



**TÚLIO MARCOS MILITANI ALVES**

**ANÁLISE DA COLHEITA MECANIZADA DO CAFÉ COM  
BASE EM MACHINE LEARNING**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**TÚLIO MARCOS MILITANI ALVES**

**ANÁLISE DA COLHEITA MECANIZADA DO CAFÉ COM BASE EM MACHINE  
LEARNING**

TCC apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior

Orientador

Prof. Dr. Danton Diego Ferreira

Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2021**

**TÚLIO MARCOS MILITANI ALVES**

**ANÁLISE DA COLHEITA MECANIZADA DO CAFÉ COM BASE EM MACHINE  
LEARNING**

**ANALYSIS OF MECHANIZED COFFEE HARVEST BASED ON MACHINE  
LEARNING**

TCC apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA EM 10 de março de 2021

Dr. Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior UFLA

Dr. Danton Diego Ferreira UFLA

Dr. Fábio Moreira da Silva UFLA

Bel. Fernando Elias de Melo Borges UFLA

Prof. Dr. Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior

Orientador

Prof. Dr. Danton Diego Ferreira

Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2021**

*Dedico este trabalho a toda minha família e minha namorada  
por sempre me apoiarem em todos os meus desafios.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde e ter me guiado até aqui.

Ao meu pai, minha mãe e meu irmão que sempre foram os meus pilares e exemplos.

Aos meus avôs e avós, fonte de muita sabedoria.

A minha namorada por sempre estar ao meu lado.

Em especial ao Dr. Luiz de Gonzaga Ferreira Júnior por todo o apoio, confiança e prontidão desde o início do trabalho.

A todos membros e ex-membros da empresa LD Gonzaga Treinamentos e Consultoria Agrícola Ltda pelos ensinamentos e contribuição com o trabalho.

Ao professor Dr. Danton Diego Ferreira e o mestrando Fernando Elias de Melo Borges por toda ajuda e suporte para a realização deste trabalho.

A todos os professores que passaram pela minha vida e contribuíram de certa forma para eu chegar até aqui.

*Muito obrigado!*

## RESUMO

Visto a grande importância da cafeicultura para o desenvolvimento socioeconômico brasileiro e sabendo que a colheita é o processo mais trabalhoso e complexo da cadeia produtiva do café, este trabalho propõe analisar quais fatores interferem nas eficiências da colheita mecanizada do café e, também, na perda de chão da máquina durante a colheita, por meio do uso de técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning*). Para isso foi desenvolvido um modelo de rede neural artificial (RNA) capaz de prever a eficiência de derrça, outro capaz de prever a eficiência de colheita e um terceiro modelo capaz de prever a perda de chão, ambos com base em 34 fatores adquiridos de um banco de dados da empresa LD Gonzaga Treinamentos e Consultoria Agrícola Ltda. Esses dados foram coletados pela equipe da empresa em duas Fazendas no município de Nepomuceno-MG durante a safra de 2019. Os modelos RNA mostraram-se altamente eficientes na previsão das saídas, sendo elas, eficiência de derrça com  $R^2$  igual a 0,94 e RMSE de 0,05; eficiência de colheita com  $R^2$  de 0,97 e RMSE de 0,03 e a perda de chão da máquina com  $R^2$  de 0,93 e RMSE igual a 0,02. Para a interpretação dos resultados gerados pelos modelos RNA, utilizou-se a ferramenta LIME (*Local Interpretable Model-agnostic Explanations*), a qual possibilitou concluir a ordem dos fatores que mais interferem em cada uma das três saídas e como maximizar as eficiências e reduzir as perdas por meio de recomendações específicas baseadas nos resultados encontrados através da inteligência computacional.

Palavras-chave: Café arábica, colheita mecânica, eficiência, perda de chão, aprendizado de máquina.

## ABSTRACT

It is known that coffee cultivation is of great importance for the socioeconomic development of Brazil and the harvest is the most laborious and complex process in the coffee production chain. In this context, this work was aimed to investigate which factors interfere in the efficiency of the mechanized harvesting of coffee and in the ground loss of the machine during the harvesting, using machine learning techniques. To this end, artificial neural network (ANN) models were developed to predict the efficiency of stripping, the efficiency of harvesting and machine ground loss during harvesting. They were developed based on 34 factors acquired from a database available by the company LD Gonzaga Treinamentos e Consultoria Agrícola Ltda. These data were collected by the company team at two farms in the municipality of Nepomuceno-MG during a harvesting in 2019. The ANN models are highly efficient in data prediction, achieving  $R^2$  equal to 0.94 and RMSE of 0.05 for stripping efficiency;  $R^2$  of 0.97 and RMSE of 0.03 for harvest efficiency and  $R^2$  of 0.93 and RMSE of 0.02 for ground loss of the machine. To interpret the results generated by the ANN models, a LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) tool was used, which made it possible to comply with an order of the factors that most interfere in each of the three predictions and how to maximize efficiencies and reduce losses through specific recommendations on the results found through computational intelligence.

Keywords: *Coffea arabica*, mechanical harvesting, efficiency, ground loss, machine learning.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Colheita do café</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Colheita mecânica do café</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Correlação linear</b> .....	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Aprendizado de máquinas</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3.1</b>	<b>Redes neurais artificiais</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Validação cruzada: <i>K-fold</i></b> .....	<b>15</b>
<b>2.3.3</b>	<b>SMOTE</b> .....	<b>16</b>
<b>2.3.4</b>	<b>LIME</b> .....	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Inteligência computacional aplicada na cafeicultura</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Banco de dados</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Correlação linear</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>SMOTE</b> .....	<b>22</b>
<b>3.4</b>	<b>Redes neurais artificiais</b> .....	<b>22</b>
<b>3.5</b>	<b>LIME</b> .....	<b>24</b>
<b>3.5.1</b>	<b>Método para análise dos dados do LIME</b> .....	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1</b>	<b>Correlação de Pearson</b> .....	<b>27</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Análise com base em RNA da influência dos fatores sobre a eficiência de derriça</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Análise com base em RNA da influência dos fatores sobre a perda de chão</b> .....	<b>36</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Análise com base em RNA da influência dos fatores sobre a eficiência de colheita</b> .....	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>45</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é responsável pela produção de aproximadamente um terço do café mundial, sendo assim o maior produtor há 150 anos. A cafeicultura tem um papel muito importante na economia nacional, sendo fundamental para diversas regiões. Ao longo dos últimos anos a produção de café nacional tem aumentado de forma significativa, enquanto a área de produção teve uma leve diminuição, ou seja, os produtores estão conseguindo produzir mais em menor espaço. (CONAB, 2020)

O aumento da produtividade do café brasileiro está relacionado com o avanço de pesquisas, maior uso da cafeicultura de precisão e o desenvolvimento de novas tecnologias na área, como exemplo, cultivares mais produtivos, defensivos mais eficazes, implementos e máquinas com tecnologia embarcada, uso de VANT (veículo aéreo não tripulável) para monitoramento e controle, sistemas digitais para gerenciamento remoto e também a evolução nas técnicas e boas práticas de manejo da lavoura.

Na cafeicultura os maiores custos de produção se encontram nos processos de colheita e pós colheita. Segundo Silva et al. (2013) a redução do custo de uma colheita mecânica se comparada a colheita manual pode chegar a 56% caso a máquina seja do produtor ou 48% no caso de a máquina ser alugada, além disso, a mão de obra para a colheita manual do café se encontra cada vez mais escassa. Isso indica que há uma forte tendência para o aumento contínuo desta operação de forma mecânica.

De acordo com Pimenta (1995) o café quando colhido no estágio de maturação verde apresenta altos teores de fenólicos totais (alta adstringência), já quando se encontram no estágio seco apresentam uma redução de peso. Portanto, é importante que a colheita seja feita no período intermediário. Esta janela ideal de colheita acontece em um intervalo curto de tempo, sendo necessário o uso de maquinário para a colheita hábil.

A programação da colheita deve ser feita levando em consideração a maturação da lavoura. No final da década de 90, Pereira, Vasconcelos e Sales (1999), recomendavam iniciar a colheita com porcentagem de frutos cerejas entre 80 e 90%. Entretanto, nos últimos anos, com a desuniformidade da maturação ocasionada devido à variação climática na época fenológica da floração, programar a colheita passou a ser uma tarefa desafiadora. Esperar para se ter uma maior quantidade de frutos cerejas pode ocasionar uma colheita com maior quantidade de frutos secos e perdas de chão. Com isso, na última década, o uso da colheita escalonada e da colheita

seletiva se intensificou por meio da busca em se retirar da planta os melhores frutos (FERREIRA JÚNIOR et al. 2017).

Além do planejamento da colheita, o produtor deve também se ater a outros cuidados pré-colheita, como por exemplo, bom funcionamento do maquinário em caso de colheita mecânica, contratação de mão de obra em caso de colheita manual, ficar atento ao clima para que não ocorra nenhuma surpresa, garantir que as entre linhas das lavouras estejam limpas além da preparação dos equipamentos e estruturas de pós colheita.

No caso da colheita mecânica, ao entrar com a colhedora na lavoura haverá diversos fatores influenciando no desempenho desta máquina, como as regulagens da máquina, porte das plantas, carga pendente, topografia, espaçamento do plantio e habilidades operacionais (FERREIRA JÚNIOR et al. 2016a).

Sabendo-se da importância do café para a economia brasileira, uma vez que segundo Embrapa (2020) o café se classificou como quinto colocado no ranking das culturas que mais arrecadaram em 2020, e que sua colheita é o processo de maior importância e complexidade, refletindo na qualidade do café e na renda do cafeicultor, o presente estudo propõe identificar, os fatores que mais influenciam nas eficiências e na perda de uma colheita mecanizada, utilizando-se técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning*), onde o computador é capaz de aprender com experiências anteriores, reconhecer padrões e retornar como saída as melhores propostas com base nos erros e acertos cometidos anteriormente.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Colheita do café**

O Instituto Brasileiro do Café – IBC (1974) ressalta que a colheita do café varia devido a região que se encontra a lavoura, pelas diferenças de clima, altitude e latitude. Pimenta (1995) ressalta que esta operação deve ocorrer no momento em que a maior parte dos frutos estiver maduro (evitando assim a queda destes frutos caso sequem na planta) e também minimizando a colheita de frutos verdes.

Segundo Silva (2004) a colheita é um dos processos mais importantes na cadeia produtiva do café, pelo fato de requerer muito trabalho em um intervalo curto de tempo e está diretamente relacionada com a qualidade do fruto. O sistema de colheita pode ser manual, semimecanizado ou mecanizado, vai depender dos mecanismos utilizados na operação.

A redução dos custos da colheita mecanizada se comparada a colheita manual é de 56% quando o cafeicultor é o proprietário da máquina, já para os produtores que alugam máquina a redução se encontra na ordem de 48% (SILVA et al., 2013).

Segundo Silva (2008) os cafeicultores encontram no período de colheita uma grande dificuldade de encontrar mão de obra. Esta escassez de trabalhadores tem se tornado cada vez maior. Além disso, a busca por rendimento, agilidade e qualidade durante a colheita são fatores fundamentais que favorecem o crescimento da prática de colheita mecanizada.

#### **2.1.1 Colheita mecânica do café**

Devido à escassez de mão de obra já era notado por Silva et al. (1997) que, naquela época, equipamentos derriçadores estavam fazendo parte das operações de colheita do café no Brasil. Estes equipamentos apresentavam melhor desempenho na operação do que o serviço manual, sendo assim, considerado uma boa alternativa para os produtores.

As máquinas colhedoras de café surgiram na década de 80, adaptadas de colhedoras mecânicas de amoras nos EUA, mas desde o final da década de 60, a colheita mecanizada de produtos por meio de vibração mecânica vem sendo estudada por diversos pesquisadores (SAMPAIO, 2000).

Segundo Silva et al. (2007) o princípio que rege a colheita mecânica é o da vibração, onde hastes vibratórias adentram os ramos do cafeeiro e realizam a derriça dos frutos. Os frutos cerejas, passas e secos se desprendem com vibrações inferiores se comparados aos frutos verdes.

No Brasil de modo geral já é notado o aumento do uso de máquinas na colheita do café, tendo maior ressalva nas regiões com topografia suave e plantios com espaçamento adequado para seu deslocamento. (SILVA, 2008).

Segundo Souza (2004) é importante a compreensão de parâmetros que influenciam na eficiência da derriça das colhedoras de café, analisando a amplitude e frequência da vibração de colhedoras em diferentes plantas com diversos comprimentos de ramos e estádios de maturação, foi observado que a diferença de comprimento e estágio de maturação influenciaram na derriça.

As propriedades mecânicas, geométricas e dinâmicas dos frutos e da planta devem ser conhecidas para a otimização de colhedoras de café. E que para melhoramento de projetos deve-se realizar experimentos laboratoriais para análise do comportamento fruto-pedúnculo-ramo (GUEDES, 2011).

Se comparada com as grandes culturas, a colheita do café se mostra bem mais complexa, devido à arquitetura das plantas (altura, largura, comprimento de ramos e quantidade de folhas), fatores como a desuniformidade da maturação e alto teor de água agregam também para a complexidade da operação (FERRAZ et al., 2012).

Avelar et al. (2013) observaram que frutos em estádios de maturação mais avançados apresentam menor força de desprendimento e conseqüentemente a derriça se torna mais fácil, este mesmo autor comprovou que as cultivares com menor número de ramos plagiotrópicos primários também apresentam menos dificuldade de serem derriçadas.

Silva et al (2010) afirmaram que a força de desprendimento entre as cultivares Mundo Novo, Catuaí e Icatu se diferem, assim como a diferença entre as forças de desprendimento dos frutos verde e cereja destas cultivares, além disto é afirmado que estes fatores afetam o desempenho da colheita mecanizada.

Oliveira et al. (2007), avaliando a influência da vibração e velocidade da máquina na colheita mecânica do café, identificaram que a vibração impacta de forma diretamente proporcional na eficiência de colheita, eficiência de derriça e na desfolha do cafeeiro, a relação

entre vibração e perda da máquina não é dada de forma linear. Já a velocidade operacional influencia de forma inversamente proporcional a eficiência de colheita e diretamente proporcional a perda da máquina.

Ao avaliar a influência do torque dos cilindros vibradores e velocidade de deslocamento da máquina na eficiência de derriça em condições reais de colheita, Sales (2011) concluiu que há diferenciações significativas na eficiência ao alterar o torque e/ou a velocidade operacional.

Silva et al (2013) avaliando a força de desprendimento do fruto concluíram que o desempenho operacional da máquina está relacionado tanto com a força de desprendimento dos frutos a serem derriçados como a vibração dos cilindros osciladores da máquina.

Ferreira Júnior et al. (2016b) utilizando microcontrolador Arduino e sensores de vibração, avaliaram o comportamento dinâmico das hastes derriçadoras de uma colhedora de café em condições de campo, e assim identificou os perfis de vibração das mesmas, podendo inferir sobre os ajustes que se mostraram mais efetivos durante a derriça.

Através de instrumentação das plantas de café, e uso de processamento de sinais, Ferreira Júnior et al. (2020) identificaram o comportamento dinâmico dos ramos do cafeeiro em momento real de colheita. Os mesmos autores, correlacionaram os deslocamentos dos ramos encontrados, com a eficiência de derriça, desfolha e seletividade dos frutos descobrindo as melhores formas de se vibrar os ramos para uma colheita mais eficiente, com maior preservação da planta e maior seletividades de frutos.

Com a instrumentação de ramos do cafeeiro, Ferreira Júnior (2018a) estudou em campo o comportamento vibratório dos ramos do cafeeiro incluindo a transmissibilidade de vibração na planta.

Ferreira Júnior et al. (2018b) observa que para o caso de colheita seletiva, além de analisar a diferença da força de desprendimento entre os frutos verde e cereja, outros fatores como proporção de maturação e carga pendente também devem ser analisados, pois podem interferir na colheita mecanizada.

O Brasil possui as melhores e mais modernas tecnologias para máquinas colhedoras de café do mundo, sendo palpáveis aos grandes e também aos pequenos produtores, este fato contribui de forma direta para o sucesso da cafeicultura brasileira (SILVA, MIRANDA E SILVA, 2014).

## 2.2 Correlação linear

Segundo Vargas (2019) o coeficiente de correlação linear de Pearson é responsável pela análise de como duas variáveis quantitativas se correlacionam linearmente. Descreve como uma linha reta se ajustaria em uma nuvem de pontos. O coeficiente é representado pela letra “r” e varia de -1 até 1, sendo calculado pela equação:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2][\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (1)$$

Onde:

- $r = 1$ , representa correlação perfeitamente positiva entre as variáveis;
- $r = 0$ , significa que as duas variáveis não são dependentes linearmente;
- $r = -1$ , que dizer que existe uma correlação perfeitamente negativa entre as duas variáveis.

Como é mostrado na Figura 1:

Figura 1 – Significado do coeficiente de Pearson.



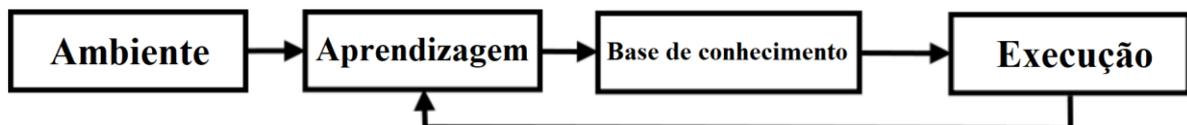
Fonte: Do autor (2021)

## 2.3 Aprendizado de máquinas

O aprendizado é caracterizado pela aquisição de conhecimento por meio da observação e experimentação, ou então pela combinação das duas dimensões (MICHALSKI; TECUCI, 1993). Ainda neste sentido, Wang, Ma e Zhou (2009) definem a aquisição de conhecimento de máquinas com a utilização de computadores como aprendizado de máquinas, este método é capaz de desenvolver modelos que se auto incrementam para obtenção de novos conhecimentos e habilidades com identificação de conhecimentos já existentes.

Com o objetivo de obter novos conhecimentos e novas habilidades, organizando as estruturas do conhecimento, o aprendizado de máquinas tenta simular a aprendizagem humana. Modelos de aprendizagem de máquinas por meio de computadores são criados baseados em pesquisas de psicologia e ciência cognitiva (XUE; ZHU, 2009).

Figura 2 – Estrutura básica de um sistema de aprendizagem de máquina



Fonte: XUE; ZHU (2009)

### 2.3.1 Redes neurais artificiais

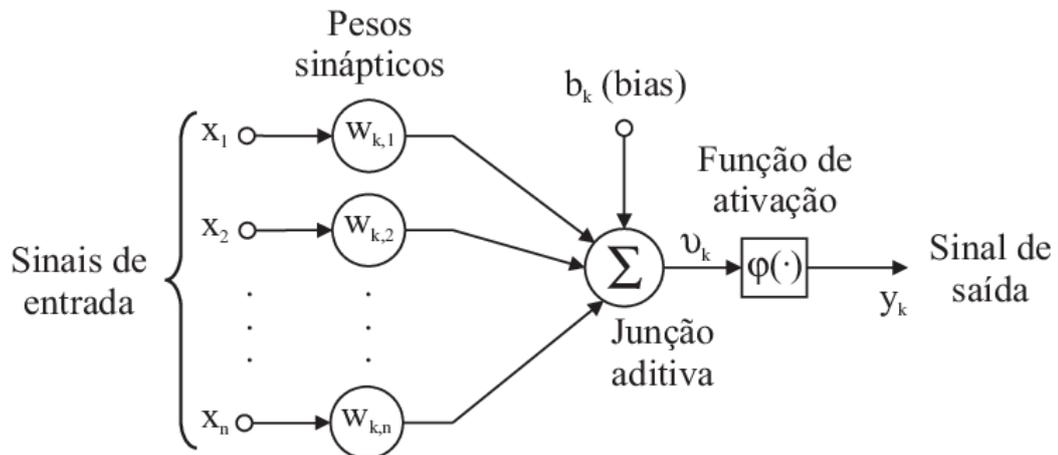
Segundo Haykin (2007) as redes neurais artificiais (RNA), são modelos matemáticos baseados nos princípios de funcionamento dos neurônios biológicos. O primeiro modelo foi proposto por (MCCULLOCH; PITTS, 1943), onde foi apresentado um modelo que representava cada passo do processamento de um neurônio natural.

As RNA's buscam coletar evidências empíricas enquanto preservam e permitem o uso de conhecimento experimental. Em seu funcionamento há comunicações entre neurônios que são utilizadas com a finalidade de aprendizagem e armazenamento de conhecimento (SILVEIRA-MARTINS et al., 2016)

Quanto a topologia, na utilização de uma RNA deve-se definir informações sobre o número de dados de entrada, o número de camadas escondidas e o número de neurônios a serem

inseridos em cada uma dessas camadas e também a quantidade de saídas desejada do modelo. (TAVARES et al., 2016).

Figura 3 – Modelo simplificado de uma rede neural.



Fonte: ZANETTI et al., (2008)

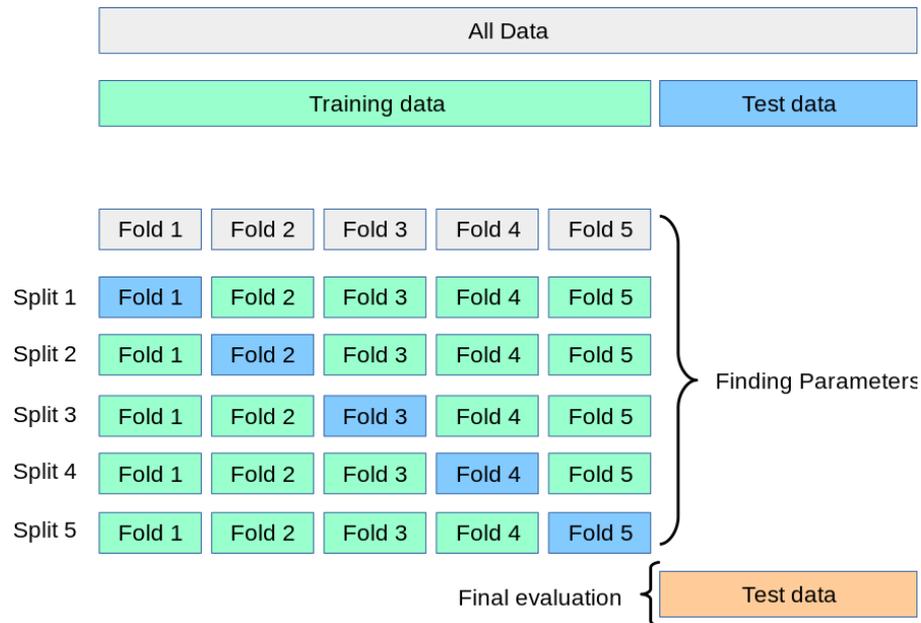
### 2.3.2 Validação cruzada: *K-fold*

Segundo Kohavi (1995), é essencial a validação de um modelo de RNA, para a avaliação da capacidade de predição do mesmo. A validação cruzada é fundamentada na repartição de um conjunto de dados em subconjuntos, onde parte destes subconjuntos são utilizados para treinamento e o restante para a validação do modelo.

Nas redes neurais artificiais é necessário à validação do modelo sugerido pela RNA, para isto utiliza-se do *K-fold* um método de validação cruzada. O funcionamento do *K-fold* se dá pela divisão dos dados em *K* partes (*fold*s), onde cada uma possui tamanhos similares. Este método terá *K* iterações e em cada uma das interações, um dos *fold*s será separado para o teste, enquanto os outros *fold*s serão utilizados para o treino. Portanto, ao final de todos os *K* passos, teríamos utilizados na sua totalidade os dados para treino e na parte de validação ou teste (BURMAN, 1989).

Com esta validação cruzada possível avaliar a qualidade do modelo criado, e garante-se também que os dados utilizados nos treinamentos não estejam nos testes de cada interação, o que proporciona a generalização do modelo para dados ainda não conhecidos.

Figura 4 – Esquema de funcionamento do K-fold.



Fonte: Scikit Learn (2021)

### 2.3.3 SMOTE

O SMOTE (*Synthetic Minority Oversampling Technique*) é a técnica de criação de dados sintéticos, seja para balanceamento de parcelas com números de dados inferior as outras, ou para a geração de dados em bancos de dados com tamanho insuficiente para a aprendizagem da rede neural artificial.

A técnica SMOTE sugerida por (CHAWLA et al., 2006) gera dados artificiais através de interpolação. Para isto, ela utiliza o algoritmo *K-Nearest Neighbors* (KNN) (AHA; KIBLER; ALBERT, 1991) para produzir representantes entre exemplos e seus  $k$  vizinhos.

### 2.3.4 LIME

LIME (*Local Interpretable Model-agnostic Explanations*) é um algoritmo que fornece explicações sobre modelos computacionais de difícil compreensão, como é o caso das redes neurais, estas são criadas em “caixas pretas”, onde não é possível o acesso aos cálculos realizados por ela. Como o próprio nome já diz LIME que no português significa: explicações agnósticas locais de modelos interpretáveis, ou seja, o algoritmo pega um modelo não interpretável e tenta baseá-lo num modelo já conhecido, como por exemplo, modelos lineares

e árvores de decisões, e assim fica possível a análise deste modelo que antes não se conseguia interpretá-lo (MISHRA et al., 2017).

Ao criar um modelo matemático através da rede neural, não é fácil a compreensão dos cálculos envolvidos nas equações, principalmente quando se trata de variáveis de planta, ambiente, máquina e influência humana somados juntos, como é o caso da colheita mecânica do café, por isto é necessário a utilização da ferramenta computacional LIME, que é capaz de analisar este modelo e mostrar de forma visível, qual a intensidade que as variáveis estão interferindo para o resultado final daquele modelo.

O LIME segundo Zafar et al. (2019) é uma técnica bastante utilizada na interpretação e explicação de algoritmos de aprendizado de máquina de caixa preta. Esta ferramenta funciona geralmente analisando uma predição por vez, e retornando uma interpretação pra cada predição separadamente, e assim este método se mostra mais efetivo do que outras ferramentas existentes para interpretação de algoritmos de rede neural.

A técnica LIME além de auxiliar na descoberta de quais as variáveis mais interferem para o resultado final, permite também a identificação dos intervalos em que as variáveis podem contribuir de forma positiva ou negativa.

## **2.4 Inteligência computacional aplicada na cafeicultura**

Almeida et al. (2019) utilizou o software capaz de realizar análises de literaturas, o CiteSpace™, para analisar um vasto banco de dados com diversas publicações relacionadas a “colheita mecânica do café”, e assim concluir que os países que mais publicam sobre o tema são o Brasil com 54% de todas as publicações, seguido dos Estados Unidos com 18% e Colômbia, México e Espanha com 7% cada. Além de afirmar que o autor que mais se destacou foi o professor Dr. Fábio Moreira da Silva da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Leme et al. (2019) desenvolveram modelo RNA com  $R^2$  igual a 0,99 capaz de classificar o grau da torra do café em grão com base em imagens do mesmo, já para os grãos de café moídos, o modelo utilizado apresentou erro médio de 0,93. este trabalho possibilita uma maior confiabilidade na análise do grau de torra, podendo substituir a intervenção humana com grande precisão.

Bersabal et al. (2020) utilizando inteligência artificial desenvolveu um classificador capaz de identificar qual a espécie do café, baseando-se em características como a área, perímetro, diâmetro equivalente e circularidade de grãos fotografados. Segundo estes autores a precisão do melhor classificador, o Bagged Tree, foi de 95,6%.

Andrade et al. (2020) através da RNA perceptron multicamadas conseguiram prever a porcentagem de ocorrência de pragas e incidência de doenças no cafeeiro, o banco de dados do presente trabalho contava com dados meteorológicos utilizados como entrada no modelo RNA e os valores dos dados referentes às pragas e doenças foram coletados no Campo Experimental da EPAMIG de São Sebastião do Paraíso.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Banco de dados

Para a execução deste trabalho utilizou-se um banco de dados da empresa LD Gonzaga Treinamentos e Consultoria Agrícola Ltda, constituído por informações coletadas em duas fazendas situadas no município de Nepomuceno-MG, durante o ano de 2019, sendo:

- a) regulagens das máquinas colhedoras de café: velocidade de deslocamento, frequência de vibração dos cilindros osciladores e freio dos cilindros;
- b) maturação dos frutos colhidos;
- c) data da colheita;
- d) espaçamento da lavoura;
- e) queda natural média;
- f) máquina. Nestas propriedades foram utilizadas para a colheita, três máquinas automotrizas diferentes, sendo elas, uma Jacto modelo K3 Challenger que em 2019 trabalhou 584 horas, uma TDI que trabalhou 590 horas e uma mini TDI Mini alugada por 150 horas;
- g) operações: primeira passada (semi seletiva), segunda passada (plena) ou passada única;
- h) cultivar, e com base na cultivar foi implicado algumas características já preditas sobre elas, extraídas de boletins técnicos, para este trabalho tinha-se as cultivares Acaiá, Bourbon Amarelo, Catuaí Amarelo, Catucaí 2SL, Icatu Vermelho e Mundo Novo;
- i) área total do talhão;
- j) dados meteorológicos. Extraídos do banco de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) de acordo com a data da operação, de uma estação meteorológica autônoma situada em Varginha MG a aproximadamente 30 Km de distância das fazendas. Os dados meteorológicos são computados a cada hora por se tratar de uma estação automatizada. Como não constava no banco de dados do INMET, a hora exata da operação, realizou-se a média dos valores ocorridos entre as seis horas até as dezoito horas, sendo este o período em que as operações ocorriam na fazenda.
- k) eficiência de derriça, eficiência de colheita e perda de chão da máquina, dados estes calculados através das seguintes equações já utilizadas por Oliveira et al. (2007), Sales (2011) e Ferreira Júnior (2018a):

- Eficiência de derriça:

$$Ef, d = \frac{Vd}{Cp} \times 100 \quad (2)$$

- Eficiência de colheita:

$$Ef, c = \frac{Vc}{Cp} \times 100 \quad (3)$$

- Perda de chão:

$$Pc = (Ef, d - Ef, c) = \frac{Vd - Vc}{Cp} \times 100 \quad (4)$$

Onde,

$Ef, d$  é a eficiência de derriça (%);

$Ef, c$  é a eficiência de colheita (%);

$Pc$  é a perda de chão (%), que é o volume de café perdido pela máquina durante a operação;

$Vd$  é o volume que foi derriçado ( $L.p l^{-1}$ ), este valor é dado pela soma do volume colhido mais as perdas de chão;

$Vc$  é o volume colhido ( $L.p l^{-1}$ ), sendo o volume de café que chegou ao tanque graneleiro da máquina;

$Cp$  é a carga pendente da planta ( $L.p l^{-1}$ ), esta é a carga de frutos que há na planta antes da máquina passar.

Ao final da organização e cálculo dos dados, foi obtido uma planilha com 50 linhas (amostras) por 52 colunas (fatores), com o seguinte formato (Figura 5).

Figura 5 – Modelo da planilha utilizada no trabalho

Talhão	Fazenda	Velocidade (Km.h <sup>-1</sup> )	Frequência de Vibração (Hz)	Freio (Kgf)	Operação	...	Ef derrixa (%)	Ef colheita (%)	Perda (%)
1	A	1,0	10	9	Prim.	...	95	90	5
2	A	0,9	13,33	9	Única	...	80	70	10
3	B	1,1	11,67	8	Seg.	...	85	80	5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
50	B	0,8	13,33	9	Única	...	98	90	8

Fonte: LD Gonzaga Treinamentos e Consultoria Agrícola Ltda (2020)

Nas colunas se encontram os valores de cada amostra, de cada um dos fatores que supostamente podem interferir na colheita mecânica, na Tabela 1 pode-se observar todas estas variáveis.

Tabela 1 – Fatores candidatos a serem utilizadas como entrada no modelo da RNA, mais as 3 saídas a serem analisadas

Informações do banco de dados da empresa LD Gonzaga	Entradas		Informações coletadas em estação meteorológica	Saídas
	Informações de boletim técnico das cultivares			Informações do banco de dados da empresa LD Gonzaga
Talhão	Cor do fruto		Temp. Ins.	Eficiência de derrixa
Fazenda	Uniformidade de maturação		Temp. Max.	Eficiência de colheita
Velocidade	Maturação		Temp. Min.	Perda da máquina
Vibração	Tempo de maturação (dias)		Umi. Ins.	
Freio	Porte		Umi. Max.	
Verde	Copa		Umi. Min.	
Verde cana	Diâmetro da copa		Pto Orvalho Ins.	
Cereja	Ramificações		Pto Orvalho Max.	
Passa	Internódios		Pto Orvalho Min.	
Seco	Resposta a poda		Pressão Ins.	
Dia	Produtividade		Pressão Max.	
Mês	Vigor		Pressão Min.	
Espaço ruas	Aderência do fruto a planta		Vel. Vento	
Espaço plts			Dir. Vento	
Área do talhão			Raj. Vento	
Queda natural			Radiação	
Máquina				
Operação				
Varietade				
Data				

Fonte: LD Gonzaga Treinamentos e Consultoria Agrícola Ltda (2020)

### 3.2 Correlação linear

Como uma primeira análise, utilizou-se o coeficiente de Pearson, para avaliar se estas variáveis se correlacionam de forma linear com as saídas (eficiência de derrixa, eficiência de colheita e perda da máquina).

O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado também para a análise de correlação entre as variáveis de entrada, para a verificação de redundâncias. Em casos de alta correlação de uma variável de entrada com outra, o ideal é que se houver problemas no modelo criado pela rede neural, deve-se excluir estas variáveis redundantes.

### 3.3 SMOTE

Para a criação do modelo de previsão, utilizou-se a ferramenta computacional SMOTE através do *software* MATLAB, para a criação de 100 amostras de dados sintéticos baseados nas 50 amostras reais já existentes a fim de possibilitar o desenvolvimento do modelo matemático e minimizar erros nas predições.

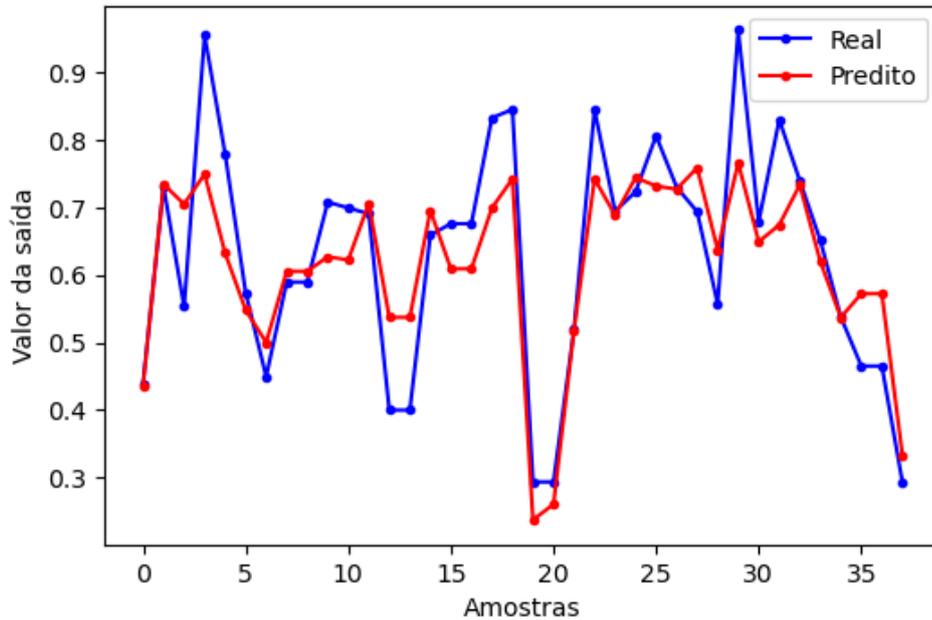
### 3.4 Redes neurais artificiais

Para prever as eficiências de derrixa e colheita e a perda da máquina, utilizou-se a técnica de RNA's por meio do *software* Spyder, o qual utiliza linguagem de programação Python. Para isso, importou-se algumas bibliotecas desta linguagem, sendo elas: Pandas, Numpy, Matplotlib, Sci-kit Learn.

Após a criação do modelo pela rede neural, é necessário a verificação se o modelo consegue prever bem as saídas desejadas, para a verificação da qualidade do modelo desenvolvido pela rede neural foi utilizado o *Kfold*.

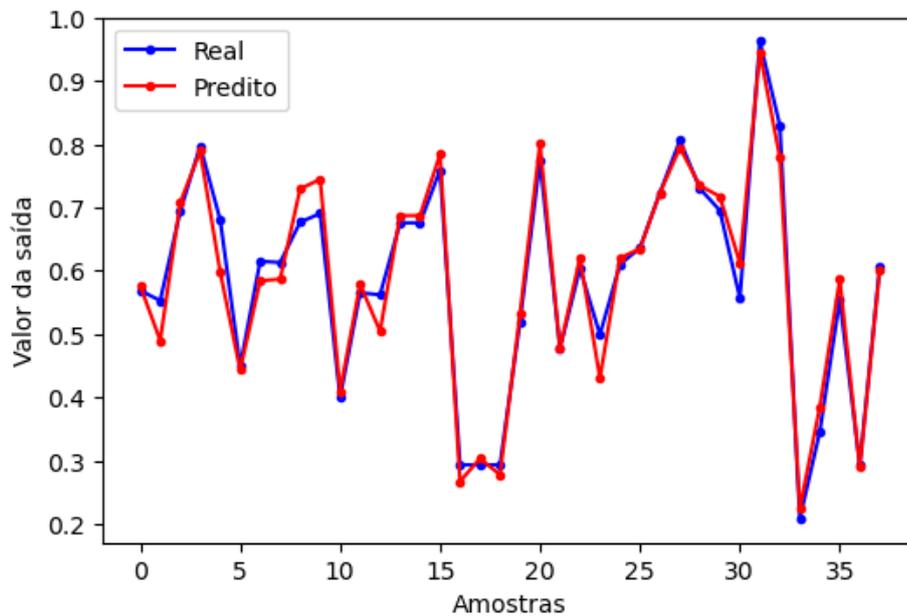
Para exemplificar a qualidade da predição do modelo sugerido pela RNA, foram construídos dois gráficos (representados pelas Figuras 6 e 7), sendo um apresentando uma predição ruim e o outro uma boa predição.

Figura 6 – Modelo de gráfico emitido após o teste de validação no Kfold, neste exemplo observa-se um fold com 35 dados, onde a predição não foi muito boa.



Fonte: Do autor (2021)

Figura 7 – Modelo de gráfico emitido após o teste de validação no Kfold, neste exemplo observa-se um fold com 35 dados, onde a predição foi boa.



Fonte: Do autor (2021)

### 3.5 LIME

Visando análise efetiva do modelo, a fim de identificar o grau de influência das variáveis no resultado final do modelo, assim como sua intensidade utilizou-se a ferramenta computacional LIME, visto que a colheita mecânica do café é dinâmica e complexa pois existe interação entre variáveis da planta, do ambiente, da máquina e humana.

O LIME foi utilizado através do software Jupyter, neste software a ferramenta LIME dá como saída duas tabelas que foram unificadas no Excel para melhor manipulação destes dados, tais tabelas estão exemplificadas na Figura 8 (uma em cinza e a outra em azul e laranja).

Na Figura 8 pode-se observar na coluna “Fator” cada um dos fatores que foram analisados, a coluna “Posição” representa em que posição no ranking de importância cada uma dos fatores apareceu com base no módulo da “Intensidade”, quanto as cores (azul e laranja) cada uma delas representam se estes fatores contribuíram de forma positiva ou negativa para o resultado final, estes sinais podem ser notados na coluna “Intensidade” onde é exibido a intensidade que cada um dos fatores influenciaram para o resultado seguidos de seus respectivos sinais, a coluna “Motivo” representa o porquê este fator foi classificado como positivo ou negativo, na primeira coluna denominada como “Valor” tem-se os respectivos valores dos fatores literários codificados e na seguinte coluna os valores dos fatores numéricos.

Figura 8 – Exemplo de tabela gerada pelo LIME

Posição	Motivo	Intensidade	Fator	Valor	Valor
1	fator a <= 4.02	-0.180562	fator a		2.13
2	fator b <= 20.00	0.176736	fator b		19.00
3	fator c=1	0.151040	fator c	1	
4	fator d <= 10.76	-0.127440	fator d		10.00
5	fator e=1	-0.120861	fator e	1	

Fonte: Do autor (2021)

### 3.5.1 Método para análise dos dados do LIME

Baseado no exemplo da Figura 8 apresentada na seção anterior, cada tabela da Figura 9 a seguir, refere-se a análise de apenas uma linha (amostra) do banco de dados reais, ou seja, para análise de cada uma das saídas foi gerada 50 tabelas como esta e com isso organizou-se três tabelas (cada uma para uma saída), como apresentado (Figura 9).

Figura 9 – Exemplo do modelo de organização dos dados do LIME no Excel

<b>Amostra 1</b>					
Posição	Motivo	Intensidade	Fator	Valor	Valor
1	copa=1	0.152200	copa	1	
2	cor fruto=1	-0.127596	cor fruto	1	
3	porte=4	-0.115833	porte	4	
4	máquina=1	0.114643	máquina	1	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	ader. =1	-0.097321	ader.	1	

<b>Amostra 2</b>					
Posição	Motivo	Intensidade	Fator	Valor	Valor
1	área <= 4.02	-0.180562	área		2.13
2	data <= 20.00	0.176736	data		19.00
3	copa=1	0.151040	copa	1	
4	vib. <= 10.76	-0.127440	vib.		10.00
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	porte=4	-0.103479	porte	4	

⋮

<b>Amostra 50</b>					
Posição	Motivo	Intensidade	Fator	Valor	Valor
1	copa=1	0.157941	copa	1	
2	cor fruto=1	-0.130405	cor fruto	1	
3	vib. <= 10.76	-0.124512	vib.		10.00
4	porte=4	-0.111439	porte	4	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	t. da copa=1	0.100177	t. da copa	1	

Fonte: Do autor (2021)

A partir da organização destes dados foi realizado o cálculo da média das posições em que aparecem cada um dos fatores, como exemplo o fator “copa” que nas tabelas referentes as amostras 1 e 2, aparece respectivamente nas posições 1 e 3, ou seja, em média este fator aparece na segunda posição.

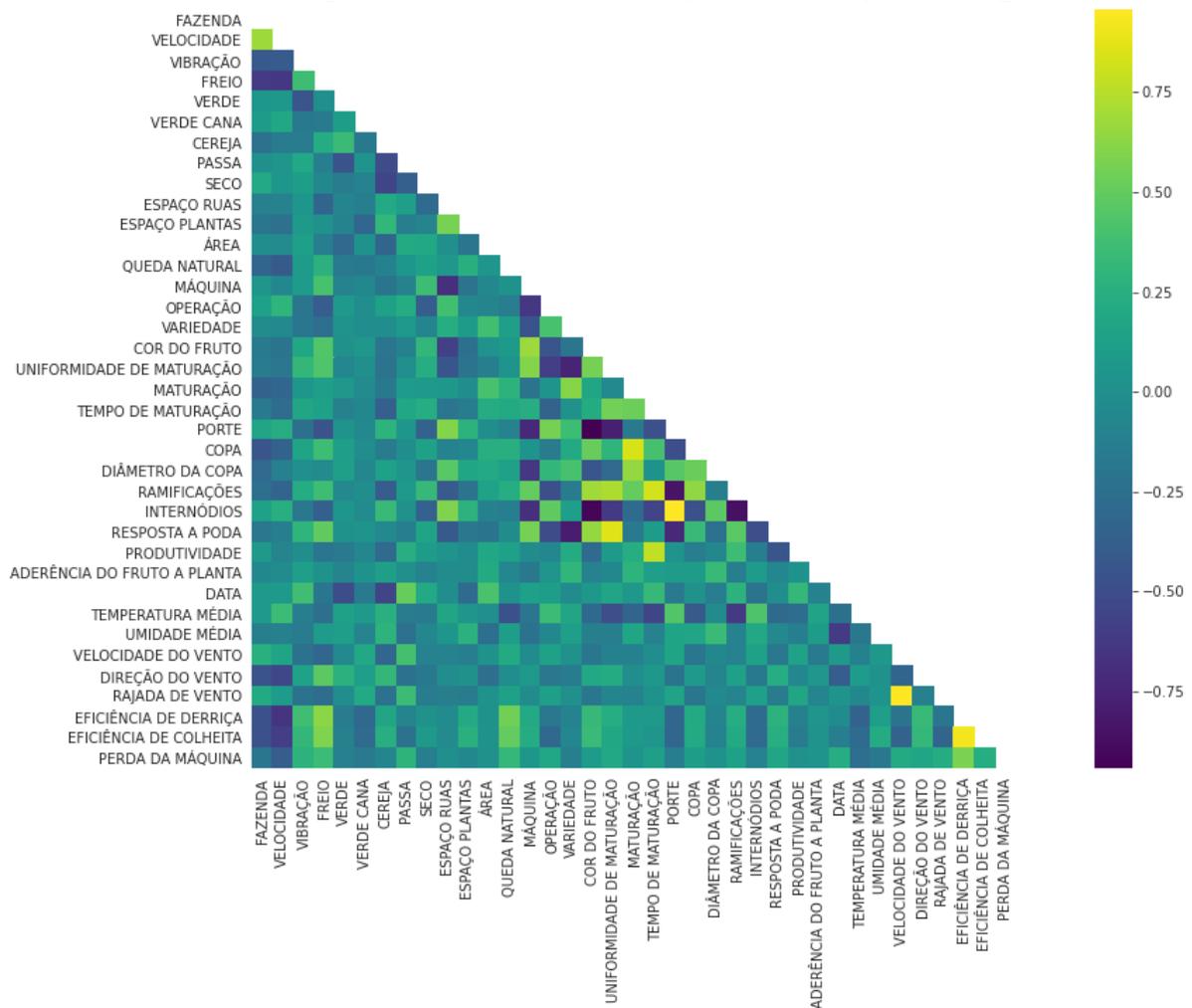
Na coluna “Fator” foi aplicado o filtro do Excel para analisar a coluna denominada de “Motivo”, a partir da análise desta coluna foi observado os intervalos para cada um dos fatores que se correlacionavam de forma positiva (laranja) com a saída e os intervalos que se correlacionavam de forma negativa (azul). Com esta análise buscou-se os intervalos positivos para recomendação da maximização das eficiências e os negativos para a minimização das perdas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Correlação de Pearson

Como citado no final da subseção 3.1, a planilha após a organização de todos os dados contava com 52 variáveis (colunas). Após a análise dos coeficientes de Pearson e em seguida a filtragem das redundâncias, chegou-se no seguinte resultado: uma planilha com 37 variáveis, onde estão incluídas as 3 saídas, totalizando 34 variáveis injetadas na rede neural como entrada (Figura 10).

Figura 10 – Valores dos coeficientes de Pearson na escala de cores a direita da imagem. Nesta imagem consta as 37 variáveis que restaram após a filtragem.



Fonte: Do autor (2021)

Após a filtragem dos dados, foi feita a análise de correlação linear entre todas as entradas com as saídas (Figura 11). Pôde-se verificar que a velocidade apresenta forte correlação inversa (azul escuro) com as eficiências, já a vibração mostra-se correlacionada de forma direta (verde claro) com as eficiências. Os resultados corroboram com os encontrados por Oliveira et al., (2007), os quais utilizando regressão encontraram influências similares.

Ao observar as correlações entre estas regulagens (velocidade e vibração) e a perda da máquina pode-se notar correlações inferiores se comparadas as correlações com as eficiências. Este fato pode ser melhor analisado através dos gráficos exibidos por Oliveira et al., (2007), onde é notado que a correlação da perda da máquina com a vibração é dada por uma parábola, e não por uma reta, já o gráfico perda da máquina no eixo y e velocidade no eixo x sugere que a correlação entre estas variáveis se dá de forma linear.

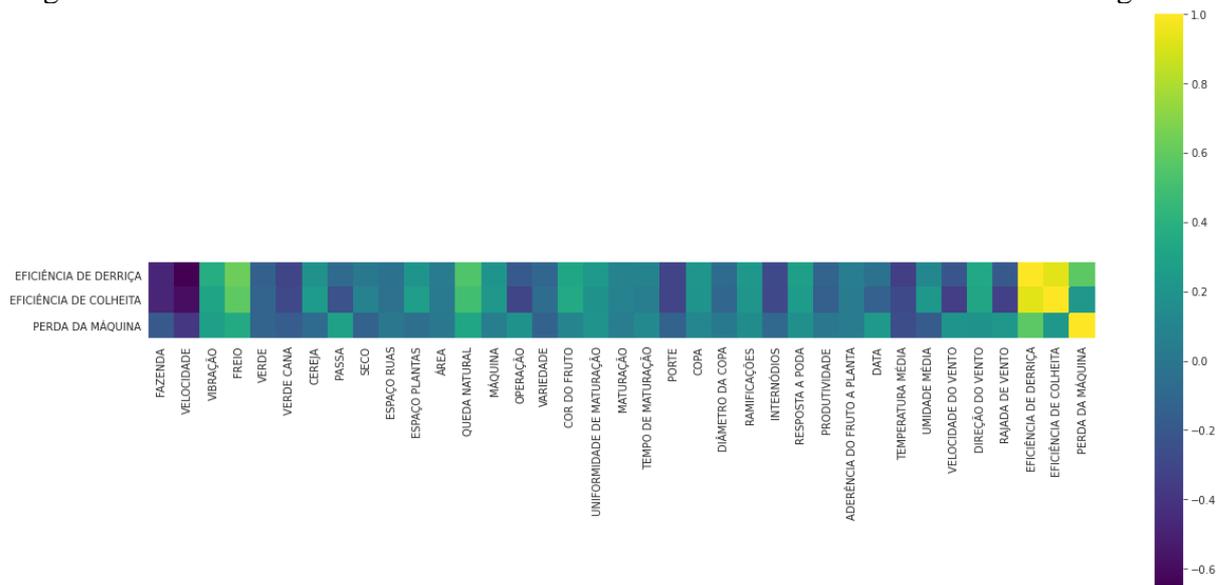
Como foi afirmado por Sales (2011) e posteriormente por Ferreira Júnior (2018a), o freio dos cilindros osciladores tem influência na eficiência da máquina. Neste estudo, os resultados mostraram (Figura 11) que o ajuste no freio dos cilindros osciladores da colhedora, tem uma forte correlação positiva (verde claro) com as eficiências, e uma correlação um pouco inferior, porém positiva com a perda da máquina.

Observou-se também, correlações lineares entre as características das plantas com as eficiências, destacando-se o porte da planta e o comprimento dos internódios, ambas com correlações positivas (azul escuro). O fato destas características interferirem na operação da colheita também foi identificado por Ferreira Júnior et al. (2016a).

Ao estudar a influência de parâmetros sobre a colheita mecanizada do café, Ferreira Júnior et al. (2016a) citam a possibilidade de características como o clima ser influente nesta relação. Dessa forma, o presente estudo contribui, conforme apresentado na Figura 11, evidenciando que a temperatura média do dia possui alta correlação negativa (azul escuro) com as eficiências e com a perda da máquina.

Além da temperatura, foi possível identificar (Figura 11) a participação efetiva de outras variáveis como a umidade relativa média do dia, que apresenta maior valor de correlação linear negativo (azul escuro) com a perda da máquina e a velocidade do vento que se destaca na correlação inversa (azul escuro) com a eficiência de colheita.

Figura 11 – Valores dos coeficientes de Pearson na escala de cores a direita da imagem.

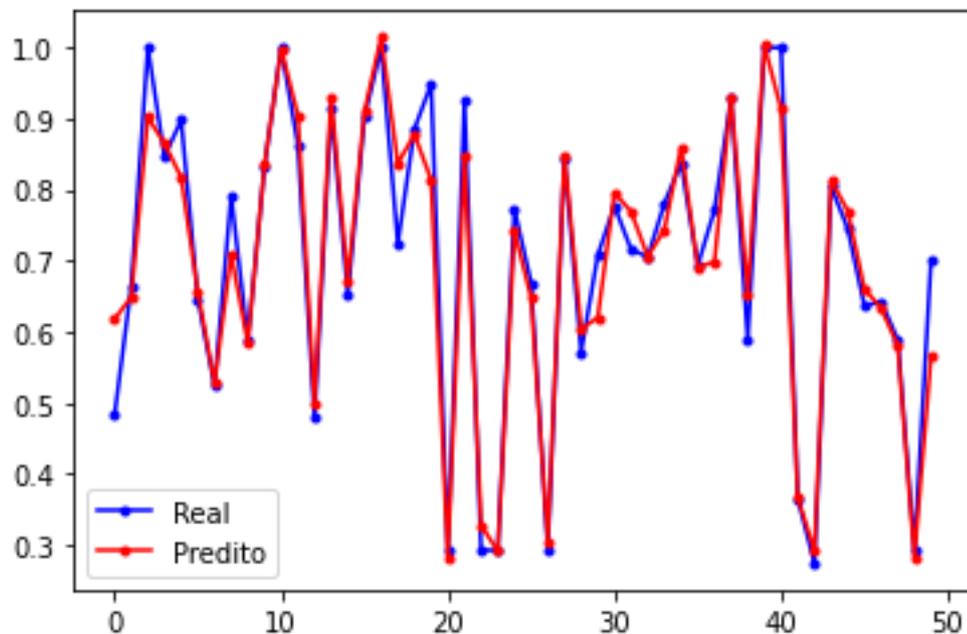


Fonte: Do autor (2021)

#### 4.1.1 Análise com base em RNA da influência dos fatores sobre a eficiência de derrça

Para a rede neural treinar e desenvolver um modelo eficaz na predição da eficiência de derrça foi utilizado as 100 amostras de dados sintéticos, já o teste de validação foi feito com as 50 amostras de dados reais, onde observa-se que a eficiência de derrça foi bem predita utilizando os 34 fatores como entrada, como pode ser observado na Figura 12, onde o modelo apresentou  $R^2$  igual a 0,94, RMSE igual a 0,05.

Figura 12 – Gráfico da predição da eficiência de derrça no modelo RNA, onde no eixo x estão as 50 amostras de dados reais (linhas) e no eixo y a eficiência de derrça, os pontos da linha azul representam a eficiência de derrça real de cada talhão e os pontos da linha vermelha as eficiências preditas.



Fonte: Do autor (2021)

Ao analisar a média da posição em que cada fator apareceu no ranking de importância e os motivos por que cada um deles interferiu na eficiência de derrça, chegou-se no seguinte resultado (Figura 13), onde os fatores estão apresentados em grupos de cores: na cor verde, estão os fatores ligados a características da planta, em laranja (salmão) fatores que se referem ao ambiente, em amarelo (mostarda) relacionados à máquina e em azul os outros fatores.

Figura 13 – Organização dos fatores com base nas posições médias e recomendações para maximizar eficiência de derricha

POSIÇÃO MÉDIA	FATORES	MAXIMIZAR EFICIÊNCIA DE DERRIÇA
2	Formato da copa	Copa cônica
4	Cor do fruto	Amarelo
5	Data da colheita	Entre o primeiro dia de colheita e o 37º dia
5	Porte da planta	Quanto menor
6	Resposta a poda	Média
7	Diâmetro da copa	Quanto menor
10	Área do talhão	Igual ou acima de 5,37 ha
11	Frequência de vibração da máquina	Entre 13,64 e 15,83 Hz
12	Fazenda	B
13	Temperatura média do dia	Abaixo de 20,13 graus celsius
13	Máquina	Jacto K3
15	Ramificações da planta	Quanto menos
16	Produtividade da planta	Média
16	Umidade média do dia	Acima de 59,73%
16	Velocidade média do vento no dia	Acima de 1,39 m.s <sup>-1</sup>
17	Freio dos cilindros osciladores	Entre 9 e 12 Kgf
17	Maturação	Precoce e média
17	Operação	Escalonada (primeira e segunda passadas)
17	Rajada de vento média do dia	Abaixo de 3,93 m.s <sup>-1</sup>
19	Aderência do fruto a planta	Inconclusivo
20	Uniformidade de maturação	Desuniforme
20	Velocidade da máquina	Igual ou abaixo de 1 Km.h <sup>-1</sup>
22	Cultivar	Mundo novo e Catucaí
22	Queda natura	Quanto maior
23	Quantidade de frutos seco	Quanto maior (acima de 32%)
24	Quantidade de frutos passa	Abaixo de 20%
25	Espaçamento entre plantas	0,8 m
25	Comprimento dos internódios	Curto
28	Espaçamento entre ruas	Quanto maior (3,8 e 4 m)
28	Quantidade de frutos verde cana	Quanto menor (abaixo de 7%)
29	Quantidade de frutos verdes	Quanto menor (abaixo de 14%)
30	Quantidade de frutos cerejas	Abaixo de 26%
30	Direção do vento	Abaixo de 243,63 graus
30	Tempo de maturação	Igual ou abaixo de 220 dias

Fonte: Do autor (2021)

Ao analisar os fatores sem uma titulação específica (outros), representados na Figura 13 na cor azul claro, observa-se os seguintes resultados:

- a) em média estes fatores são os de maior importância se comparado com os outros rótulos, tendo maior destaque a “Data da colheita”;
- b) em se tratando do fator “Data da colheita”, o resultado justifica, de forma metodológica, o que Ferreira Júnior et al. (2017) comentam sobre a importância da data de realização da colheita, pois, se iniciada antes do momento certo, pode ocasionar baixa eficiência de derriça e a colheita de frutos verdes, e caso for tardia, pode elevar a perda de chão e a colheita de frutos secos;
- c) quanto ao parâmetro “Fazenda”, apesar dos resultados apontarem relevância na participação da eficiência de derriça para a fazenda B, a interpretação torna-se difícil devido à quantidade de fatores que as pertencem e que não estavam disponíveis no banco de dados utilizados neste estudo.

Analisando os fatores relacionados a máquina, exibidos na Figura 13 na cor amarelo, observa-se os seguintes resultados:

- a) estes fatores juntos, quando calculado a média das posições entre todos os fatores avaliados, é o segundo grupo de fatores mais importante para a eficiência de derriça;
- b) O modelo da RNA, apontou o fator “Frequência de vibração da máquina” como de grande influência para a eficiência de derriça, o que corrobora com os trabalhos de Sales (2011), Silva (2013) e Ferreira Júnior et al. (2020), onde é afirmado que as maiores eficiências de derriça ocorreram nas maiores frequências de vibração;
- c) A ferramenta LIME indicou, no fator “Máquina”, que a máquina que melhor influenciou positivamente para a eficiência de derriça foi a máquina Jacto K3. Esta máquina é uma colhedora automotriz de maior porte quando comparada as outras máquinas;
- d) Sobre a regulagem do ajuste de freio dos cilindros osciladores das colhedoras, os resultados apresentados pela avaliação do LIME, informam que os ajustes entre 9 e 12 Kgf são altamente influentes para elevar a eficiência de derriça. Na literatura, Salles (2015), em experimentação de campo, encontrou a melhor regulagem do freio entre 8 e 10 Kgf. Mais adiante, Ferreira Júnior (2018a) comprova que as maiores eficiências de derriça ocorreram com o freio regulado em 10 Kgf. Mais uma vez os resultados da RNA aplicada para avaliação da eficiência de derriça estão de acordo com trabalhos realizados por outros pesquisadores.

- e) Quanto ao fator “Operação”, (que se refere a colheita plena, primeira passada ou segunda passada), foi indicado pelo LIME que as maiores eficiências ocorrem tanto na primeira quanto na segunda passada;
- f) Foi apontado pela análise da RNA que o fator “Velocidade da máquina” contribui de forma positiva para a eficiência de derriça com valores iguais ou inferiores a 1 Km.h<sup>-1</sup>. Este fato foi observado por Oliveira et al. (2007), onde é afirmado pelos autores que quanto menor a velocidade maiores são as eficiências de derriça.

Observando os fatores relacionados a características da planta, exibidos na Figura 13 com a cor verde claro, foi notado os seguintes resultados:

- a) estes fatores em média representam o terceiro grupo de fatores mais importantes para a eficiência de derriça;
- b) quanto ao “Formato da copa” é recomendado copas cônicas;
- c) para “Porte da planta” e “Diâmetro da copa” é indicado que quanto menor for essa planta melhores serão as eficiências de derriça, porém Ferreira Júnior (2018a) mostra também a importância da transmissibilidade da vibração, e para que isto ocorra as plantas devem ter porte suficiente para que haja bom contato com as hastes vibratória. Importante ressaltar que o porte das plantas que foram colhidas nestas fazendas, segundo a empresa LD Gonzaga, variavam de 1,60 m a 3,30 m de altura, sendo as mais altas com maior quantidade de ramificações dos ramos.
- d) o fator “Ramificações da planta” indica que quanto menos ramificações a mesma tiver, melhores serão as eficiências de derriça. Este fato foi observado por Avelar et al. (2013) e Ferreira Júnior et al. (2018b). Estes últimos autores citados, identificaram que a força de desprendimento dos frutos nos ramos plagiotrópicos secundários, na mesma maturação, são estatisticamente maiores, ou seja, é notado que plantas com menos ramificações são mais facilmente derriçadas;

Então, após as duas interpretações das secções c) e d), pode-se inferir que a relação de maximização da eficiência de derriça é crescente conforme a ramificação e altura de plantas diminuam de 3,30 m para 1,60 m.

- e) no fator “Cor do fruto” foi mostrado como recomendação para maximizar a eficiência de derriça os frutos da cor amarelo. Em média o tempo de maturação das cultivares amarelas estudadas neste trabalho é de 219 dias, enquanto que das vermelhas é de 224 dias, o fato

do amadurecimento mais precoce das cultivares amarelas pode ter contribuído para facilitar o desprendimento dos frutos, uma vez que Avelar et al. (2013) concluíram que plantas em estádios de maturação mais avançadas são mais facilmente derrichadas;

- f) o fator “Resposta a poda” indica que cultivares com resposta média a poda apresentam melhores eficiências, porém este fato é de difícil análise, pois não se tem o histórico de podas no banco de dados utilizado nesse trabalho;
- g) se tratando do fator “Produtividade da planta” o LIME sugeriu plantas com média produtividade;
- h) os fatores “Maturação” e “Tempo de maturação” indicam que quanto mais precoce for o tempo de amadurecimento dos frutos, maiores são as eficiências de derricha, isto ocorre pelo fato de que se os frutos amadurecem mais rápido, logo as colhedoras irão derrichar frutos em estádios de maturação mais avançados, e como foi observado por Avelar et al. (2013), Ferreira Júnior et al. (2018b), frutos verdes apresentam maiores força de desprendimento e quanto menor a força de desprendimento maiores são as eficiências de derricha;
- i) O LIME apresentou para o fator “Aderência do fruto a planta” um resultado inconclusivo, por falta de variação dos dados deste fator, pois apenas um talhão é de uma cultivar com aderência do fruto alta e os outros com aderência do fruto média;
- j) A recomendação segundo o LIME para o fator “Uniformidade de maturação” é que as cultivares com maturação desuniforme ajudam na maximização da eficiência de derricha. Isso pode ocorrer principalmente quando se tem maiores proporções de frutos maduros e secos na planta;
- k) Quanto ao fator “cultivar”, as que apresentaram tendencia de maximizar a eficiência de derricha foram Mundo novo e Catucaí. Silva et al (2010) analisando as cultivares Mundo Novo, Catucaí e Icatu identificaram que Mundo Novo e Catucaí possuem menores forças de desprendimento e também as maiores diferença entre força de desprendimento dos frutos verdes e cerejas, além de afirmarem que estas características colocam estas cultivares como as mais aptas a serem colhidas mecanicamente dentre as três estudadas pelos autores.
- l) quanto a “Queda natural” o LIME recomendou para maximização da eficiência de derricha os talhões em que houve maiores número de café caído naturalmente. Pode-se subentender que lavouras que caíram mais frutos de forma natural, apresentam, ainda na planta, frutos em estágio de maturação mais avançada;

- m) Quanto a porcentagem de frutos verde, verde cana, cereja, passa e seco, é notado que o LIME recomenda maiores quantidades de frutos secos, cereja e passa, e menores quantidades de frutos verde e verde cana, isto ocorre pelo fato de a força de desprendimento dos frutos em estágio de maturação avançado serem menores que as dos frutos verde e verde cana, o que faz com que os frutos secos, passa e cereja sejam mais facilmente derriçados, este fato foi notado por Avelar et al. (2013).
- n) Para o fator “Comprimento do internódio” o modelo RNA mostrou que internódios curtos maximizam a eficiência de derriça.

Ao observar os fatores relacionados ao ambiente, mostrados na Figura 13 na cor laranja, foi visto que:

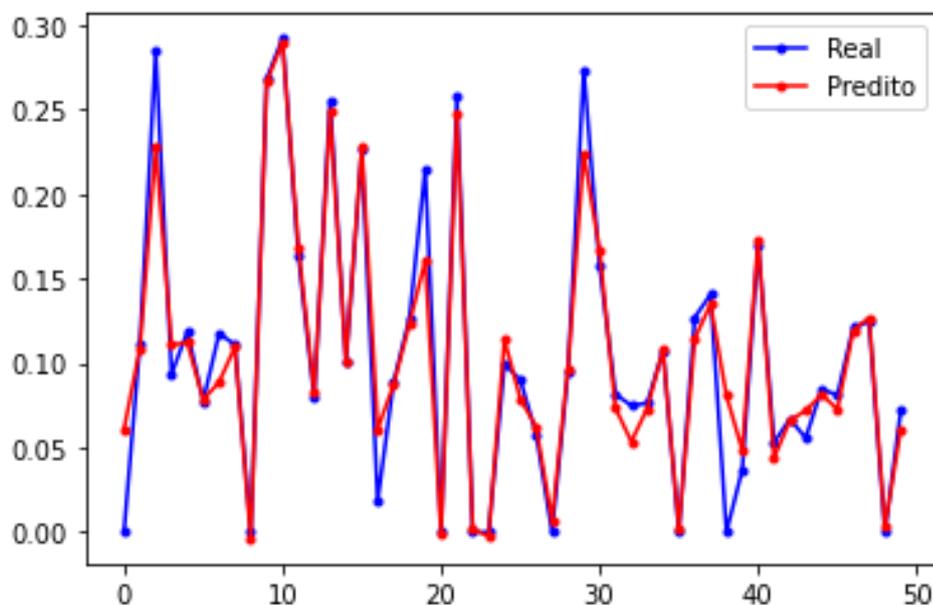
- a) este grupo de fatores apresentou-se em média como o quarto e último grupo de fatores que se mostraram mais importantes para a eficiência de derriça;
- b) para o fator “Área do talhão” o LIME recomenda áreas de no mínimo 5,37 hectares;
- c) o LIME recomendou para o fator “Temperatura média do dia” temperaturas abaixo de 20,13 °C. Este é um fator que precisa ser mais detalhado para estudo, uma vez que o banco de dados foi alimentado com a média dos valores de temperatura durante o período de colheita e na prática observa-se que no período da manhã o café é mais resistente ao desprendimento, já no período da tarde, se desprende com maior facilidade;
- d) quanto a “Umidade média do dia” foi recomendado pelo o LIME umidades superiores a 59,73%;
- e) o fator “Velocidade média do vento no dia” acima de 1,39 m.s<sup>-1</sup> maximiza a eficiência de derriça, já para “Rajada de vento média no dia”, que são ventos repentinos, é recomendado valores abaixo de 3,93 m.s<sup>-1</sup> e a “Direção do vento” para este caso é recomendada abaixo de 243,63 graus;
- f) para os fatores relacionados ao espaçamento o LIME recomendou os seguintes valores, “Espaçamento entre plantas” igual 0,8 m e o “Espaçamento entre ruas” de 3,8 ou 4 m. Esta tendência de plantas mais espaçadas permite maior entrelaçamento dos ramos com as hastes derriçadoras da máquina e uma vez que as plantas estão mais espaçadas, além de receberem maior quantidade de luz solar, ficam menos propensas ao amortecimento de vibração quando em contato com as hastes derriçadoras.

#### 4.1.2 Análise com base em RNA da influência dos fatores sobre a perda de chão

Para a rede neural treinar e desenvolver um modelo eficaz para a predição da perda de chão da máquina, foi utilizado as 100 amostras de dados sintéticos, já o teste de validação foi feito com as 50 amostras de dados reais, onde observa-se que a perda de chão da máquina foi bem predita utilizando os mesmos 34 fatores utilizados como entrada no modelo da RNA realizada para a eficiência de derriça.

Pode-se notar, na Figura 14, que o modelo apresentou  $R^2$  igual a 0,93, RMSE igual a 0,02.

Figura 14 – Gráfico da predição da perda da máquina no modelo RNA, onde no eixo x estão as 50 amostras de dados reais (linhas) e no eixo y a perda de chão da máquina, os pontos da linha azul representam a perda da máquina real em cada talhão e os pontos da linha vermelha as perdas preditas.



Fonte: Do autor (2021)

Ao analisar a média da posição em que cada fator apareceu no ranking de importância e os motivos por que cada um deles interferiu na perda de chão da máquina, chegou-se no seguinte resultado (Figura 15), onde os fatores estão apresentados em grupos de cores: na cor verde, estão os fatores ligados a características da planta, em laranja (salmão) fatores que se referem ao ambiente, em amarelo (mostarda) relacionados à máquina e em azul os outros fatores.

Figura 15 – Organização dos fatores com base nas posições médias e recomendações para minimizar a perda de chão da máquina

POSIÇÃO MÉDIA	FATORES	MINIMIZAR PERDAS DE CHÃO
3	Operação	Colheita plena
4	Maturação	Média ou tardia
5	Data da colheita	Entre o 22° e 66° dia de colheita
6	Uniformidade de maturação	Uniforme
7	Freio dos cilindros osciladores	8 Kgf ou abaixo
8	Resposta a poda	Plantas com boa resposta
9	Velocidade média do vendo no dia	Abaixo de 1,39 m.s <sup>-1</sup>
10	Quantidade de frutos secos	Abaixo de 32%
11	Direção do vento	Abaixo de 194,36 graus
12	Cor do fruto	Vermelho
13	Comprimento dos internódios	Curto
13	Umidade média do dia	Acima de 59,73%
14	Aderência do fruto a planta	Inconclusivo
15	Rajada de vento média do dia	Abaixo de 3,93 m.s <sup>-1</sup>
15	Área do talhão	Abaixo de 5,41 ha
17	Porte da planta	Quanto menor
18	Temperatura média do dia	Acima de 20,43 graus celsius
18	Diâmetro da copa	Quanto menor
19	Queda natura	Quanto menor
20	Velocidade da máquina	1 Km.h <sup>-1</sup> ou acima
20	Frequência de vibração da máquina	13,3 Hz ou abaixo
22	Cultivar	Mundo novo e Catucaí
23	Produtividade da planta	Inconclusivo
24	Fazenda	A
25	Quantidade de frutos cerejas	Acima de 31%
25	Máquina	TDI ou mini TDI
25	Ramificações da planta	Quanto mais
27	Quantidade de frutos passas	Acima de 32%
27	Espaçamento entre plantas	0,9 m
28	Tempo de maturação	Acima de 224 dias
28	Quantidade de frutos verde cana	Acima de 5%
28	Formato da copa	Copa cilíndrica
28	Quantidade de frutos verdes	Acima de 11%
29	Espaçamento entre ruas	Inconclusivo

Fonte: Do autor (2021)

Ao analisar os fatores sem uma titulação específica (outros), representados na Figura 15 na cor azul claro, observa-se os seguintes resultados:

- a) em média estes fatores são os de maior importância se comparado com os outros rótulos;

- b) o fator “Data da colheita” teve como recomendação para menores perdas as operações que ocorreram entre 22º dia contado a partir do início da colheita (27/05) até o 66º dia (10/07). Observa-se então que a recomendação para minimizar as perdas é de não realizar as operações muito precipitado e nem tão atrasado, uma vez que nesta safra a colheita durou 99 dias indo até o dia (12/08);
- c) quanto ao parâmetro “Fazenda”, apesar dos resultados apontarem relevância na participação da perda da máquina para a fazenda A, a interpretação torna-se difícil devido à quantidade de fatores que as pertencem.

Analisando os fatores relacionados a máquina, exibidos na Figura 15 na cor amarelo, observa-se os seguintes resultados:

- a) para “Operação” o LIME recomendou colheita plena para minimização das perdas. O fato de realizar apenas uma única passada da máquina, o volume de frutos que caem nos recolhedores e transportadores da máquina é maior. Isso provavelmente pôde ser notado pela inteligência computacional.
- b) para o fator “Freio dos cilindros osciladores” foi recomendado 8 Kgf ou abaixo; Abaixo de 8 Kgf, os cilindros osciladores tendem a girar constantemente ao passar pelas plantas o que ocasiona lançamento dos frutos derriçados para fora da área útil de recolhimento da mesma;
- c) quanto a “Velocidade da máquina” foi recomendado  $1\text{Km.h}^{-1}$  ou acima. Em velocidades maiores, o tempo em que a palhetas recolhedoras têm para abrir dando passagem para o tronco da planta e em seguida se fecharem no espaço entre uma planta e outra é reduzido, assim não há tempo suficiente para as palhetas se fecharem, permitindo abertura no espaço entre plantas e aumentando a perda de café de chão;
- d) o LIME recomendou que para “Frequência de vibração da máquina” os valores de 13,3 Hz ou abaixo minimizam a perda da máquina. Em vibrações menores, as chances de derriça também são menores, assim, muitas vezes o operador eleva a velocidade operacional pensando em compensar a vibração e isso faz com que os frutos caem pelos recolhedores conforme citado no item anterior;
- e) para o fator “Máquina” foi recomendado as máquinas TDI e mini TDI.

Observando os fatores relacionado a características da planta, exibidos na Figura 15 com a cor verde claro, foram notados os seguintes resultados:

- a) quanto mais tardia for os fatores “Maturação” e “Tempo de maturação” menores serão as perdas;
- b) variedades com o fator “Uniformidade de maturação” uniforme, ajudam na minimização das perdas;
- c) para o fator “Resposta a poda” é recomendado pelo LIME cultivares com boa resposta, porém este fator é de difícil análise por não se ter o histórico de podas dos talhões estudados, sendo as informações coletadas em fichas técnicas das cultivares;
- d) segundo o LIME é recomendado porcentagem de frutos secos abaixo de 32%, enquanto para os frutos passa, cereja, verde cana e verde valores acima de 32%, 31%, 5% e 11% respectivamente;
- e) pensando em menores perdas de chão, o fator “Cor do fruto” tem como recomendação, frutos da cor vermelha;
- f) já para o fator “Comprimento dos internódios” é recomendado pelo LIME, plantas com internódios curtos;
- g) os resultados para o fator “Aderência do fruto a planta” se mostraram inconclusivos, por falta de variação dos dados deste fator;
- h) para os fatores “Porte da planta” e “Diâmetro da copa” o LIME recomenda plantas com tamanhos inferiores, já para a “Ramificações da planta” é recomendado plantas com bastante ramos e no fator “Formato da copa” recomenda-se copas cilíndricas para a minimização das perdas. Ferreira Júnior et al. (2016a) mencionam a influência das características geométricas sobre a perda da máquina, geralmente observadas em campo. Já no presente trabalho, foi possível, através de inteligência de máquina identificar as características mais influentes para as perdas durante a colheita mecanizada do café nas Fazendas estudadas;
- i) para o fator “Queda natural” segundo o LIME é ideal talhões onde houve valores menores, ou seja, a análise computacional aponta para a situação real na qual menores perdas é condição favorável ao produtor;
- j) as cultivares que apresentam menores perdas segundo o LIME são Mundo Novo e Catucaí;
- k) quanto ao fator “Produtividade da planta” o resultado se mostrou inconclusivo, por falta de variações dentro deste fator.

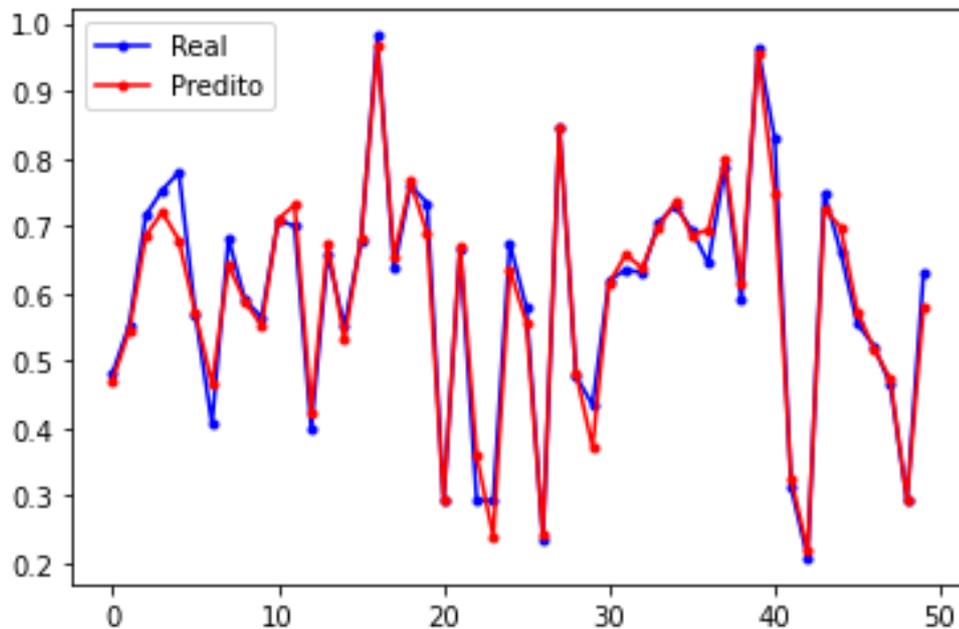
Ao observar os fatores relacionados ao ambiente, mostrados na Figura 15 na cor laranja, obteve-se os seguintes resultados:

- a) o fator velocidade do vento, mais especificamente, os ventos considerados mais brandos, como “Velocidade média do vento no dia” abaixo de  $1,39 \text{ m.s}^{-1}$ , e “Rajada média de vento no dia” abaixo de  $3,93 \text{ m.s}^{-1}$ , foram apontados como favoráveis à redução de perdas durante a colheita mecanizada. Já a “Direção do vento” é recomendado direções abaixo de 194 graus;
- b) para o fator “Umidade média do dia” foi mostrado pelo LIME que dias com umidade relativa média acima de 59,73% ajudam na redução das perdas de café da máquina;
- c) o LIME recomendou talhões com o fator “Área do talhão” abaixo de 5,41 hectares;
- d) O fator “Temperatura média do dia” se mostrou melhor para redução de perdas em dias com a temperatura acima de  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- e) para a redução das perdas o LIME recomenda “Espaçamento entre plantas” de 0,9 metros. Já para o fator “Espaçamento entre ruas” os resultados apresentados pela rede neural não estabelecem um padrão lógico, por tanto foi classificado como inconclusivo.

### 4.1.3 Análise com base em RNA da influência dos fatores sobre a eficiência de colheita

Para a rede neural treinar e desenvolver um modelo eficaz para a predição da eficiência de colheita, foi utilizado as 100 amostras de dados sintéticos. Já o teste de validação foi feito com as 50 amostras de dados reais, onde observa-se que a eficiência de colheita foi bem predita, utilizando os mesmos 34 fatores, conforme observado na Figura 16, onde o modelo apresentou  $R^2$  igual a 0,97, RMSE igual a 0,03.

Figura 16 – Gráfico da predição da eficiência de colheita no modelo RNA, onde no eixo x estão as 50 amostras de dados reais (linhas) e no eixo y a eficiência de colheita, os pontos da linha azul representam a eficiência de colheita real em cada talhão e os pontos da linha vermelha as eficiências preditas.



Fonte: Do autor (2021)

A maximização da eficiência de colheita se dá pela maximização da eficiência de derriça mais a minimização da perda da máquina, este fato é comprovado na Figura 17, onde pôde-se observar que as recomendações para a maximização da eficiência de colheita é um aglomerado de recomendações para maximizar a eficiência de derriça mais algumas recomendações para minimizar a perda da máquina.

Figura 17 – Comprovação que a maximização da eficiência de colheita se dá pela junção de recomendações para a maximização da eficiência de derrixa e minimização das perdas.

FATORES (Em ordem de prioridade para maximizar a eficiência de colheita)	MAXIMIZAR EFICIÊNCIA DE DERRIXA	MAXIMIZAR EFICIÊNCIA DE COLHEITA	MINIMIZAR PERDAS
Cor do fruto	Amarelo	Amarelo	Vermelho
Formato da copa	Copa cônica	Copa cônica	Copa cilíndrica
Diâmetro da copa	Quanto menor	Quanto menor	Quanto menor
Data da colheita	Até o 37º dia	Até o 37º dia	Entre o 22ª dia e o 66º dia
Resposta a poda	Média	Média	Boa
Porte da planta	Quanto menor	Quanto menor	Quanto menor
Área do talhão	Acima de 5,37 ha	Acima de 5,37 ha	Abaixo de 5,41 ha
Vibração da máquina	Acima de 13,64	Acima de 13,64 Hz	13,3 Hz ou abaixo
Temperatura média do dia	Abaixo de 20,13 °C	Abaixo de 20,13 °C	Acima de 20,43 °C
Fazenda	B	A	A
Rajada de vento média do dia	Abaixo de 3,93 m.s <sup>-1</sup>	Abaixo de 3,93 m.s <sup>-1</sup>	Abaixo de 3,93 m.s <sup>-1</sup>
Umidade média do dia	Acima de 59,73%	Acima de 59,73 %	Acima de 59,73%
Cultivar	Mundo Novo e Catucaí	Mundo Novo e Catucaí	Mundo Novo e Catucaí
Maturação	Precoce e média	Quanto mais precoce	Média ou tardia
Aderência do fruto a planta	Inconclusivo	Inconclusivo	Inconclusivo
Velocidade da máquina	1 Km.h <sup>-1</sup> ou abaixo	1 Km.h <sup>-1</sup> ou abaixo	1 Km.h <sup>-1</sup> ou acima
Uniformidade de maturação	Desuniforme	Uniforme	Uniforme
Ramificações da planta	Quanto menos	Quanto menos	Quanto mais
Direção do vento	Abaixo de 244 graus	Abaixo de 194 graus	Abaixo de 194 graus
Máquina	Jacto K3	Jacto K3	TDI ou mini TDI
Queda natura	Quanto maior	Quanto maior	Quanto menor
Quantidade de frutos cerejas	Abaixo de 26%	Acima de 20%	Acima de 31%
Operação	Colheita escalonada	Plena	Colheita plena
Produtividade da planta	Média	Inconclusivo	Inconclusivo
Quantidade de frutos passas	Abaixo de 20%	Abaixo de 21%	Acima de 32%
Quantidade de frutos secos	Acima de 32%	Acima de 32%	Abaixo de 32%
Freio dos cilindros osciladores	Entre 9 e 12 Kgf	8 Kgf ou abaixo	8 Kg ou abaixo
Quantidade de frutos verdes	Abaixo de 14%	Abaixo de 14%	Acima de 11%
Espaçamento entre plantas	0,8 m	0,8 m	0,9 m
Velocidade média do vento	Acima de 1,39 m.s <sup>-1</sup>	Inconclusivo	Abaixo de 1,39 m.s <sup>-1</sup>
Quantidade de frutos v. cana	Abaixo de 7%	Abaixo de 7%	Acima de 5%
Tempo de maturação	Abaixo de 220 dias	Inconclusivo	Acima de 224 dias
Comprimento dos internódios	Curto	Inconclusivo	Curto
Espaçamento entre ruas	Quanto maior	Inconclusivo	Inconclusivo

Fonte: Do autor (2021)

Os fatores representados na Figura 17 na cor amarela são de grande importância, pois ao atingir as recomendações do LIME para estes fatores, além de garantir uma alta eficiência

de derrça, será obtido também uma baixa perda da máquina e conseqüentemente uma alta eficiência de colheita.

Os fatores na cor laranja correspondem aos fatores que garantem uma maximização da eficiência de colheita com a minimização das perdas. Já os fatores na cor verde são aqueles que para obter uma alta eficiência de colheita basta seguir recomendações para atingir uma alta eficiência de derrça.

Os fatores listados na cor vermelha mostraram-se incoerentes em relação  eficiência de derrça, eficiência de colheita e perda da máquina. Além disso, estes são fatores que aparecem nas últimas posições na lista de prioridades para maximização da eficiência de colheita. Espera-se em trabalhos futuros aumentar o banco de dados e investigar mais a fundo estes fatores.

## 5 CONCLUSÃO

- a) De forma geral, os modelos RNA mostraram-se altamente eficientes na predição das saídas, sendo elas, eficiência de derriça com  $R^2$  igual a 0,94 e RMSE de 0,05; eficiência de colheita com  $R^2$  de 0,97 e RMSE de 0,03 e a perda de chão com  $R^2$  de 0,93 e RMSE igual a 0,02.
- b) Dentre os 34 fatores estudados os 5 que mais interferem na eficiência de derriça são: Formato da copa, cor do fruto, data da colheita, porte da planta e resposta a poda.
- c) Os 5 fatores que mais interferem na perda da máquina são: Escolha da operação (se será plena ou escalonada), maturação, data da colheita, uniformidade de maturação e ajuste do torque no freio dos cilindros osciladores da máquina.
- d) Os 5 fatores que mais interferem na eficiência de colheita são: Cor do fruto, formato da copa, diâmetro da copa, data da colheita e resposta a poda.
- e) Com a aplicação dos 3 modelos RNA conclui-se que os 34 fatores descrevem bem a operação de colheita mecanizada do café, e que a metodologia aplicada neste trabalho se mostrou eficiente, uma vez que várias recomendações baseadas no modelo RNA condizem com recomendações de trabalhos práticos realizados por pesquisadores da área de cafeicultura;
- f) O uso do aprendizado de máquina apontou também relevância em fatores antes não imagináveis e nem apontados ou comprovados com embasamento científico em pesquisas sobre colheita mecanizada do café, como é o caso dos fatores “Cor do fruto”, “Resposta a poda”, “Comprimento dos internódios”, “Queda natural” e os fatores relacionados ao clima, como “Velocidade do vento”, “Temperatura” e “Umidade relativa”.

## REFERÊNCIAS

AHA, W.; KIBLER, D.; ALBERT, M. K. Instance-Based Learning Algorithms. **Machine Learning**, v. 6, p. 37–66, 1991.

ANDRADE, Thiago et al. Predição de pragas e doenças no cafeeiro utilizando Redes Neurais Artificiais. **Anais da Sociedade Brasileira de Automática**, v. 2, n. 1, 2020.

AVELAR, R. C. et al. **Determinação de características desejáveis do cafeeiro (Coffea arabica L.) para a colheita mecanizada**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 8., 2013, Salvador. Anais... Salvador: UFBA, 2013. 1 CD-ROM.

BERSABAL, Diego; USA, Jumelyn; ARBOLEDA, Edwin; GALAS, Elbert. Coffee Bean Recognition Using Shape Features Using Decision Trees And Ensemble Classifiers. **International Journal of Scientific & Technology Research**. 9. 4921- 24. 2020.

BURMAN, P. A Comparative Study of Ordinary Cross-Validation, V-Fold Cross-Validation and the Learning-Testing Methods. **Biometrika**, p. 503–514, 1989.

CAVATON, Thiago. **Receita Bruta da lavoura cafeeira de Minas Gerais deve atingir R\$ 17,75 bi que equivalem a 60% das lavouras dos Cafés do Brasil**. Disponível em:. Acesso em 29 de dezembro de 2020.

CHAWLA, N. V. et al. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. **Journal of Artificial Intelligence Research**, v. 2009, n. Sept. 28, p. 321–357, 2006. ISSN 10769757.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: café**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020. 45p.

DE ALMEIDA, Paloma Francisca Pancieri; DA VITÓRIA, Edney Leandro; DE MORAES, Filipe. ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA COLHEITA DE CAFÉ. **X Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil**, 2019.

FERRAZ, G. A. S. et al. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 13, n. 1, p. 76-89, fev. 2012.

FERREIRA JÚNIOR, L. G. et al. “Ajuste minucioso”. **Cultivar Máquinas**, v. 160, p. 273-278, mar. 2016, a.

FERREIRA JÚNIOR, L. G.; SILVA, F. M.; FERREIRA, D. D. et al. Displacement Tracking of Harvester Rods of a Coffee Harvester. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 12, p. 4674-4680, Dez. 2016, b.

FERREIRA JÚNIOR, L. G. et al. “Efeito dominó”. **Cultivar Máquinas**, v. 180, p. 28-31, Dezembro 2017.

FERREIRA JÚNIOR, L. G. **Dinâmica de vibração da interação máquina e planta na colheita do café**. 2018. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018, a.

FERREIRA JÚNIOR, L. G.; SILVA, F. M.; Ferreira, D. D.; SIMÃO, S. D.; SOUZA, S. D.; SOUZA, G. C; FERREIRA, L. K. **Characterization of the detachment force of coffee fruits submitted to mechanical Harvest..** Coffee Science, v. 13, p. 71-79, 2018, b.

FERREIRA JÚNIOR, L. G.; SILVA, F. M.; FERREIRA, D. D.; Souza, C. E. P.; Pinto, A. W. M.; Borges, F. E. M. Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest. **Computers and eletronicns in Agriculture**, n.173, p. 1-9, Ab. 2020.

GUEDES, D. M. **Efeito da utilização de frequências de vibração na faixa de 35 a 55 Hz sobre a eficiência de derriça do café**. 2011. 52 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Bookman Editora, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ. Podas. In: **Cafeicultura do café no Brasil: manual de recomendações**. Rio de Janeiro: IBC/GERCA, 1974. p. 207-226.

KOHAVI, R. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. **International joint Conference on artificial intelligence**, v. 14, p. 1137–1145, 1995.

LEME, Dimas Samid et al. Reconhecimento do grau de torrefação do café por sistema de visão computacional. **Computadores e Eletrônicos na Agricultura** , v. 156, p. 312-317, 2019.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **The bulletin of mathematical biophysics**, Springer, v. 5, n. 4, p. 115–133, 1943.

MICHALSKI, R. S.; TECUCI, G. **Multistrategy learning**. Tutorial T15, IJCAI-1993, 1993.

MISHRA, Saumitra; STURM, Bob L .; DIXON, Simon. Explicações agnósticas de modelos interpretáveis locais para análise de conteúdo musical. In: **ISMIR** . 2017. p. 537-543.

OLIVEIRA, Ezequiel de et al. **Influência da vibração das hastes e da velocidade de deslocamento da colhedora no processo de colheita mecanizada do café**. Engenharia Agrícola, v. 27, n. 3, p. 714-721, 2007.

PEREIRA, R. C.; VASCONCELOS, S. S.; SALES, F. **Colheita e beneficiamento de café**. Brasília: Embrapa, 1999. 24p.

PIMENTA, C. J. **Qualidade do café (Coffea arabica L.) originado de frutos colhidos em quatro estádios de maturação**. 1995. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos)- Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1995

SALES, R. S. **Avaliação da regulagem do freio dos vibradores de colhedoras na eficiência de deriva do café**. 2011. 52 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

SALES, R. S. **Ajuste do freio dos vibradores na colheita mecanizada do café em lavouras com diferentes manejos**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

SAMPAIO, C. P. et al. **Determinação da força requerida para o desprendimento dos frutos de café em diferentes estádios de maturação**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 8., 2000, Poços de Caldas. Anais... Poços de Caldas: EMBRAPA Café, 2000. p. 98-100.

SILVA, F. C. **Efeito da força de desprendimento e da maturação dos frutos de cafeeiros na colheita mecanizada**. 2008. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

SILVA, Flávio Castro da et al. Comportamento da força de desprendimento dos frutos de cafeeiros ao longo do período de colheita. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 2, p. 468-474, 2010.

SILVA, F. C.; SILVA, F. M.; SILVA, A. C.; BARROS, M. M.; PALMA, M. A. Z. **Desempenho operacional da colheita mecanizada e seletiva do café em função da força de desprendimento dos frutos**. Coffee Science, Lavras, v.8, n.1, p. 53-60, jan./mar. 2013.

SILVA, F. M. et al. **Desempenho da operação mecanizada de derrça do café**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 23., 1997, Manhuaçu. Anais... Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 1997. p. 174-176.

SILVA, F. M. **Colheita mecanizada e seletiva do café**. Cafeicultura Empresarial: produtividade e qualidade. Lavras: UFLA/FAEPE, 2004. p 1 - 75.

SILVA, F. M. da et al. **Influência da força de desprendimento dos frutos do cafeeiro em diferente estádios de maturação ao longo da colheita**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito. Anais...Jaboticabal: SBEA, 2007. 1 CD-ROM.

SILVA, F. M. da et al. **Viabilidade técnica e econômica da colheita mecanizada do café**. Visão Agrícola, Piracicaba, n. 12, jan./jul. 2013.

SILVA, F. M. da; MIRANDA, N. B.; SILVA, F. O. e. **Mecanização da colheita viabiliza cafeicultor**. Granja, Porto Alegre, v. 784, p. 60-62, abr. 2014.

SILVEIRA-MARTINS, E. et al. Aplicação de redes neurais no Brasil: um estudo bibliométrico. **Biblionline**, v. 12, n. 2, p. 101–116, 2016. ISSN 1809-4775.

SOUZA, C. M. A. **Desenvolvimento e modelagem de sistemas de derrça e de abanação de frutos do cafeeiro**. 2004. 123 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

TAVARES, M. H. F. et al. Redes Neurais Artificiais: Princípios Básicos. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 1, n. 13, p. 47–57, 2016. ISSN 2175-1846.

VARGAS, V. C. C. de. **Correlação**. UFSC, 2012. Disponível em:<[http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Correlacao/Correlacao\\_Pearson\\_Spearman\\_Kendall](http://www.inf.ufsc.br/~vera.carmo/Correlacao/Correlacao_Pearson_Spearman_Kendall)> Acesso em 12 de janeiro de 2021.

WANG, H.; MA, C.; ZHOU, L. A Brief Review of Machine Learning and its Application. **Information Engineering and Computer Science.**, 2009.

XUE, M.; ZHU, C. A Study and Application on Machine Learning of Artificial Intelligence. **International Joint Conference on Artificial Intelligence.**, 2009.

ZAFAR, Muhammad Rehman; KHAN, Naimul Mefraz. DLIME: uma abordagem de explicações agnósticas de modelo interpretáveis locais determinísticas para sistemas de diagnóstico auxiliados por computador. **arXiv preprint arXiv: 1906.10263** , 2019.

ZANETTI, S. S. et al. Reference evapotranspiration estimate in Rio de Janeiro State using artificial neural networks. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 174–180, 2008. ISSN 18071929.