briquetagem de resíduos florestais da região do Seridó, no Rio Grande do Norte. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 285, 2011b.

SANTOS, R. C. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M.; CARVALHO, A. M. M. L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**, v. 18, n. 1, p. 143-151, 2012.

SANTOS, R. C. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, 2016.

SANTOS, R. D. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto**. 2010, 173 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SCHERER, W. G. S. **Levantamento dos níveis de produção de aço e ferro-gusa, cenário em 2020 – Ênfase: uso da energia gerada na combustão dos gases da carbonização**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília: 2014. 33 p.

SMITH, H. F. A discriminant function for plant selection. **Annals of Human Genetics**, v. 7, n. 3, p. 240-250, 1936.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; JÚNIOR PEREIRA, A.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, 2014.

SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. The comparison of dendrograms by objective methods. **Taxon**, v. 11, n. 2, p. 33-40, 1962.

SOLAR, J.; DE MARCO, I.; CABALLERO, B.; LOPEZ-URIONABARRENECHEA, A.; RODRIGUEZ, N.; AGIRRE, I.; ADRADOS, A. Influence of temperature and residence time in the pyrolysis of woody biomass waste in a continuous screw reactor. **Biomass and Bioenergy**, v. 95, p. 416-423, 2016.

STEFANIDIS, S. D.; KALOGIANNIS, K. G.; ILIOPOULOU, E. F.; MICHAILOF, C. M.; PILAVACHI, P. A.; LAPPAS, A. A. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 105, p. 143-150, 2014.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. **TAPPI 264 om-88 - TAPPI test methods**. Atlanta. 1998. 46 p.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. **TAPPI test methods T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp**. In: TAPPI Standard Method. Atlanta, USA. Cd-Rom, 2001.

TRUGILHO, P. F.; DE MELO, I. C. N. A.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; DE ARAÚJO, A. C. C.; HEIN, P. R. G. Efeito da idade e material genético no rendimento e qualidade do carvão vegetal de eucalipto. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 6, n. 3, 2015.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MENDES, L. M. Influência da idade nas características físico-químicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus saligna*. **Cerne**, v. 2, n. 1, p. 94-111, 1996.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. **Cerne, Lavras**, v. 7, n. 2, p. 104-114, 2001.

VELLA, M. M. C. F.; VALENTE, O. F.; VITAL, B. R.; LELLES, J. G. Influência da velocidade de carbonização da madeira nos rendimentos e nas propriedades do carvão produzido. **IPEF**, n. 41/42, p. 64-76, 1989.

VELOSO, D. P.; NASCIMENTO, E. A.; MORAIS, S. D. Isolamento e análise estrutural de ligninas. **Química nova**, v. 16, n. 5, p. 435-448, 1993.

VESANTO, J.; HIMBERG, J.; ALHONIEMI, E.; PARHANKANGAS, J. SOM toolbox for Matlab 5. **Helsinki University of Technology**, p. 59, 2000.

VICINI, L.; SOUZA, A. M. **Análise multivariada da teoria à prática**. UFSM. Santa Maria, RS: 2005. 215 p.

VITAL, B. R.; DELLA LUCIA, R. M. Procedência de sementes e qualidade da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden<sup>1</sup>. **Revista Árvore**, v. 4, n. 2, p. 170-178, 1980.

VITAL, B. R. Métodos de determinação da densidade da madeira. **SIF**, p. 21, 1984.

WALLIS, A.; WEARNE, R.; WRIGHT, P. J. Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to kraft pulp yields. **Appita Journal**, v. 49, n.5, p. 427-432, 1996.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D. H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel**, v. 86, n. 12-13, p. 1781-1788, 2007.

# APÊNDICE

Tabela 1. Resumo da planilha de pré-seleção, demonstrando os resultados dos critérios de pré-seleção dos dezesseis genótipos pré-selecionados

DENSIDADE (Kg m <sup>-3</sup> )				VOLUME (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )				MATÉRIA SECA (t ha <sup>-1</sup> )				CERNE/ALBURNO				Classificação	M&M	Classe
Ran	Gen	Valor Gen	Med	Ran	Gen	Valor Gen	Med	Ran	Gen	Valor Gen	Med	Ran	Gen	Valor Gen	Med			
7	4296	608	SUP	13	4296	387	SUP	9	4296	234	SUP	26	4296	0,95	SUP	SUP_SUP_SUP_SUP	1	1
31	297	578	SUP	5	297	461	SUP	6	297	265	SUP	19	297	0,87	SUP	SUP_SUP_SUP_SUP	2	1
28	683	581	SUP	9	683	399	SUP	10	683	231	SUP	23	683	0,90	SUP	SUP_SUP_SUP_SUP	8	1
16	1178	595	SUP	32	1178	332	SUP	26	1178	197	SUP	28	1178	1,02	SUP	SUP_SUP_SUP_SUP	19	1
13	1453	600	SUP	7	1453	458	SUP	3	1453	274	SUP	40	1453	1,13	INF	SUP_SUP_SUP_INF	3	2
9	1923	602	SUP	1	1923	482	SUP	1	1923	289	SUP	55	1923	1,42	INF	SUP_SUP_SUP_INF	4	2
26	2673	584	SUP	3	2673	471	SUP	2	2673	275	SUP	37	2673	1,10	INF	SUP_SUP_SUP_INF	6	2
6	1954	617	SUP	16	1954	375	SUP	11	1954	230	SUP	36	1954	1,09	INF	SUP_SUP_SUP_INF	7	2
8	1841	605	SUP	20	1841	359	SUP	15	1841	217	SUP	34	1841	1,07	INF	SUP_SUP_SUP_INF	9	2
19	2551	590	SUP	12	2551	389	SUP	12	2551	229	SUP	51	2551	1,31	INF	SUP_SUP_SUP_INF	14	2
27	4409	581	SUP	14	4409	387	SUP	13	4409	225	SUP	42	4409	1,15	INF	SUP_SUP_SUP_INF	16	2
14	1886	600	SUP	25	1886	350	SUP	19	1886	209	SUP	41	1886	1,15	INF	SUP_SUP_SUP_INF	18	2
15	3068	600	SUP	34	3068	329	INF	27	3068	197	SUP	1	3068	0,50	SUP	SUP_INF_SUP_SUP	10	3
3	2402	637	SUP	46	2402	297	INF	31	2402	188	SUP	24	2402	0,92	SUP	SUP_INF_SUP_SUP	22	3
49	3421	557	INF	2	3421	481	SUP	5	3421	267	SUP	10	3421	0,72	SUP	INF_SUP_SUP_SUP	5	4
40	61	569	INF	18	61	368	SUP	18	61	210	SUP	13	61	0,74	SUP	INF_SUP_SUP_SUP	11	4

Ran: Posição do genótipo no ranking de cada variável, Gen: Genótipo, Valor Gen: Valor genotípico, Med: Classificação do genótipo de acordo com a mediana, M&M: Posição do genótipo na classificação gerada pelo índice de seleção de Mulamba e Mock.

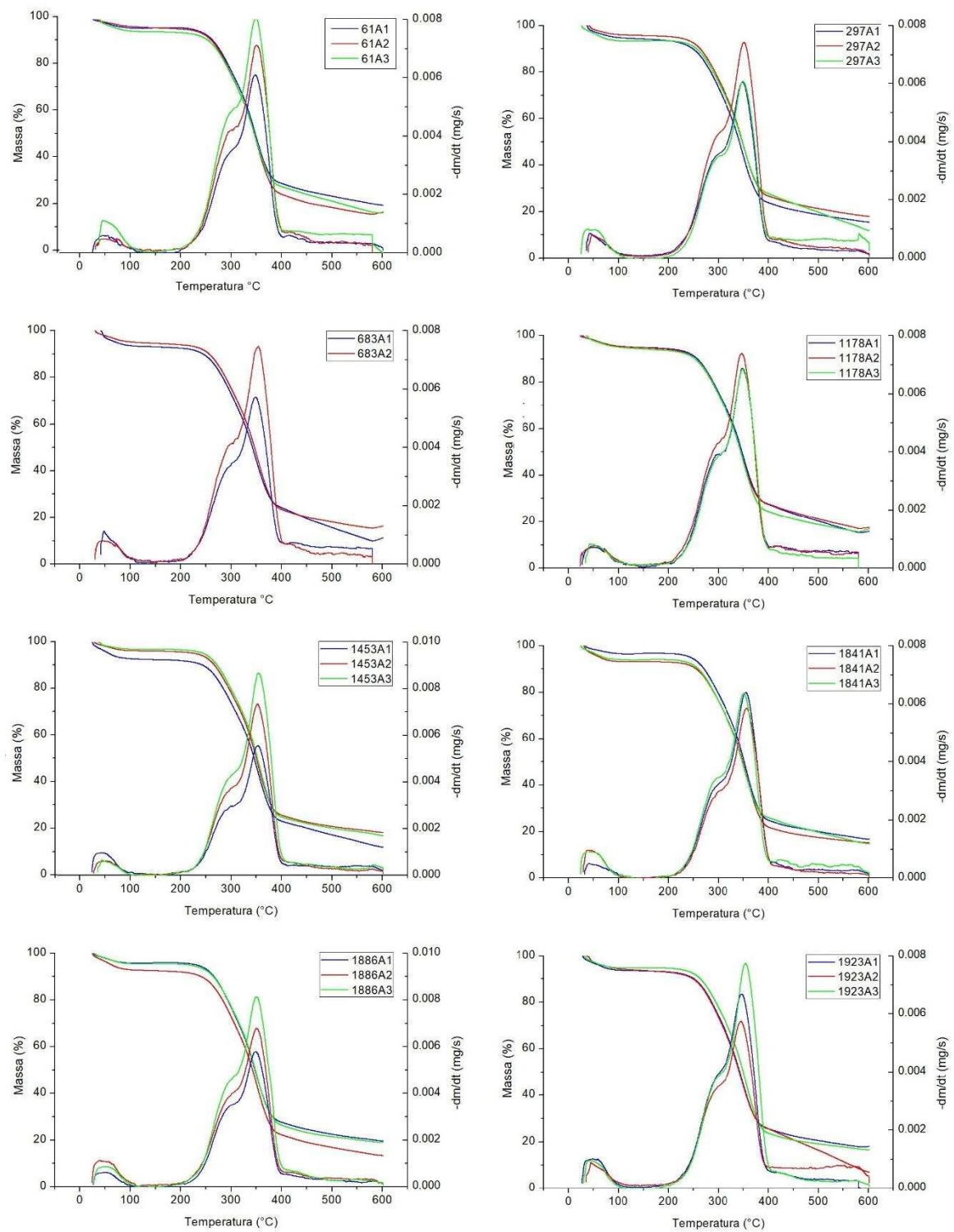


Figura 1A. Curvas termogravimétricas (TGA) e curvas da derivada primeira da perda de massa (DTG) da madeira dos genótipos pré-selecionados

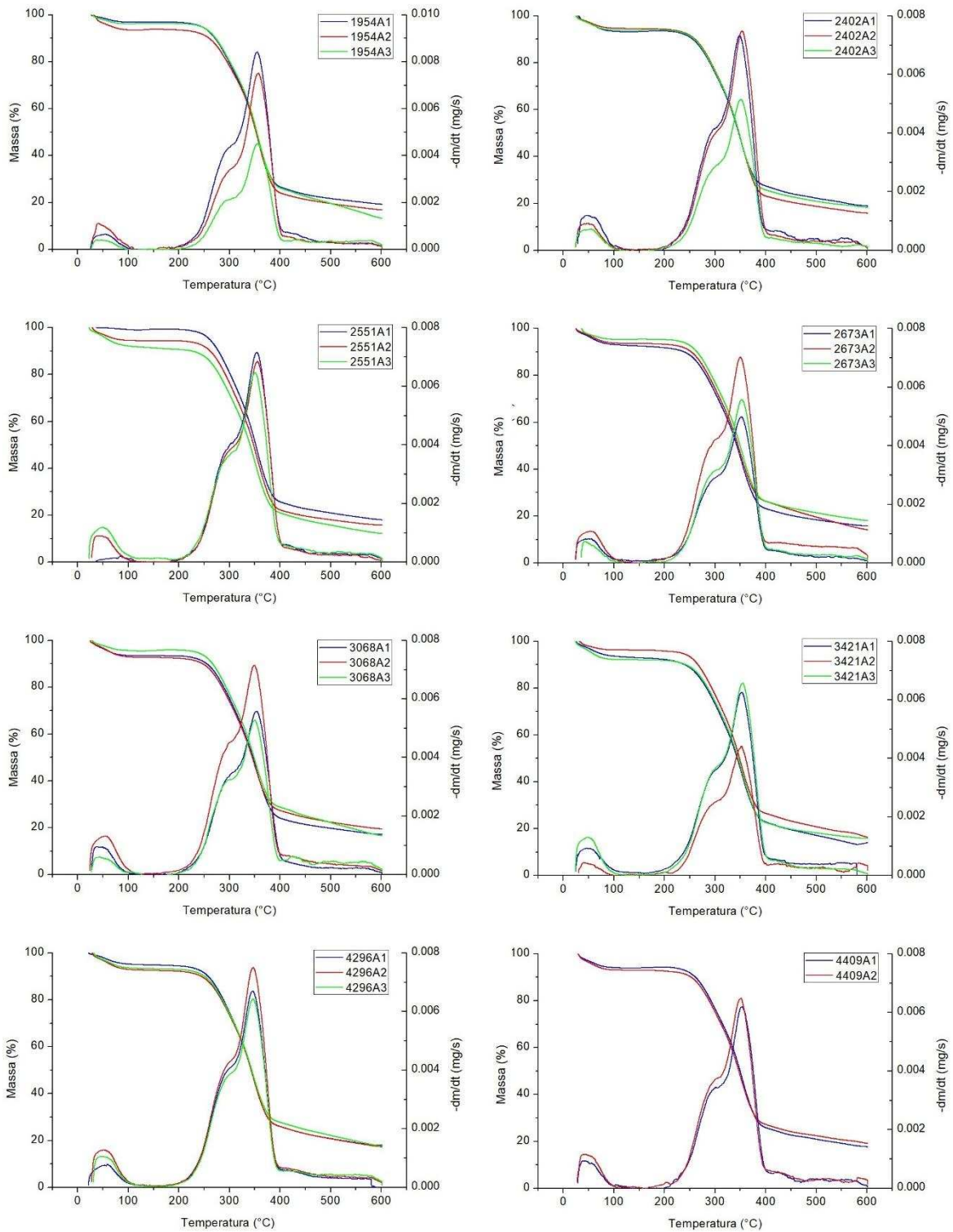


Figura 1B. Curvas termogravimétricas (TGA) e curvas da derivada primeira da perda de massa (DTG) da madeira dos genótipos pré-selecionados.